

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
MATERIALES AVANZADOS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***APROXIMACIÓN A LA CARACTERIZACIÓN
REOLÓGICA Y MECÁNICA DE MATERIALES
EN FRESCO DE BASE CEMENTO PARA
FABRICACIÓN ADITIVA***

Estudiante
Director UPV/EHU

Barreiro, Carrasco, Pablo
San José, Lombera, José Tomás

Departamento Ing. Minera y Metalúrgica y Ciencia de los Materiales
Curso académico 2021-2022

Bilbao, Junio, 2022



Agradecimientos

La campaña experimental utilizada para la realización de este Trabajo Fin de Máster, los materiales, equipos y supervisión, han sido proporcionados por Tecnia Research & Innovation, en el marco de una cooperación educativa.

También quería agradecer la colaboración de Sergio Pérez Barcenilla, Alejandro Salvador Polo y Rubén Castaño Álvarez, por sus consejos y contribuciones a la realización del presente TFM. También, debo darles las gracias por su cercanía y amabilidad durante mi estancia como colaborador del laboratorio *3D-printed cement based materials*, siempre están dispuestos a ayudar de cualquiera de las formas. A nivel personal, me gustaría agradecer a José Tomás todo su apoyo, comprensión y disposición casi completa, sin olvidar sus directrices que han hecho posible la realización de este trabajo.

Más explícitamente, deseo expresar mi agradecimiento a las diferentes administraciones que han dado soporte a este trabajo, MCI, AEI, EU and ERDF (PID2021-124203OB-I00, RTI2018-097079-BC31 y 10.13039/501100011033), así como al grupo de investigación SAREN (IT1619-22, Gobierno Vasco).



Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar las principales propiedades mecánicas de materiales de base cemento en fresco para fabricación aditiva. Las características especiales de dosificación del material de base cemento para que se considere *imprimible*, hace necesario el desarrollo de nuevos procedimientos de ensayo. Estos procedimientos, alternativos a los descritos en las normas existentes, deben permitir una caracterización rápida y completa del material. Mediante los ensayos mecánicos a compresión simple, asistidos mediante métodos de correlación de imágenes, se puede obtener una caracterización completa en las etapas tempranas del material en fresco. Alternativamente, es de gran interés la búsqueda de correlaciones con otros ensayos de caracterización que sean fácilmente implementables en el control de calidad del proceso de impresión. Estas propiedades mecánicas, junto con las propiedades reológicas del material en fresco son utilizadas para el calibrado de un modelo mecánico de evolución del comportamiento de material frente al fallo plástico. De esta forma, se obtiene el modelo mecánico del material necesario para simular el proceso de impresión 3D, que permite evaluar la *imprimabilidad* de las piezas objeto de estudio.

Palabras clave: Fabricación aditiva, Morteros, Aditivos, Adiciones, Reología, Aguja Vicat, Ensayos Uniaxiales, modelo Mohr-Coulomb.



Abstract

The aim of this work is to characterise the main mechanical properties of fresh cement-based materials for additive manufacturing. The special dosage characteristics of the cement-based material to be considered *printable* make it necessary to develop new test procedures. These procedures, as an alternative to those described in the existing standards, should allow a rapid and complete characterisation of the material. By means of simple mechanical compression tests and digital image correlation methods, a complete characterisation can be obtained in the early stages of the fresh material. Alternatively, it is of great interest to search for correlations with other characterisation tests that can be easily implemented in the quality control of the printing process. These mechanical properties, with the rheological properties of the fresh material, are used to calibrate a mechanical model of the evolution of the plastic failure of the material. In this way, the mechanical model of the material necessary to simulate the 3D printing process is obtained, which allows to evaluate the *printability* of an object.

Keywords: Additive manufacturing, Mortars, Admixtures, Additives, Rheology, Vicat needle, Uniaxial tests, Mohr-Coulomb model.



Laburpena

Lan honen helburua da fabrikazio gehigarriko zementu-oinarri freskoko materialen propietate mekaniko nagusiak ezaugarritzea. Inprimagarritzat jotzeko zementu-oinarriko materialaren dosifikazioaren ezaugarri bereziak direla eta, saiakuntza-prozedura berriak garatu behar dira. Prozedura horiek, dauden arauetan deskribatutakoen alternatiboak, materialaren karakterizazio azkar eta osoa ahalbidetu behar dute. Konpresio sinpleko saiakuntza mekanikoen bidez, irudien korrelazio-metodoen bidez lagunduta, karakterizazio osoa lor daiteke material freskoaren etapa goiztiarretan. Txandaka, oso interesgarria da inprimaketa-prozesuaren kalitate-kontrolean erraz inplementatu daitezkeen beste karakterizazio-saiakuntza batzuekin korrelazioak bilatzea. Propietate mekaniko horiek, freskoan dagoen materialaren propietate erreologikoekin batera, materialak akats plastikoaren aurrean duen portaeraren eboluzio-eredu mekaniko bat kalibratzeko erabiltzen dira. Horrela, materialaren eredu mekanikoa lortzen da, 3D inprimaketa-prozesua simulatzeko beharrezkoa dena, aztergai diren piezen inprimagarritasuna zehazteko helburuarekin.

Gako-hitzak: fabrikazio gehigarria, Morteroak, Aditiboak, Gehigarriak, Erreologia, Vicat orratza, Saiakuntza Uniaxialak, Mohr-Coulomb modeloa.



Índice

Contexto del proyecto	XIII
Objetivos y alcance del trabajo	XV
Capítulo 1. Fabricación aditiva de materiales en base cemento	1
1. <i>Introducción a la fabricación aditiva</i>	2
2. <i>Reseña histórica</i>	5
3. <i>Tecnologías de fabricación aditiva de materiales de base cementicia</i>	6
4. <i>Etapas del proceso de fabricación aditiva</i>	11
5. <i>Material en fresco de base cementicia imprimible</i>	12
6. <i>Modelo de extrusión</i>	15
7. <i>Modelo de bombeo</i>	17
8. <i>Propiedades del material endurecido en fabricación aditiva</i>	18
9. <i>Principales aplicaciones</i>	20
<i>Referencias</i>	24
Capítulo 2. Diseño de materiales de base cementicia para fabricación aditiva	27
1. <i>Conceptos esenciales</i>	28
2. <i>Introducción a los cementos</i>	29
3. <i>Reacción de hidratación del cemento</i>	33
4. <i>Adiciones y aditivos</i>	36
<i>Referencias</i>	39
Capítulo 3. Caracterización reológica y ensayo Vicat de materiales en fresco de base cementicia	41
1. <i>Introducción a la reología</i>	42
2. <i>Modelo reológico de materiales en fresco de base cementicia</i>	44
3. <i>Modelo tixotrópico de materiales en fresco de base cementicia</i>	45
4. <i>Cinética tixorópica</i>	48
5. <i>Efecto de los aditivos sobre las propiedades reológicas</i>	49
6. <i>Modelo de fallo plástico</i>	50
7. <i>Interferencias entre capas</i>	52
8. <i>Ensayo de aguja Vicat</i>	53
<i>Referencias</i>	55



Capítulo 4. Caracterización mecánica en fresco de materiales de base cementicia	57
1. <i>Introducción al criterio de plastificación de Mohr-Coulomb</i>	58
2. <i>Ensayo de compresión uniaxial</i>	63
<i>Referencias</i>	66
Capítulo 5. Diseño experimental para la caracterización del material en fresco	67
1. <i>Ensayo reológico mediante reómetro</i>	67
2. <i>Ensayos mediante aguja Vicat</i>	69
3. <i>Diseño de un protocolo de ensayo uniaxial</i>	70
4. <i>Correlaciones de Imágenes Digitales (DIC)</i>	76
<i>Referencias</i>	78
Capítulo 6. Resultados experimentales y discusión	79
1. <i>Materiales y dosificación de las muestras de ensayo</i>	79
2. <i>Resultados del ensayo a compresión simple</i>	80
3. <i>Ensayo de aguja Vicat y ensayo reológico</i>	85
4. <i>Resultados de la caracterización mecánica del material</i>	89
5. <i>Correlación de ensayos</i>	93
<i>Referencias</i>	94
Capítulo 7. Conclusiones	95
Apéndice 1. Criterio de plastificación de Drucker-Prager¹	99
Apéndice 2. Diseño del molde	101
Apéndice 3. Gráficas ensayos a compresión simple	102
Apéndice 4. Datos deformaciones de ensayos uniaxiales	105
Apéndice 5. Datos ensayo reológico	106

Índice de figuras

Figura 1.1. Diagrama esquemático del proceso de fabricación aditiva de materiales cementicos.	4
Figura 1.2. Evolución histórica de los proyectos de fabricación aditiva de materiales en base cemento de las últimas décadas [4].	5
Figura 1.3. Métodos de fabricación aditiva de materiales de base cementicia [11].	6
Figura 1.4. Sistema de impresión 3D de la Universidad Tecnológica de Eindhoven [13].	7
Figura 1.5. Dibujo de la boquilla utilizada en la tecnología de contour crafting [9].	8
Figura 1.6. Imágenes del sistema utilizado en la tecnología de contour crafting [9].	8
Figura 1.7. a) Esquipo de impresión mediante d-shape. b) Barrera de boquillas para la deposición del aglutinante. c) Material granular depositado sobre la cama de impresión. d) Deposición del aglutinante sobre el material granular en las zonas de impresión [15].	9
Figura 1.8. Puente impreso por IAAC mediante la tecnología D-Shape (Alcobendas) [16].	10
Figura 1.9. Piezas fabricadas mediante la tecnología de concrete printing [12].	10
Figura 1.10. Fallo por plastificación (a) y fallo por pandeo (b) durante el proceso de impresión de un diseño cuadrado [23].	14
Figura 1.11. El régimen de ladrillo infinito (figura de la izquierda) y el llamado "régimen de flujo libre" (figura de la derecha) [25].	15
Figura 1.12. Esquema de una bomba de cavidad progresiva [27].	17
Figura 1.13. Problema general de selección de materiales [33].	21
Figura 1.14. Representación gráfica del coste de producción de una pieza frente a la complejidad geométrica de la pieza [34].	22
Figura 1.15. a) Fabricación de componentes horizontales (Universidad de Loughborough, Reino Unido), b) Elemento estructural. Fuente: https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/ , c) Componente impreso verticalmente (Universidad de Loughborough, Reino Unido), d) paredes y columnas impresas verticalmente in situ (EE.UU.), e) panel, impreso horizontalmente en forma de cáscara (TU Delft y TU Eindhoven, Países Bajos), f) componente de panel impreso verticalmente (XTreeE, Francia) [4,37].	23
Figura 2.1. La Tabla A1.1.1 de cementos comunes de la RC-08, que muestra los principales tipos de cementos en función de su composición [5].	31
Figura 2.2. Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación [5].	32
Figura 2.3. Representación esquemática de los procesos de hidratación del cemento [8].	34
Figura 2.4. Representación esquemática del cemento anhidro (a) el efecto de la hidratación después de (b) 10 min, (c) 10 h, (d) 18 h, (e) 1-3 días, y (f) 2 semanas (Adaptación de K. L. Scrivener, tesis doctoral, Universidad de Londres, 1984) [10].	35
Figura 3.1. Clasificación de los materiales de acuerdo con su comportamiento reológico.	43



Figura 3.2. Diferencias estructurales entre límite de fluencia estático y límite de fluencia dinámico [8].	45
Figura 3.3. a) Evolución con el tiempo del límite elástico de un material tixotrópico b) Ciclo de histéresis de un material tixotrópico [9].	46
Figura 3.4. Evolución de la tensión de fluencia en función del tiempo. En escalas de tiempo cortas, la floculación permite imprimir un filamento con características geométricas bien controladas mientras que, en escalas de tiempo más largas, la nucleación de los hidratos permite la impresión de objetos verticales y delgados [10].	47
Figura 3.5. Variación de las propiedades reológicas de los materiales de base cementicia al aumentar en el sentido de las flechas diferentes componentes [13].	49
Figura 3.6. Esquema del sistema experimental del ensayo de aguja Vicat [19].	53
Figura 3.7. Curva de fraguado de una pasta de cemento [19].	53
Figura 4.1. Diagrama del criterio de fallo de Mohr-Coulomb para un estado de tensiones plano [5].	58
Figura 4.2. Superficie de fallo del criterio de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones principales [6].	61
Figura 4.3. Diagrama del criterio de fallo de Tresca, Mohr-Coulomb y Rankie mediante el círculo de Mohr para un estado de tensiones plano [7].	62
Figura 4.4. Ensayo a compresión simple: a) esfuerzos de la muestra b) Círculo de Mohr [6].	63
Figura 4.5. Comportamiento mecánico del material en fresco a compresión en diferentes edades:(a) 0 min (b) 420 min [8].	65
Figura 4.6. Gráfico de evolución del comportamiento mecánico del material en fresco a compresión a partir de las tres horas [9].	65
Figura 5.1. a) Reómetro Viskomat XL. b) Geometría de la sonda de ensayo [2].	68
Figura 5.2. Barrido de velocidades relativo al ensayo reológico.	69
Figura 5.3. Probeta ensayo Vicat.	69
Figura 5.4. Diagrama esquemático del equipo de ensayo, incluyendo la máquina de ensayo a compresión y el sistema de análisis óptico [10].	71
Figura 5.5. Amasadora de capacidad 5,5 l.	72
Figura 5.6. En la figura de la izquierda se muestra el molde ensamblado con los dos semicilindros y la placa inferior. En la figura de la derecha se observa la muestra de ensayo asentada sobre la placa inferior tras retirar el molde de PLA.	73
Figura 5.7. Equipo para ensayo de compresión [4].	74
Figura 6.1. a) Imagen del ensayo a compresión analizada mediante el software de correlación de imágenes GOM 2D [1]. b) Gráfica de las deformaciones frente al tiempo de ensayo para las tres distancias seleccionadas: Distancia 1 (negro), Distancia 2 (azul), Distancia 3 (verde).	80
Figura 6.2. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 1.	81



Figura 6.3. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 2.	82
Figura 6.4. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 3.	82
Figura 6.5. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 4.	83
Figura 6.6. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 5.	83
Figura 6.7. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 6.	84
Figura 6.8. Gráfica de la tensión máxima frente al tiempo para el ensayo de aguja Vicat.	86
Figura 6.9. Gráfica del toque frente al tiempo obtenida mediante reómetro.	87
Figura 6.10. Evolución temporal del límite de fluencia estático y límite de fluencia dinámico.	88
Figura 6.11. Representación gráfica: a) Evolución temporal del módulo de compresión. b) Evolución temporal de la resistencia a compresión.	89
Figura 6.12. Evolución temporal del coeficiente de Poisson.	90
Figura 6.13. Representación de los círculos de Mohr para el estado de tensiones uniaxial.	90
Figura 6.14. Representación del modelo de Mohr-Coulomb del material para los tiempos: 5, 15, 30 y 45 min.	92
Figura 6.15. Representación de gráfica de los modelos de correlación de ensayos: a) Módulo de Young vs. Esfuerzo de penetración b) Resistencia a compresión vs. Esfuerzo de penetración.	93
Figura 1.Ap. Superficie de fallo del criterio de Drucker-Prager y Mohr-Coulomb en el espacio de las tensiones principales y plano desviador.	100
Figura 2.Ap. Diseño de la placa de acero.	101
Figura 5.1.Ap. Barrido de velocidades de ensayo.	106
Figura 5.2.Ap. Representación del torque vs. el tiempo de ensayo.	106
Figura 5.3.Ap. Comparación del barrido aplicado frente al torque para los diferentes tiempos de ensayo.	107



Índice de tablas

Tabla 1.1. Resumen de las características de los métodos de fabricación aditiva de materiales cementicios [12].	7
Tabla 5.1. Open-source Digital Image Correlation (DIC) software.	77
Tabla 6.1. Dosificación de las muestras de ensayo.	79
Tabla 6.2. <i>Valores del módulo de Young y de la resistencia a compresión del material a diferentes tiempos.</i>	84
Tabla 6.3. <i>Ensayo de penetración Vicat.</i>	85
Tabla 6.4. <i>Límite de fluencia estático y límite de fluencia dinámico obtenidos mediante ensayo en reómetro.</i>	87
Tabla 6.5. Límite de fluencia estático y cohesión del material.	91
Tabla 6.6. Ángulo de rozamiento interno (ϕ) del material a diferentes tiempos.	92
Tabla 4.Ap. Factor de conversión de distancias.	105



Listado de acrónimos

- AM: Additive Manufacturing
- IA: Artificial Intelligence
- IoT: Internet of Things
- EADS: European Aeronautic Defence and Space
- ALM: Additive Layer Manufacturing
- SFF: Solid Freeform Fabrication
- CAD: Computer Aided Design
- CAM: Computer Aided Manufacturing
- CNC: Computer Numerical Control
- CC: Contour Crafting
- CP: Concrete Printing
- FEA: Finite Element Method
- CFD: Computational Fluid Dynamics
- PLA: ácido poliláctico
- DIC: Digital Image Correlation

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA ESKOLA

ESCUELA
DE INGENIERÍA DE BILBAO



Contexto del proyecto

Con la cuarta Revolución Industrial (*Industria 4.0*) en pleno apogeo, las tecnologías han transformado diferentes sectores de la economía mundial. Tecnologías como los sistemas ciberfísicos, el Internet de las cosas (IoT), *Deep Learning*, la inteligencia artificial (IA), *Big Data* y aplicaciones de automatización inteligente están remodelando el ecosistema industrial, impulsando mejoras en la productividad y la automatización. A pesar de estos avances, el propio proceso de fabricación y manufactura industrial ha permanecido en la mayoría de los casos inalterado.

La falta de innovación en el sector de la construcción ha sido un tema de discusión, sobre todo en los últimos tiempos¹. En comparación con otros sectores (la industria automotriz o la industria agrónoma), que han experimentado una notable productividad en las últimas décadas, la productividad del sector de la construcción ha permanecido estancada o incluso ha retrocedido. Sin embargo, las tendencias recientes indican que la digitalización, los nuevos materiales y tecnologías y la automatización avanzada se están asentando en el sector. Los proyectos de digitalización en el sector de la construcción son el eje fundamental de la investigación de este sector. Hay numerosos grupos en todo el mundo dedicados a la investigación en grandes organizaciones que están invirtiendo en nuevas tecnologías de fabricación. Hay una proliferación de métodos y enfoques en este campo, desde los primeros trabajos sobre conceptos fundamentales y aplicaciones de la década de 2000, hasta la gran variedad de procesos y aplicaciones que se encuentran en la actualidad. Estas investigaciones han demostrado una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, para el desarrollo de esta tecnología se requieren de enfoques estandarizados para ensayar y evaluar los factores que afectan, tanto al rendimiento del sistema de fabricación como a los materiales utilizados. Todo ello enmarcado en el contexto del diseño y aplicación del producto que se fabrica. Esto es especialmente importante porque los materiales, las características del proceso y la madurez de cada tecnología de fabricación son muy variables².

En este contexto, se ha prestado cada vez más atención a las técnicas de impresión 3D aplicadas a la ingeniería civil³. En comparación con el proceso de construcción convencional esta tecnología aporta la flexibilidad del diseño y la rapidez de prototipado, ofreciendo un gran potencial para facilitar el desarrollo hacia una industria de la construcción 4.0

sostenible. Por lo tanto, esta tecnología ofrece un *valor añadido*, permitiendo una importante personalización del diseño con un mínimo aumento de los costes de fabricación. La impresión en 3D de materiales cementicios dentro del contexto de la fabricación aditiva es una tecnología incipiente de gran proyección que está teniendo un impacto creciente en la actualidad⁴. La fabricación aditiva y la creación rápida de prototipos, utilizando diferentes tipos de materiales poliméricos y metálicos, es una realidad en diferentes sectores industriales. Sin embargo, en sectores como el de la construcción existen pocos ejemplos de aplicación de esta tecnología debido a que la aplicación práctica todavía está en fase de desarrollo. Esto se debe, por un lado, al carácter conservador del sector de la construcción, pero por otro lado a ciertos desafíos técnicos, económicos y sociales que hay que superar para desbloquear y activar todas las oportunidades de la impresión 3D en el sector de la construcción.

Uno de los puntos clave para el desarrollo de esta tecnología es el conocimiento de la evolución con el tiempo de las propiedades mecánicas del material en estado fresco, necesarias para caracterizar su comportamiento mecánico⁵. Estas propiedades son necesarias para calibrar un modelo de comportamiento de material. Este modelo es utilizado para la modelización del proceso de impresión 3D con el objeto de determinar la *imprimabilidad* de las piezas objeto de estudio. Además, la bibliografía referente a la caracterización del material en fresco para determinar su *imprimabilidad* es escasa. Por ello el desarrollo de esta tecnología abre una puerta hacia el estudio de los materiales de base cemento, aportando un conocimiento más profundo de los mismos.

-
1. R. Maskuriy, A. Selamat, P. Maresova, O. Krejcar, O. Olalekan David, *Industry 4.0 for the Construction Industry: Review of Management Perspective*, MDPI Economies, 7(3), 68, 2019.
 2. R. A. Buswella et al., *A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete*, Cement and Concrete Research, 134, 2020.
 3. A. Perrot et al., *Structural build-up of cement based materials used for 3D printing extrusion techniques*, Mater. Struct. 49, 1213–1220, 2016.
 4. T. Di Carlo, *Experimental and numerical techniques to characterize structural properties of fresh concrete relevant to contour crafting*, Ph.D. thesis, University of Southern California, 2012.
 5. R. J. M. Wolfs et al., *Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: numerical modelling and experimental testing*, Cem. Concr. Res. 106, 103–116, 2018.

Objetivos y alcance del trabajo

Los objetivos generales del presente trabajo son:

- Búsqueda bibliográfica sobre metodologías de ensayo de materiales cementicios en estado fresco.
- Seleccionar los ensayos (destructivos y no destructivos) más adecuados para la determinación de la evolución con el tiempo de las propiedades mecánicas del material de impresión en estado fresco.
- Definición de un protocolo de ensayo para este tipo de materiales.
- Realización de ensayos de caracterización de materiales cementicios en estado fresco.
- Aplicar metodologías de análisis de propiedades mecánicas mediante correlación de imágenes digitales.
- Estudiar la correlación de los resultados procedentes de los ensayos (medidas directas de los parámetros de interés), con los resultados procedentes de otros ensayos de menor complejidad, de tal forma que puedan ser implementados en el control de calidad del proceso de impresión.
- Seleccionar el modelo reológico del material en estado fresco más adecuado.
- Analizar los diferentes modelos mecánicos capaces de modelizar adecuadamente el comportamiento de los materiales cementicios en estado fresco.
- Análisis de resultados, calibración de modelos de comportamiento para materiales cementicios en estado fresco y redacción del trabajo fin de máster.

Por lo tanto, mediante el presente proyecto se pretende desarrollar un **protocolo de ensayo no normalizado** para la caracterización de la evolución con el tiempo de las propiedades reológicas y mecánicas del material en base cemento en estado fresco. Estas propiedades son necesarias para modelizar el comportamiento mecánico del material. Posteriormente, estas propiedades pueden ser utilizadas para la modelización del proceso de impresión 3D, mediante análisis por elementos finitos. Con todo esto se pretende evaluar la *imprimabilidad* de cualquier pieza frente al fallo plástico y al fallo por pandeo.

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA ESKOLA

ESCUELA
DE INGENIERÍA DE BILBAO

Capítulo 1

Fabricación aditiva de materiales en base cemento

En la actualidad se disponen de un amplio abanico de técnicas para el procesado de las diferentes clases materiales. Por ello es fundamental en el campo de la ingeniería de materiales establecer relaciones entre propiedades, estructura del material, método de procesamiento y aplicaciones [1]. En este contexto, existen numerosos métodos de fabricación en función de los medios técnicos utilizados en el proceso de manufactura. En concreto, se distinguen tres clases diferentes: la fabricación por conformado del material, la fabricación por mecanizado del material y la fabricación por adición del material. La tecnología de fabricación a la que nos referimos en el presente trabajo es esencialmente el uso de procesos aditivos, combinando materiales capa a capa. El término utilizado para describir esta tecnología es *Fabricación Aditiva* o Additive Manufacturing (AM). También se suelen utilizar otros términos como el de Generative Manufacturing, eManufacturing, Constructive Manufacturing (Alemania), Additive Layer Manufacturing-ALM (Escandinavia y EADS-Airbus Group), Direct Digital Manufacture-DDM o Solid Freeform Fabrication-SFF (Estados Unidos). Sin embargo, anterior al desarrollo de este concepto se disponían de otros términos como el de fabricación automatizada o el de prototipado rápido, que no describen de forma adecuada esta tecnología [2].



1. Introducción a la fabricación aditiva

Por lo tanto, la característica esencial de este proceso radica en que las piezas se fabrican añadiendo material por capas, las cuales constituyen una fina sección transversal de la pieza diseñada (CAD). Obviamente, cada capa debe tener un grosor finito, por lo que la pieza resultante será una aproximación de la pieza originalmente diseñada. Por lo tanto, cuanto más fina sea cada capa, más se acercará la pieza final al original. Todas las máquinas de fabricación aditiva comercializadas hasta la fecha están enfocadas hacia la fabricación de capas, diferenciándose en los materiales que se pueden utilizar, en la forma de crear las capas y en la forma de unir las entre sí. Estas diferencias determinan factores como la precisión de la pieza final y sus propiedades físicas, en especial las mecánicas. También determinan factores como la rapidez con la que se puede fabricar la pieza, el grado de posprocesamiento necesario, el tamaño de la máquina de AM y el coste global de la máquina y el proceso [3]. Por lo tanto, esta tecnología supone una revolución en el desarrollo y la fabricación de productos.

Una de las ventajas esenciales de esta tecnología es la capacidad de los procesos para fabricar formas geométricas complejas, o dicho de otra manera, proporcionar "*complejidad gratis*". Por ello esta tecnología se denominó también tecnología de fabricación de formas libres, haciendo énfasis en esta ventaja. La mayoría de los procesos de fabricación convencionales se vuelven mucho más complicados a medida que aumenta la complejidad geométrica. Otra de las ventajas de la fabricación aditiva reside en la celeridad de manufactura del proceso global; no solo incluyendo el tiempo de fabricación de la pieza, sino incluyendo también el proceso desde el diseño. Dado que se utiliza el diseño CAD como punto de partida, la automatización e informatización del proceso reducen notablemente el tiempo del proceso. Además, independientemente de la complejidad de las piezas, la fabricación se realiza generalmente en un solo paso, mientras que la mayoría de los demás procesos de fabricación requieren la realización de múltiples etapas. En los procesos convencionales de fabricación, a medida que se incluyen más características en un diseño, el número de estas etapas puede aumentar drásticamente. Por lo tanto, la AM puede considerarse una forma de predecir con mayor eficacia el tiempo de fabricación de los modelos, independientemente de los cambios aplicados durante esta fase formativa del desarrollo del producto [4].



La base de la tecnología AM comparte una serie de elementos comunes con la tecnología de mecanizado por control numérico (CNC). Por ello es importante establecer una diferencia entre ambas tecnologías de fabricación. Aunque el CNC también es una tecnología basada en diseño CAD, la diferencia sustancial respecto al AM radica en que es un proceso esencialmente sustractivo en lugar de aditivo, que requiere de un bloque de material que debe ser al menos tan grande como la pieza que se va a fabricar. Sin embargo, ambas tecnologías pueden ser utilizadas de forma complementaria en el proceso de fabricación [5].

Hasta ahora no hemos hecho referencia a la clase de material, sin embargo, como se ha comentado existe una estrecha interacción entre la clase de material y el proceso de fabricación. En general, en la fabricación aditiva se pueden utilizar tres tipos de materiales: polímeros, cerámica y metales. Aunque los polímeros, en particular los polímeros termoplásticos, son los más utilizados en este tipo de tecnología, rápidamente se está extendiendo a otros materiales.

Por ejemplo, la fabricación aditiva de metales está revolucionando el sector aeronáutico. También se aplica esta tecnología con resinas epoxi, cuyas propiedades de impresión son las que más se asemejan a la de los materiales de base cemento. En lo sucesivo, solamente consideraremos materiales de base cementicia, es decir, morteros y hormigones. En la figura 1.1 se muestra un diagrama esquemático del proceso de fabricación aditiva en materiales de base cementicia. Durante el proceso de impresión se deben controlar ciertos parámetros tales como la velocidad de impresión, el caudal del material de impresión, los tiempos de ciclo entre capas; y para ciertas aplicaciones, parámetros ambientales como la temperatura. El proceso de impresión comienza con la amasada con la que se alimenta la bomba de desplazamiento positivo. Como se observa en la figura 1.1, el material es bombeado de tal forma que es transportado mediante un sistema de conductos de goma desde la bomba hasta la boquilla del sistema de impresión. El proceso de extrusión que tiene lugar, junto con las propiedades del material en fresco, permiten la impresión de la pieza final. Dado que tanto la *bombeabilidad*, como la extrusión a través de la boquilla son dos procesos que están estrechamente relacionados con las propiedades del material, en las secciones siguientes desarrollaremos en mayor profundidad los aspectos técnicos de ambos procesos. Por lo tanto, otros parámetros de impresión, igualmente importantes, son el tamaño de la boquilla, la altura de la capa y las dimensiones del filamento [6].

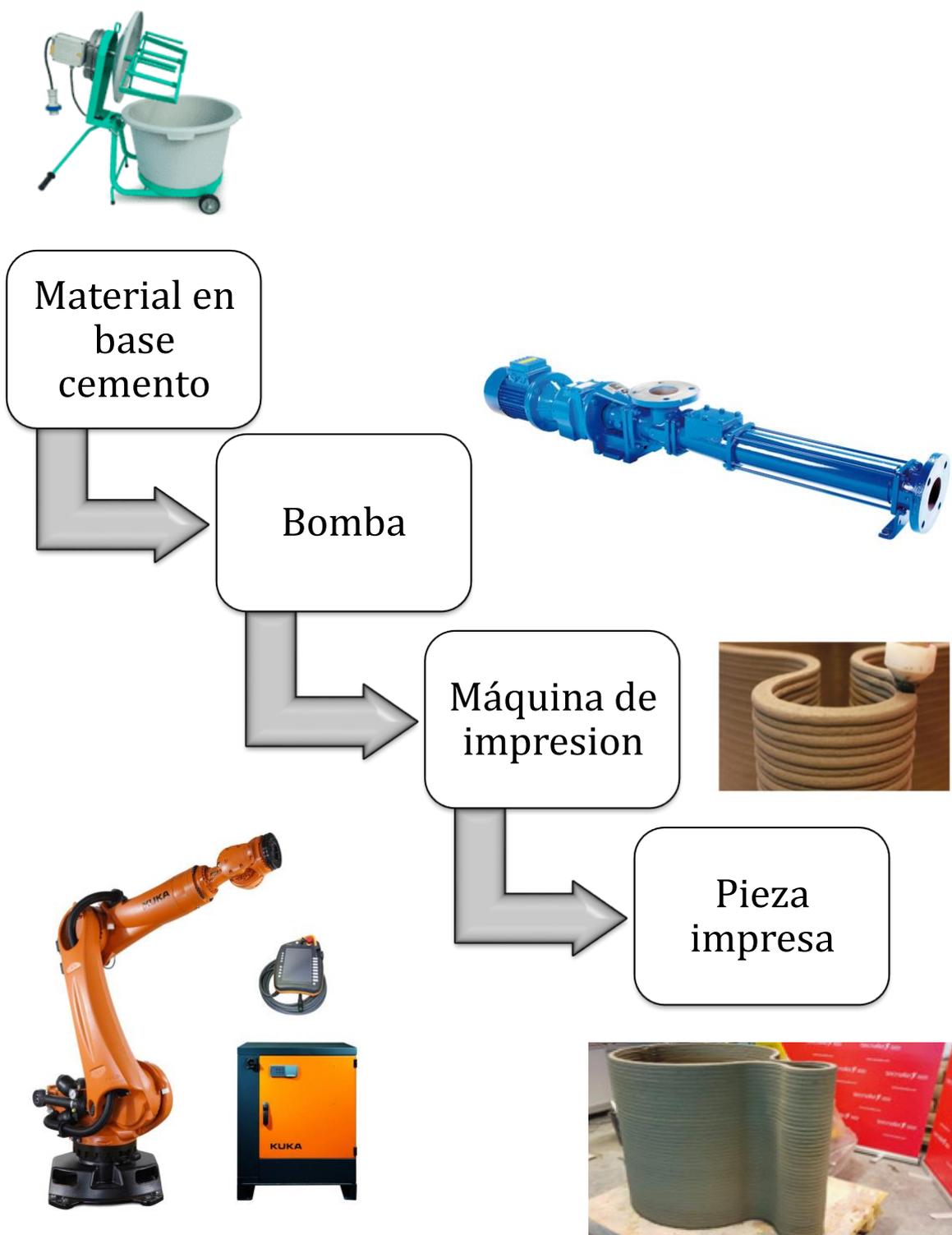


Figura 1.1. Diagrama esquemático del proceso de fabricación aditiva de materiales cementicios.

2. Reseña histórica

Desde el desarrollo del cemento Portland, patentado por Joseph Aspdin, en 1824, se ha experimentado un rápido desarrollo en los sistemas de construcción gracias a las prestaciones excepcionales de este material. A finales del siglo XIX, se produjo otro hito en la historia del cemento, se comenzaron a armar las estructuras, introduciendo elementos de acero dentro del hormigón, lo que permitió que las estructuras fuesen más esbeltas, pues el acero permitía que las piezas pudiesen trabajar con tensiones de tracción y en condiciones de flexión [7]. Este desarrollo fue seguido de una rápida expansión, siendo el método utilizado desde entonces para la fabricación de elementos constructivos. Los primeros estudios sobre Fabricación Aditiva basados en materiales de base cementicia, es decir, basados en materiales propios del campo de la construcción (áridos, cemento, pastas, mortero, hormigón) fueron llevados a cabo con el investigador Joseph Pegna, en 1997 [8]. En la figura 1.2 se muestra la cronología de los principales hitos de la fabricación aditiva de los materiales de base cemento.

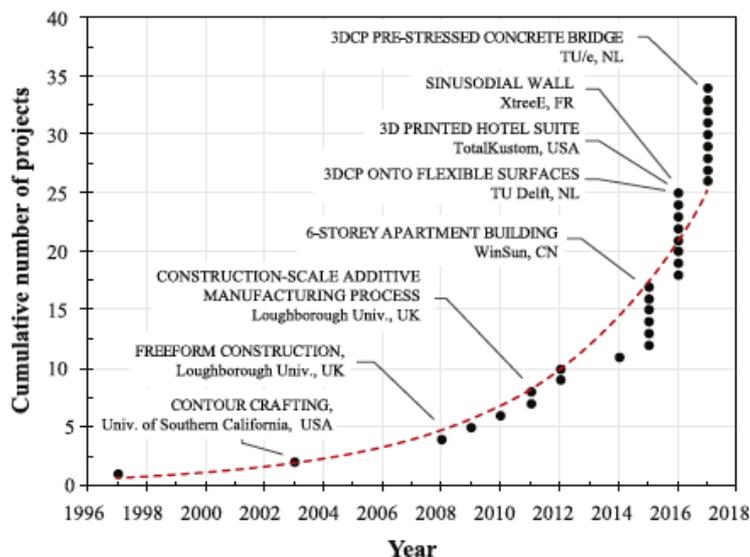


Figura 1.2. Evolución histórica de los proyectos de fabricación aditiva de materiales en base cemento de las últimas décadas [4].

El investigador, Joseph Pegna, propuso un método de fabricación aditiva basado en tecnologías de automatización para extruir hormigón capa a capa, permitiéndole construir una estructura de arquitectura tridimensional. La geometría por capas del producto se reproduce en una matriz de arena mediante la deposición selectiva de cemento Portland, que luego se activa con agua. De este modo, el modelo se imprime capa a capa y el exceso de

arena se limpia para terminar con un elemento hecho de mortero. Debido a la falta de fondos, el sistema de impresión previsto tuvo que ser sustituido por otro más largo, pero también más sencillo, que proporcionaba una velocidad de impresión lenta que pudo ser la causa de que este proyecto no tuviera tanto éxito como los siguientes. En 2003, Behrokh Khoshnevis [9] desarrolló por primera vez la tecnología del Contour Crafting (CC) utilizando materiales cementicios para construir a gran escala, objetos en 3D. En 2008, Richard Buswell [10] desarrolló un proceso de construcción de forma libre proceso que podría intentar construir cuerpos estructurales a escala real para la construcción por impresión 3D, como paneles y paredes de forma irregular, lo que proporciona una gran libertad de diseño. En el trabajo de forma libre, todos los objetos se crean como una serie de imágenes digitales bidimensionales a través de un software de CAD disponible en el mercado. Los filamentos continuos de hormigón se extruyen secuencialmente sobre filamentos de hormigón anteriores para construir la geometría deseada en 3D.

3. Tecnologías de fabricación aditiva de materiales de base cementicia

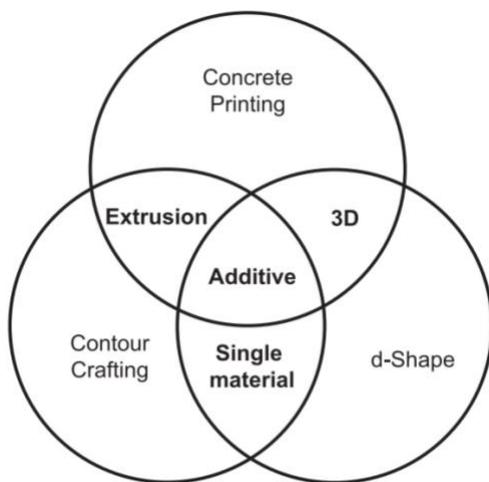


Figura 1.3. Métodos de fabricación aditiva de materiales de base cementicia [11].

En cuanto a los principales métodos de fabricación aditiva de materiales de base cementicia se distinguen, fundamentalmente, tres tecnologías desarrolladas por diferentes grupos de investigación, tanto académicos como industriales. En este sentido, se observan dos tendencias bien definidas en el desarrollo: las técnicas orientadas a la fabricación in-situ de estructuras completas y las técnicas on-site, que permiten la creación de elementos prefabricados off-site de alto valor añadido. Como se deduce de la figura 1.3,

los tres grupos principales tienen una serie de elementos en común entre ellos. El D-Shape funciona de forma similar a la impresión 3D tradicional, mientras que el Concrete Printing y el Contour Crafting podrían entenderse como una aproximación al modelado por extrusión de los materiales cementosos en fresco [11, 12].

Tabla 1.1. Resumen de las características de los métodos de fabricación aditiva de materiales cementicios [12].

<i>Características</i>	<i>J. Pegna</i>	<i>Contour crafting</i>	<i>D-Shape</i>	<i>Concrete Printing</i>
<i>Proceso</i>	Impresión 3D	Extrusión	Impresión 3D	Extrusión
<i>Uso de molde</i>	No	Si	No	No
<i>Dosificación</i>	Arena, cemento y láser	Material de base cemento	Mezcla seca y aglutinante	Material de base cemento
<i>Diámetro boquilla</i>	1 mm	15 mm	0.15 mm	9-20 mm
<i>Número de boquillas</i>	Sin boquilla	1	6000	1
<i>Grosor de la capa</i>	Variable	13 mm	4-6 mm	6-25 mm
<i>Refuerzo</i>	No	Si	No	Si
<i>Tamaño de impresión</i>	>1m	>1m	>1m	>1m
<i>Ventajas</i>	Sencillez	Superficies lisas	Alta resistencia	Alta resistencia
<i>Inconvenientes</i>	Mal acabado final	Dimensiones limitadas	Proceso lento	Dimensiones limitadas

Contour Crafting (CC). El sistema de *Contour Crafting* desarrollado en la Universidad del Sur de California (EE.UU.), fue introducido en 1998 por el ingeniero Behrokh Khosnevis [9]. La denominación *Contour Crafting* hace referencia a que el proceso de impresión se centra en el contorno del elemento, creando las superficies exteriores de la pieza para luego rellenar el volumen interior con el mismo material o un material más pobre. Esta tecnología se basa en la extrusión de una pasta cementante mediante una máquina de extrusión que incorpora dos paletas perpendiculares entre sí, permitiendo la acumulación de capas (figura 1.4) [13].



Figura 1.4. Sistema de impresión 3D de la Universidad Tecnológica de Eindhoven [13].

En la figura 1.5 se muestra la boquilla de extrusión diseñada por Khoshnevis basada en una boquilla con llanas en los laterales y en la parte superior. En esta técnica se puede regular la orientación de las paletas, las cuales actúan como superficies sólidas y planas, proporcionando superficies lisas de gran calidad. Sin embargo, el dispositivo de impresión es mucho más complejo que en las otras tecnologías de fabricación aditiva [14].

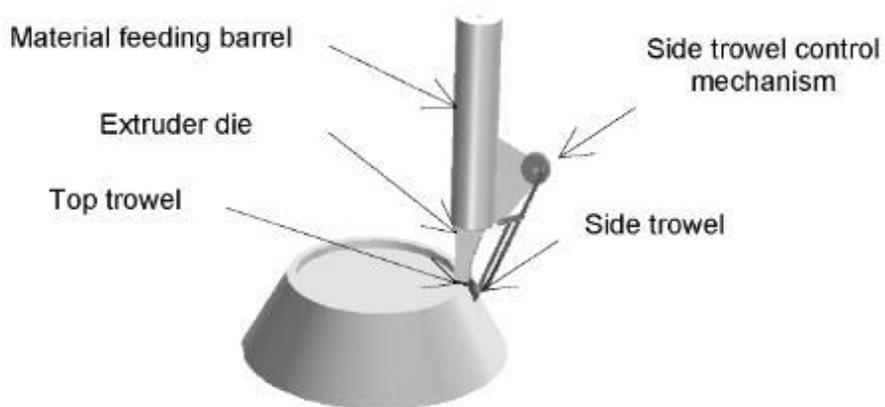


Figura 1.5. Dibujo de la boquilla utilizada en la tecnología de contour crafting [9].

En consecuencia, esta tecnología no requiere de grandes acabados, gracias a que las paletas localizadas permiten que la superficie quede perfectamente lisa. Esto permite incorporar al dispositivo de extrusión o impresión diferentes sistemas automatizados de acabado. Así, se obtiene el acabo deseado de la pieza impresa (figura 1.6).

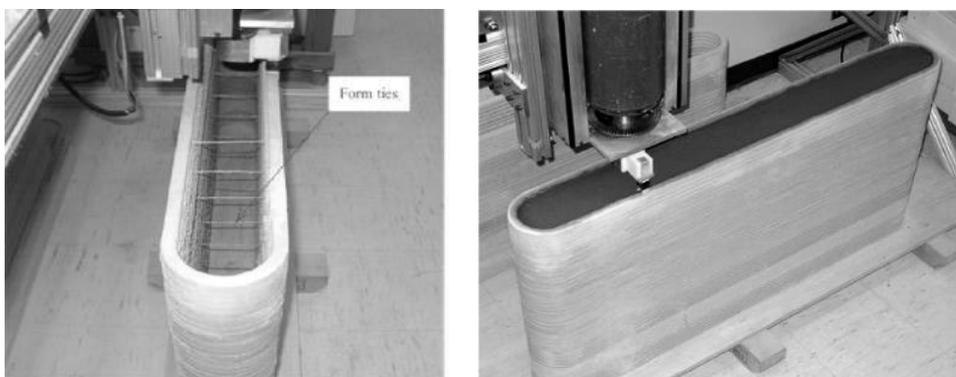


Figura 1.6. Imágenes del sistema utilizada en la tecnología de contour crafting [9].

D-Shape: El proceso d-Shape (o Monolite, www.d-shape.com) utiliza una mezcla de partículas de arena junto con un sistema de aglutinante por chorro. Esta técnica puede considerarse como una evolución del método desarrollado por Pegna. Aquí, la boquilla única presente en la impresora Pegna se sustituye por toda una barrera de boquillas, una a 20 mm de distancia de la otra. En el proceso de fabricación se distinguen dos fases, una primera fase en la que se deposita una capa de material en polvo (matriz granular de polvo de piedra mezclada con óxido metálico pulverizado) y una segunda fase en la que se deposita el aglutinante en las zonas de la capa donde sea necesario. De esta forma, la reacción entre ambos componentes permite ir creando la geometría monolítica de la pieza (figura 1.7) [15].

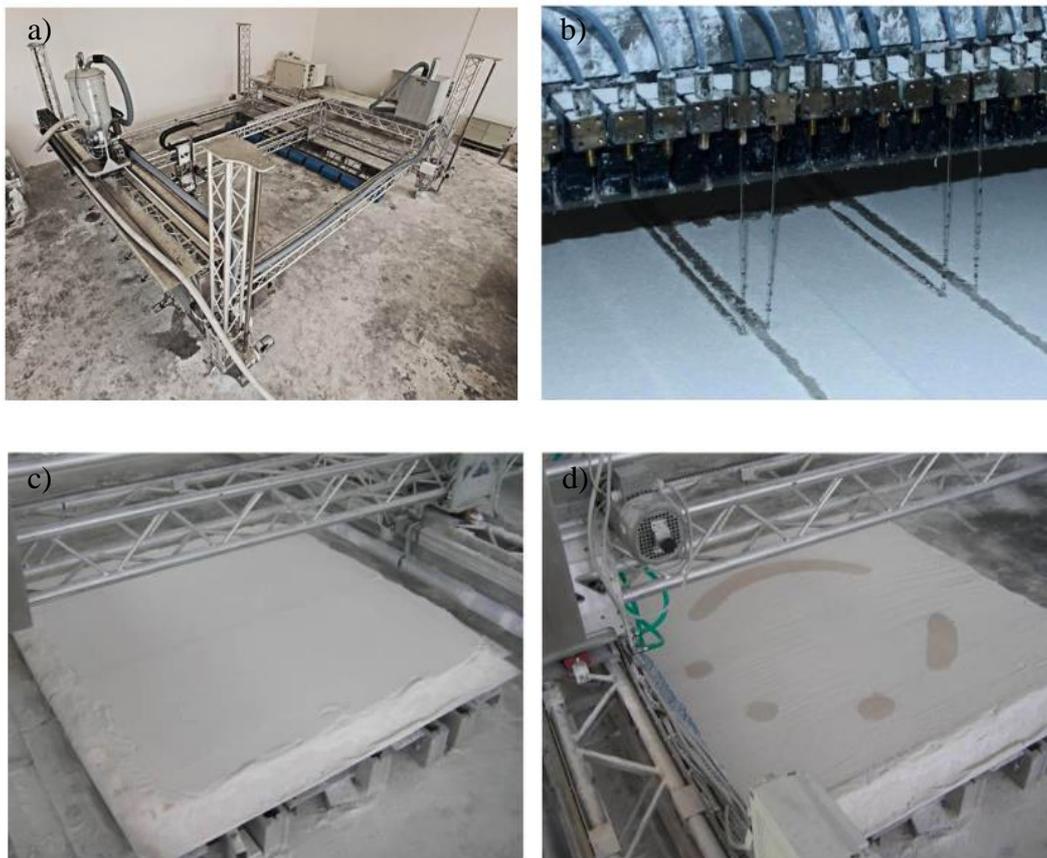


Figura 1.7. a) Esquipo de impresión mediante d-shape. b) Barrera de boquillas para la deposición del aglutinante. c) Material granular depositado sobre la cama de impresión. d) Deposición del aglutinante sobre el material granular en las zonas de impresión [15].

Esta técnica se ha utilizado para crear el primer puente impreso en 3D que realmente cumple los requisitos para su uso por los campesinos, en Alcobendas, España (figura 1.8). Este puente ha sido diseñado por el IAAC empleando los principios de la optimización de la topología para crear una estructura que parece crecer de forma natural [16].



Figura 1.8. Puente impreso por IAAC mediante la tecnología D-Shape (Alcobendas) [16].

Concrete Printing (CP). Esta técnica de impresión de hormigón en 3D fue desarrollada en la Universidad de Loughborough (Reino Unido). Se basa en la extrusión de mortero para fabricar piezas macizas. Esta técnica puede entenderse como una modificación del modelado por deposición fundida disponible para los termoplásticos. Como en el método de impresión de polímeros, una boquilla extruye el material de impresión en estado fluido capa a capa siguiendo la forma diseñada. La impresora empleada en este proyecto consiste en un sistema de bombeo de hormigón que extruye el material a un caudal conocido. Mediante un dispositivo CNC se obtiene la geometría diseñada (figura 1.9). La anchura de la boquilla de extrusión y el espesor de la capa (controlado a través del caudal) serán los factores en la calidad del producto final.



Figura 1.9. Piezas fabricadas mediante la tecnología de concrete printing [12].

4. Etapas del proceso de fabricación aditiva

El proceso general de fabricación aditiva implica una serie de etapas que van desde el diseño virtual CAD hasta a la obtención de la pieza física. Las líneas generales del proceso de fabricación aditiva son las mismas para los diferentes tipos de materiales, por lo que los pasos que exponemos aquí no son exclusivos de los materiales de base cementicia. Los principales pasos del proceso de fabricación aditiva son los siguientes [5,17]:

- **Diseño CAD y conversión a STL.** Esta primera etapa consiste en el diseño CAD mediante un software especializado (ej. Autodesk, SolidWorks, Catia, Rhinoceros) de la pieza que se quiere obtener. A continuación, el objeto se descompone mediante un mallado que permite obtener el fichero STL. Seguidamente, a partir del fichero STL se debe programar la trayectoria CNC mediante softwares, denominados slicer, que permiten obtener el correspondiente código-G.
- **Configuración de la máquina de impresión.** Al comienzo de esta etapa se debe cargar el fichero CNC en el controlador de la correspondiente máquina de impresión. Además, se deben configurar los correspondientes parámetros de impresión, ya sea manualmente o mediante el correspondiente sistema automatizado.
- **Proceso de fabricación.** Consiste en la fabricación del objeto impreso mediante la impresora 3D, es decir, la construcción de un objeto en un espacio a través del método de impresión seleccionado. En esta etapa es muy importante tener en cuenta parámetros como la precisión y el espesor de las capas. Además, se debe controlar la duración del proceso de impresión completa del elemento, que depende directamente del tamaño y de la altura de este.
- **Post-procesado.** Una vez retirada de la máquina, las piezas pueden requerir una limpieza adicional antes de que estén listas para su uso. Las piezas pueden ser débiles en esta etapa o pueden tener elementos de soporte que deben ser retirados. Por lo tanto, esto suele requerir una manipulación manual cuidadosa.



5. Material en fresco de base cementicia *imprimible*

Como ya se ha comentado, el proceso de impresión comienza con la preparación del material en fresco. Sin embargo, no todos los materiales de base cementicia son imprimibles, por ello el diseño de la mezcla es fundamental. Los temas relativos al diseño de la mezcla y dosificación se tratarán en el capítulo siguiente. De momento nos limitaremos a describir las características y propiedades que debe cumplir el material en fresco.

El proceso de impresión 3D de estas matrices inorgánicas es un proceso de fabricación complejo, que a efectos de reproducibilidad, requiere del control de las propiedades del material en fresco en una primera etapa y del material endurecido en una segunda etapa. Así mismo se deben controlar los parámetros de impresión y diseño de la pieza objeto. En general, el comportamiento de los materiales de base cementicia en fresco puede ser considerado desde el punto de vista reológico como viscoplástico. Esto implica que, al igual que los sólidos, no fluyen hasta que se supera un determinado esfuerzo de cizallamiento crítico. Y al igual que un líquido, fluyen cuando se someten a tensiones de cizallamiento superiores. Un estudio más detallado de las propiedades reológicas del material en fresco se expone en el capítulo 3. En conclusión, dependiendo de la etapa de procesamiento el material se comporta como un fluido o como un sólido. Durante los procesos de transporte y alimentación, el material fluye dentro del sistema de transporte y el cabezal de impresión, es decir, se debe comportar como un fluido. Por otro lado, después de la deposición el material tiene que permanecer estático. Además, hay que tener en cuenta que los materiales de base cementicia son heterogéneos, y por ello puede tener su comportamiento reológico bastante complejo [18, 19]

En primer lugar, se debe caracterizar el material cementicio con una formulación bien definida en estado fresco. Para que el proceso de extrusión sea un éxito, el material debe ser lo suficientemente fluido como para que pueda ser extruido a través de la boquilla. Pero una vez que la capa es extruida, debe tener suficiente resistencia al cizallamiento para resistir la deformación debida a su propio peso y al peso de las capas impresas por encima. Desde el punto de vista reológico, el material debe ser líquido con una baja viscosidad mientras se encuentre dentro de una baja viscosidad en el interior de la bomba y la boquilla. Pero una vez extruido debe presentar un comportamiento sólido con suficiente resistencia para soportar la deformación. A este fin, diferentes estudios [20] proponen ciertos parámetros

que pueden utilizarse para evaluar las propiedades en fresco del hormigón imprimible. Los principales parámetros que determinan la *imprimabilidad* del material en fresco:

- **Capacidad de bombeo (bombeabilidad).** La bomba debe permitir un transporte continuo hasta el cabezal de impresión. Por lo tanto, el material debe tener una viscosidad lo suficientemente baja para que pueda ser bombeado.
- **Extrudabilidad.** La extrudabilidad se define como la capacidad de extrusión continua a través de una boquilla de impresión con estabilidad dimensional suficiente y capacidad de formar capas con calidad de impresión óptima. Por calidad de impresión óptima, se entiende que los elementos extruidos no tienen defectos tales como huecos y discontinuidades. Sin embargo, en [21] se presenta una definición alternativa de extrudabilidad, definiéndola como "*la capacidad de un material para ser extruido con un consumo mínimo de energía*".
- **Edificabilidad (apilabilidad).** Se define como la deformación del material a medida que se añaden capas sucesivas. Durante el proceso de impresión pueden darse el fallo plástico y el fallo por pandeo.
- **Trabajabilidad.** Se relaciona con la estabilidad geométrica del material extruido bajo su peso y el peso de las capas superiores para un proceso de impresión ininterrumpido. Este parámetro se puede identificar con la docilidad del material.
- **Tiempo de trabajo (*open time*).** Se define como el tiempo durante el cual un material puede ser utilizado en el proceso de fabricación (bombeo y la extrusión).
- **Tiempo de ciclo de fraguado y de capa.** Se define como el tiempo necesario para el comienzo del fraguado y el tiempo para completar una capa.
- **Robustez del material en fresco.** Para las aplicaciones industriales, es importante obtener mezclas de material estables y robustas con una baja variabilidad de sus propiedades (desviación estándar del límite elástico).

En el proceso de fabricación aditiva de materiales de base cementicia los objetos pueden colapsar durante el proceso de fabricación. Teniendo en cuenta que la resistencia del

material es inicialmente baja en relación con su peso propio, la apilabilidad (edificabilidad) es una propiedad importante a la hora de evaluar su idoneidad para impresión. Esta propiedad no sólo depende de las características del material sino también del diseño del objeto, el tamaño, la geometría y los parámetros del proceso, como la velocidad de impresión. Durante el proceso de impresión pueden darse dos tipos principales de fallos (figura 1.10) [22,23]:

- **Fallo plástico.** Este tipo de fallo, el cual se manifiesta generalmente en las capas de material inferiores, se produce cuando los esfuerzos que actúan sobre el material sobrepasan su resistencia, resultando en una plastificación, es decir, en flujo o fractura. Esta primera capa debe soportar inicialmente su peso propio, y a lo largo del proceso de impresión, deberá soportar también el peso de las capas depositadas por encima. A su vez, la resistencia del material va incrementándose con el tiempo. Por lo tanto, este tipo de fallo sucederá cuando la evolución de la resistencia del material sea más lenta que la velocidad a la cual se incrementa la carga que debe soportar debido a la continua deposición de nuevas capas de material.
- **Fallo por pérdida de estabilidad (pandeo).** Este tipo de fallo se produce por una pérdida de equilibrio en las fuerzas y momentos. Se producen, entonces, deformaciones o desplazamientos incontrolados. El principal factor que afecta a este tipo de fallo es la evolución con el tiempo del módulo elástico del material en estado fresco, siendo la causa del fallo del proceso en la mayor parte de los casos. Por otro lado, la geometría o la esbeltez del componente a imprimir y la velocidad de impresión son aspectos que van a condicionar también este tipo de fallo.

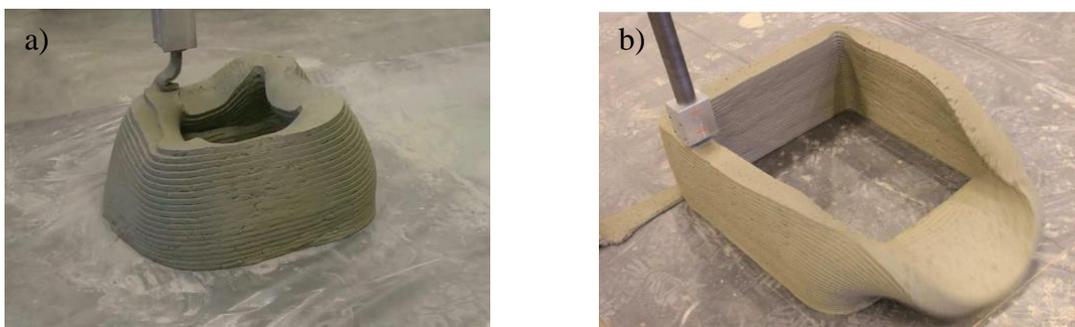


Figura 1.10. Fallo por plastificación (a) y fallo por pandeo (b) durante el proceso de impresión de un diseño cuadrado [23].

6. Modelo de extrusión

La fabricación aditiva de materiales de base cementicia requiere de la extrusión a través de una boquilla. El flujo de extrusión del material está compuesto por un flujo de elongación en la llamada zona de conformación y el flujo de tapón en el barril. La primera zona está controlada por el comportamiento reológico del material, mientras que la segunda está controlada por el comportamiento tribológico en la interfase con la boquilla de extrusión. En este contexto, los regímenes de extrusión del material se pueden dividir en tres categorías [24,25]:

- Extrusión de material rígido (similar a la extrusión convencional)
- Extrusión de material fluido con o sin adición de aditivos en el cabezal de impresión.
- Extrusión de material utilizando un aporte de energía adicional (por ejemplo, la vibración que facilita el suministro y la deposición de mezclas rígidas).

En la figura 1.11 se muestran los dos tipos asintóticos de regímenes de extrusión/deposición. El denominado *régimen de ladrillo infinito* donde la sección de filamento es la de la boquilla y no se ve afectada por el flujo o la gravedad y el denominado *régimen de flujo libre* donde el material no tiene historia de flujo y la sección del filamento resulta de una competencia entre la gravedad y el límite elástico.

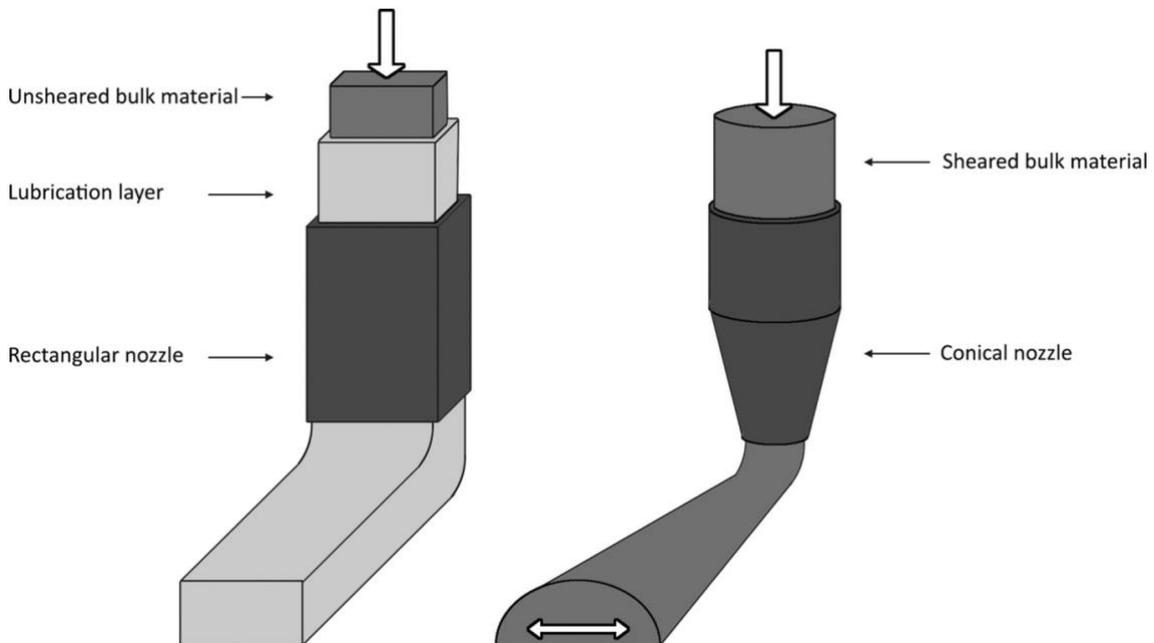


Figura 1.11. El régimen de ladrillo infinito (figura de la izquierda) y el llamado "régimen de flujo libre" (figura de la derecha) [25].



La mayor parte de los flujos de extrusión en los procesos de fabricación aditiva de materiales de base cementicia se sitúan en un punto intermedio entre los dos extremos marcados por los regímenes asintóticos. Aunque ambos casos pueden ser modelados matemáticamente, las predicciones de formas finales para materiales reales imprimibles no son adecuadas, debido a la diversidad de mecanismos y límites implicados. Estos mecanismos/límites incluyen el gradiente del flujo alimentación, la migración de partículas inducida por el cizallamiento, la acumulación estructural no uniforme, la geometría compleja de la boquilla, etc. En este contexto, se necesitan herramientas numéricas multifísicas adecuadas para describir el proceso de extrusión/deposición. Sin embargo, las fórmulas analíticas pueden proporcionar estimaciones razonables.

Tras la deposición del material, existe una competencia entre la fuerza de la gravedad y la tensión de fluencia. Esta competencia puede describirse mediante un número adimensional. Se expresa como la relación de la tensión inducida por la gravedad ρgh entre la tensión de fluencia del material τ_c , es decir, $\rho gh/\tau_c$, donde ρ es la densidad del material, g es la aceleración de la gravedad y h es la altura de la capa depositada. En la bibliografía se dispone de una amplia gama de tensiones de fluencia de los materiales cementicios [25].

En el caso de que la tensión de fluencia del material sea mayor que la tensión inducida por la gravedad, la capa de material cementicio no se deforma después de la deposición. Esta aproximación es aplicable cuando el material se coloca suavemente y con relativa lentitud. Si la fuerza gravitacional supera el límite de fluencia del material en el fondo de la capa, el material se deformará hasta alcanzar un equilibrio entre la tensión de fluencia y la tensión inducida por la gravedad. Como resultado, la capa que se deposita se deformará y se extenderá sobre la capa impresa primero. El caso límite de este tipo de comportamiento, para un valor bajo de límite elástico, tiende al caso de flujo de cizallamiento en una placa horizontal. En numerosas aplicaciones de impresión 3D, el comportamiento real de deformación del cordón se sitúa entre el régimen de flujo de cizallamiento puro y el régimen de ladrillo infinito. Por lo tanto, la forma final de la capa dependerá del límite elástico del material, de la sección de abertura de la boquilla y de la separación entre la boquilla y las capas impresas. En este contexto, el análisis numérico mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) puede ser útil para predecir este comportamiento [26].

Algunos métodos de deposición selectiva de material basados en la extrusión permiten que la boquilla presione el material extruido, forzando la capa a tener un grosor igual a la distancia entre la boquilla y la capa inferior. Esta estrategia tiene la ventaja de eliminar la incertidumbre en la altura final de las estructuras impresas, ya que la altura dependerá únicamente de la trayectoria de la boquilla. Sin embargo, la interacción directa de la boquilla y el material depositado induce una presión adicional en las capas subyacentes que puede contribuir a la formación de grietas o incluso al colapso del elemento impreso.

7. Modelo de bombeo

Durante el bombeo, el material pasa a través de un tubo con la ayuda de bombas de pistón y bombas de desplazamiento positivo o bombas de cavidad progresiva, siendo esta última el medio más implementado hasta ahora en la fabricación de aditivos por extrusión (figura 1.12). Este tipo de bombas constan esencialmente de tres componentes: rotor, estator y cadena de transmisión. Estas bombas se basan en un rotor helicoidal que gira dentro de un estator. A medida que el rotor gira dentro de la bomba, se desplazan las cavidades donde se encuentra el fluido. Las cavidades, de forma constante, mueven el fluido a través de la bomba, a medida que el rotor gira.

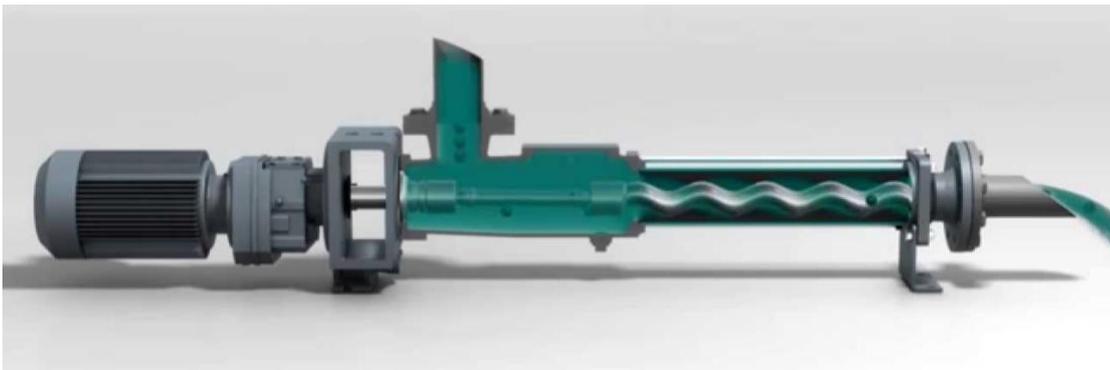


Figura 1.12. Esquema de una bomba de cavidad progresiva [27].

Dado su diseño, tiene tolerancias muy ajustadas entre el rotor y el cuerpo, por lo que algunos fluidos abrasivos, como pastas de morteros, pueden acortar la vida útil de la bomba. Alternativamente, una bomba de cavidad progresiva tiene una larga vida útil cuando se usan con fluidos viscosos [27]. Durante el proceso de impresión es conveniente purgar la bomba previamente con pasta de cemento. Esto se debe a que este fluido actúa como un lubricante para las partes internas de la bomba.

La capacidad de bombeo del hormigón se caracteriza por pérdidas de presión que dependen principalmente de la viscosidad plástica. Sin embargo, el límite de fluencia aumenta con el incremento de τ_0/μ [26]. Los cálculos utilizando la ecuación de Buckingham-Reiner para el flujo laminar de un fluido Bingham a través de una tubería sobrestiman la presión de bombeo para un caudal dado hasta 5 veces. Esto es consecuencia de la formación de una capa lubricante en las paredes interiores de la tubería debido a la migración de partículas inducida por el cizallamiento. La tensión de fluencia y la viscosidad plástica de la capa lubricante son, por lo general, un quinto y un decimoquinto de los valores correspondientes del material a granel, respectivamente [27].

Los parámetros reológicos óptimos para el bombeo del material compiten con los parámetros favorables para el comportamiento de la deformación después de la deposición de la capa. En general, los materiales de base cementicia tienen un alto límite de fluencia para superar las fuerzas gravitacionales y otras fuerzas que actúan después de la deposición del material. La metodología en la caracterización de las propiedades reológicas para el bombeo del material, las propiedades de la capa lubricante, y la predicción de presiones de bombeo es un aspecto complejo. El proceso de bombeo puede alterar la reología del hormigón debido a la dispersión de las partículas de cemento a mayor velocidad de cizallamiento, a la activación del superplastificante residual o al aire inducido por los pistones [28]

8. Propiedades del material endurecido en fabricación aditiva

Aunque el objetivo del presente trabajo se centra en las propiedades del material en fresco, el control del proceso de manufactura mediante fabricación aditiva también requiere del control de las propiedades del material endurecido. El material impreso puede ser tan resistente como el material encofrado mediante molde, con una densidad mayor. Sin embargo, todavía no se ha conseguido reproducir las propiedades del material encofrado. Además, la creación de objetos sólidos a partir de cordones extruidos predispone a los objetos impresos a la anisotropía, lo cual influye en el rendimiento del uso final. Por lo tanto, los aspectos de control de calidad de la pieza impresa endurecida son los siguientes [4]:



- **Adhesión entre capas.** La problemática se basa en la creación de juntas frías entre capas cuando el tiempo de ciclo es demasiado grande, aunque también efectos como el tamaño de las partículas de arena afectan a la adhesión entre capas. Las juntas frías pueden ser temporales dado que la adhesión entre capas aumenta a medida que avanza la hidratación del cemento. El tiempo de ciclo de la capa depende de la geometría de impresión y de los parámetros del proceso. Por lo que es probable que se requiera de la iteración/optimización y la simulación del proceso de fabricación durante el diseño del componente para garantizar la correcta adhesión [30].
- **Densidad aparente y el sub-rellenado.** Para un buen acabado de la pieza impresa, su densidad tiene que ser tan buena como la obtenida por los métodos tradicionales de fabricación. Un llenado insuficiente puede crear huecos en las piezas impresas. La presencia de estos defectos depende del diseño de la mezcla y de la estabilidad de las propiedades reológicas durante la impresión, ya que esto afecta al cordón cuando es extruido. Por otro lado, la deformación del material impreso es fundamental en el empuje del material hacia estos huecos para minimizar su aparición.
- **Contracción y durabilidad.** Alternativamente a los procesos tradicionales de fabricación la impresión permite eliminar una barrera entre el hormigón que se está curando y el entorno. Las piezas impresas suelen tener una mayor superficie expuesta, que junto con la baja proporción de agua/cemento, aumenta la probabilidad de agrietamiento por retracción. Por lo tanto, el diseño de la mezcla para evitar este fenómeno es fundamental.
- **Propiedades mecánicas del material endurecido.** El proceso de impresión de materiales de base cemento da lugar a piezas con un alto grado de anisotropía en sus propiedades mecánicas. Además, en algunos procesos de impresión es posible ajustar la orientación del componente impreso. Esto se convierte en una de las variables del proceso de fabricación que puede influir en el diseño y por tanto en los aspectos estructurales del componente. En general, las propiedades mecánicas son mejores en la dirección de desplazamiento de la boquilla [31].



Otro de los aspectos fundamentales de las piezas impresas es su geometría, ya que el valor añadido del proceso de fabricación está intrínsecamente relacionado con la libertad de geometría de la pieza. Sin embargo, a su vez el proceso de fabricación impone ciertas restricciones a las geometrías. La resolución de impresión está limitada por el comportamiento reológico del material, las dimensiones de la boquilla de extrusión y evidentemente por la geometría de la pieza. El movimiento del cabezal de impresión y el flujo continuo de hormigón controlan la geometría de la pieza impresa. Las dimensiones de la sección de este filamento dependen de una serie de parámetros, como la velocidad del flujo de hormigón y la velocidad del cabezal de impresión, la sección de la boquilla, las características de asentamiento y fraguado del hormigón y la inclinación de la superficie de impresión. Otro de los aspectos sensibles es el diseño de piezas rellenas, dado que los patrones de relleno desarrollados para la fabricación aditiva convencional no suelen ser apropiados para materiales de base cementicia dado que no tienen en cuenta las limitaciones del proceso. Finalmente, al igual que los procesos de fabricación aditiva de otro tipo de materiales se requiere de la impresión de elementos voladizos o incluso la creación de huecos dentro de la geometría sólida. Estos se pueden conseguir de dos maneras. Por un lado, mediante la impresión con el mismo material y diferentes parámetros de impresión de soportes o con otro material. Y de forma alternativa se pueden añadir un soporte externo sobre el que imprimir los elementos voladizos [32].

9. Principales aplicaciones

La figura 1.13 ilustra el problema central de la selección de materiales en el diseño mecánico, el cual se basa en la interacción entre función, material, proceso y forma. Prácticamente, no hay alternativas al hormigón armado en la construcción de estructuras, y esto se debe a su capacidad para cumplir las funciones requeridas (soportar una carga estructural y ser duradero). Otra de las ventajas del hormigón armado radica en la relativa facilidad de procesamiento (mezcla y colocación en moldes), unido a los bajos costes económicos de los grandes volúmenes de material que exige el sector de la construcción.

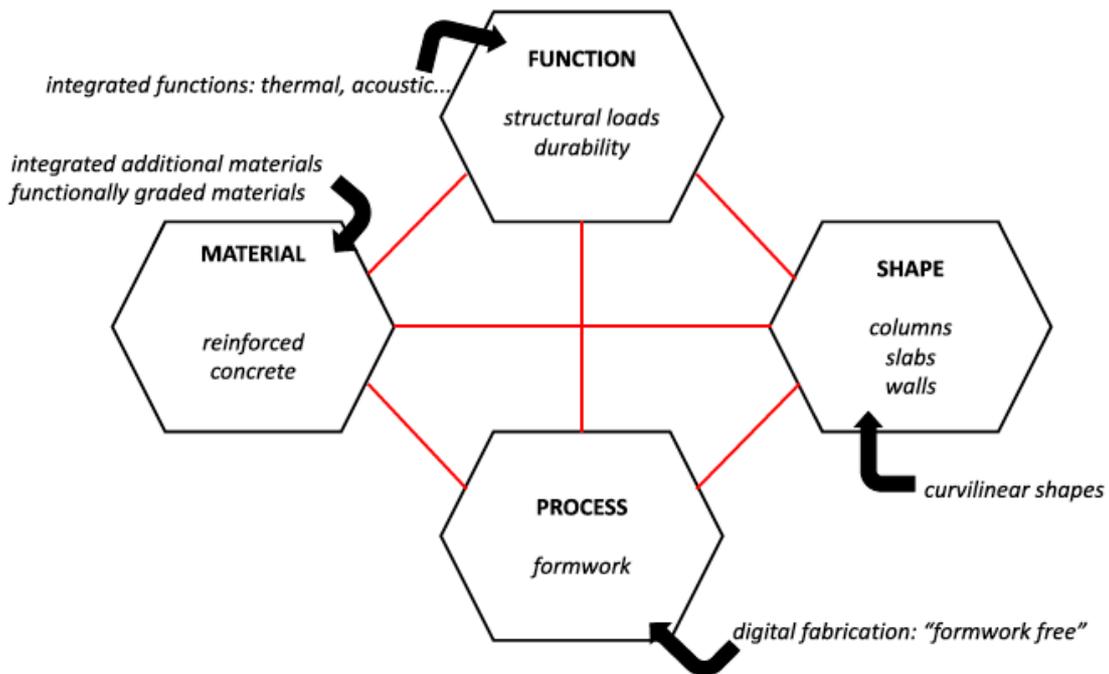


Figura 1.13. Problema general de selección de materiales [33].

Los ingenieros son capaces de diseñar formas más eficientes desde el punto de vista del material gracias a herramientas de diseño CAD. Sin embargo, su realización se ha visto limitada principalmente por los mayores costes del proceso de encofrado, es decir, el proceso de fabricación ha tenido un efecto restrictivo en la libertad de geometrías [33]. La ubicuidad de los muros, pilares y otros elementos de construcción es una consecuencia de la eficacia del proceso de fabricación basado en encofrado, dada la facilidad que ofrece este sistema de fabricación. Por ello, los procesos de fabricación digital deben superar estas limitaciones de geometrías, al permitir la construcción sin el uso de encofrados tradicionales. La figura 1.14 ilustra cómo la fabricación digital y la fabricación aditiva hacen posible superar estas limitaciones. Normalmente, en la fabricación, el coste unitario de un componente aumenta considerablemente a medida que aumenta su complejidad. Esto es cierto en la construcción convencional, donde una geometría compleja es difícil de producir económicamente con el uso de encofrados de un solo uso. La curva complejidad-coste de un proceso de fabricación aditiva, sin embargo, es mucho más plana.

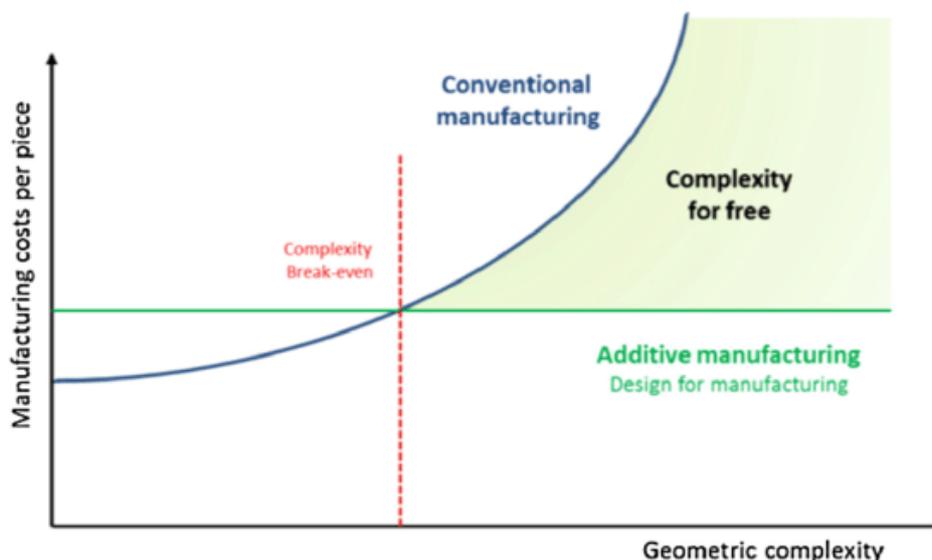


Figura 1.14. Representación gráfica del coste de producción de una pieza frente a la complejidad geométrica de la pieza [34].

Por lo tanto, esta tecnología hace que el coste de un componente personalizado sea más bajo que el de uno producido por métodos tradicionales. El punto en el que las curvas complejidad-coste de la construcción convencional y de la fabricación aditiva se cortan, es el punto donde la fabricación aditiva alcanza el equilibrio y llega a ser competitiva con los métodos convencionales. La continua investigación y el desarrollo impulsarán esta tecnología de fabricación, desplazando el punto de equilibrio hacia la izquierda, y haciendo que los componentes menos complejos sean más económicos de producir con la fabricación aditiva. Además, se espera que el volumen de mercado y la demanda de mercado, para la construcción de geometrías complejas, aumente a medida que las tecnologías para producirlas sean más económicas [34].

Aunque la construcción *in situ* es una perspectiva viable, parece ser más evidente que la prefabricación es el nicho de mercado donde la mayoría de las tecnologías de fabricación digital tienen actualmente el mayor potencial. Además, la tecnología de fabricación aditiva de estos materiales requiere de un entorno controlado para limitar el impacto de la humedad y la sensibilidad a la temperatura de los aditivos. Los elementos que se fabrican actualmente pueden alcanzar escalas estructurales, pero no estructuras enteras. Por lo tanto, la prefabricación mediante fabricación aditiva permite una mayor flexibilidad en el proceso de construcción al ampliar las opciones de diseño y planificación del proceso de montaje [35].

A continuación, profundizaremos en el estado del arte relativo al campo de aplicación de la tecnología de impresión 3D en el sector de la construcción [36]. Las aplicaciones se pueden clasificar en (figura 1.15):

- componentes independientes (a) o para su ensamblaje (b y c).
- paredes y columnas impresas in situ (d).
- encofrados permanentes en los que el encofrado se imprime y el elemento estructural se funde de forma convencional (e y f) [37].

En cuanto a la orientación, la fabricación es fundamentalmente vertical (Figura 1.15. b, c, d y f) y horizontal (Figura 1.15 a y e). Para ciertas aplicaciones se requiere de la impresión de elementos voladizos, que puede ser llevada a cabo mediante la impresión de un material extraíble que permite crear un soporte durante la impresión. También se pueden crear columnas en las impresiones verticales, como en la construcción de la figura 1.15 d. Por otro lado, en lo referente al volumen, los componentes pueden ser planos (Figura 1.15 b, c, d, e, f) o volumétricos (Figura 1.15 a).

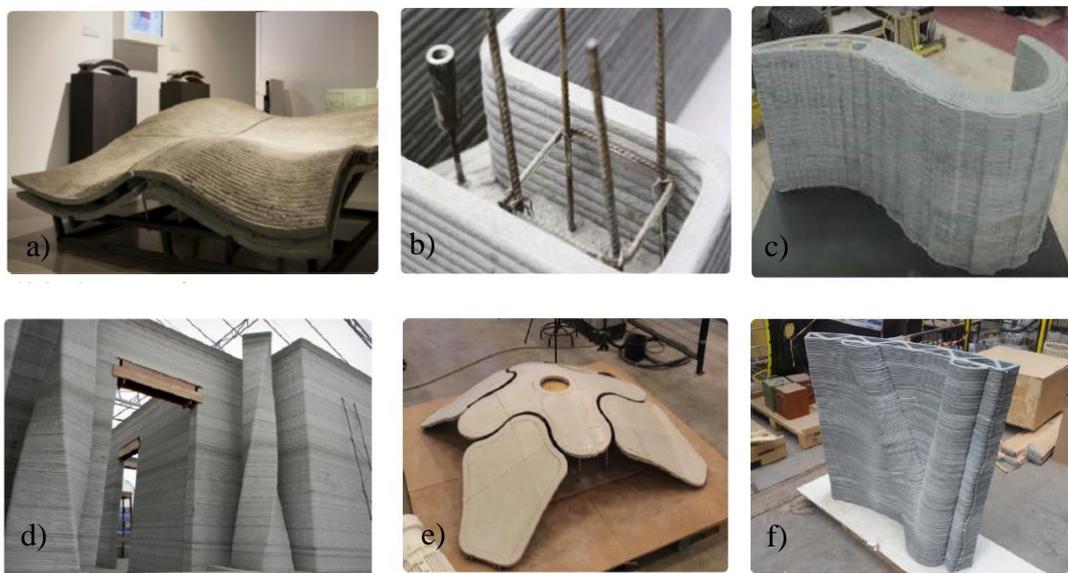


Figura 1.15. a) Fabricación de componentes horizontales (Universidad de Loughborough, Reino Unido), b) Elemento estructural. Fuente: <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>, c) Componente impreso verticalmente (Universidad de Loughborough, Reino Unido), d) paredes y columnas impresas verticalmente in situ (EE.UU.), e) panel, impreso horizontalmente en forma de cáscara (TU Delft y TU Eindhoven, Países Bajos), f) componente de panel impreso verticalmente (XTreeE, Francia) [4,37].

Referencias

- [1] R. Maskuriy, A. Selamat, P. Maresova, O. Krejcar, O. Olalekan David, *Industry 4.0 for the Construction Industry: Review of Management Perspective*, MDPI Economies, 7(3), 68, 2019.
- [2] P. Wu, J. Wang, and X. Wang, *A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry*, Autom. Constr., vol. 68, 21–31, 2016.
- [3] Di Carlo, T. *Experimental and numerical techniques to characterize structural properties of fresh concrete relevant to contour crafting*. Ph.D. thesis, University of Southern California, 2012.
- [4] R. A. Buswell, W. R. Leal da Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger, *3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research*, Cem. Concr. Res., vol. 112, pp. 37–49, 2018.
- [5] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, 2021.
- [6] V. Esnault, A. Labyad, M. Chantín, F. Toussaint, *Experience in Online Modification of Rheology and Strength Acquisition of 3D Printable Mortars*, Digital Concrete, 24-38, 2018.
- [7] I. Marcos, J. T. San-José, A. Santamaría, L. Garmendia, *Early Concrete Structures: Patented Systems and Construction Features*, Int. J. Archit. Herit., 12(3), 310-319, 2018.
- [8] J. Pegna, *Exploratory investigation of solid freeform construction*, Autom. Constr., volume 5, 427–437, 1997.
- [9] B. Khoshnevis, D. Hwang, K.-T. Yao, and Z. Yah, *Mega-scale fabrication by contour crafting*, Int. J. Ind. Syst. Eng., vol. 1, no. 3, pp. 301–320, 2006.
- [10] S. Lim et al., *Fabricating Construction Components Using Layered Manufacturing Technology*, Glob. Innov. Constr. Conf. 2009, 512–520, 2009.
- [11] R. A. Buswell et al., *A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete*, Cement and Concrete Research, 134, 2020.
- [12] S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb, and T. Thorpe, *Developments in construction-scale additive manufacturing processes*, Autom. Constr., vol. 21, 262–268, 2012.
- [13] C. C. M. Doomen, *The effect of layered manufacturing on the strength properties of printable concrete*, Eindhoven University of Technology, 2016.
- [14] B. Khoshnevis, J. Zhang, *Extraterrestrial Construction Using Contour Crafting*, Solid Free. Fabr., 250–259, 2012.
- [15] G. Cesaretti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla, L. Pambaguian, *Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology*, Acta Astronaut., 93, 430–450, 2014.
- [16] 3Ders, *Spain unveils world's first 3D printed pedestrian bridge made of concrete*. Recuperado de <http://www.3ders.org/articles/20161214-spain-unveils-worlds-first-3d-printed-pedestrian-bridge-made-of-concrete.html>, 2022.
- [17] C. Contu, *3D-Shape y Contour Crafting. Las técnicas de automatización aplicadas a la construcción arquitectónica: El Rapid Building*, Tesis Doctoral, UPV.
- [18] Y. Zhang, Y. Zhang, W. She, L. Yang, G. Liu, Y. Yang, *Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete*, Construction and Building Materials, Volume 201, 278-285, 2019.
- [19] L. Reiter, T. Wangler, N. Roussel, R. J. Flatt, *The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete*, Cem. Concr. Res., vol. 112, 86–95, 2018.
- [20] A.V. Rahul, M. Santhanam, H. Meena, Z. Ghani, *3D printable concrete: Mixture design and test methods*, Cement and Concrete Composites, Volume 97, 13-23, 2019.

- [21] V. N. Nerellaa, M. Nätherb, A. Iqbala, M. Butlera, V. Mechtcherinea, *Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction*, Cement and Concrete Composites 95, 260–270, 2019.
- [22] V. Mechtcherine, K. Khayat, E. Secrieru, Chapter: Additive Manufacturing and 3D-Printing, *Rheology and Processing of Construction Materials*, Springer, 2019.
- [23] A. S. J. Suiker, R. J. M. Wolfs, S. M. Lucas, T. A. M. Salet, *Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing*, Cement and Concrete Research, Volume 135, 2020.
- [24] A. Perrot, D. Rangerad, V. N. Nerella, V. Mechtcherine, *Extrusion of cement based materials*, RILEM technical letter, 3, 91-97, 2018.
- [25] N. Roussel, J. Spangenberg, J. Wallevikc, R. Wolfsd, *Numerical simulations of concrete processing: From standard formative casting to additive manufacturing*, Cement and Concrete Research Volume 135, 2020.
- [26] V. Mechtcherine, *et al.*, *Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review*, Cement and Concrete Research Volume 132, 2020.
- [27] Bomba Netzsch. Recuperado de <https://mortonpumps.com/netzsch/>, 2022.
- [28] V. N. Nerella, Development and characterisation of cement-based materials for extrusion-based 3D-printing, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2020.
- [29] A. Das, Y. Song, S. Mantellato, T. Wangler, R. J. Flatt, D. A. Lange, *Influence of Pumping/Extrusion on the Air-Void System of 3D Printed Concrete*, RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, 417–427, 2020.
- [30] G. J. Slager, *Influence of the interface between layers on the tensile properties of 3D printed concrete*, Eindhoven University of Technology, 2017.
- [31] P. Feng, X. Meng, J. F. Chen, L. Ye, *Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders*, Constr. Build. Mater., vol. 93, 486–497, 2015.
- [32] Y. W. D. Tay, M. Y. Li, M. J. Tan, *Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures*, Journal of Materials Processing Tech, 271, 261–270, 2019.
- [33] T. Wangler, N. Roussel, F. P. Bos, T. A.M. Salet, R. J. Flatt, Digital Concrete: A Review, Cement and Concrete Research, Volume 123, 2019.
- [34] A. Kirchheim, H. Dennig, L. Zumofen, *Why Education and Training in the Field of Additive Manufacturing is a Necessity*, Zurich University of Applied Science, 2018.
- [35] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet, *Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing*, Virtual Phys. Prototyp, Volume 11, 209–225, 2016.
- [36] C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudilli re, J. Dirrenberger, P. Morel, *Largescale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders*, Mater. Des. Volume 100, 102–109, 2016.
- [37] C. Borg Costanzi, Z. Y. Ahmed, H. R. Schipper, F. P. Bos, U. Knaack, R. J. M. Wolfs, *3D Printing Concrete on temporary surfaces: The design and fabrication of a concrete shell structure*, Autom. Constr., vol. 94, 395–404, 2018.

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA ESKOLA

ESCUELA
DE INGENIERÍA DE BILBAO

Capítulo 2

Diseño de materiales de base cementicia para fabricación aditiva

Uno de los aspectos fundamentales de la impresión de materiales cementicios en 3D es el diseño de la mezcla relativa al correspondiente mortero u hormigón imprimible. No todas las dosificaciones proporcionan un material imprimible, como hemos visto en el capítulo anterior. Por lo tanto, llegados a este punto resulta interesante comenzar este capítulo con una introducción técnica acerca de las características generales de los morteros y hormigones. En el sector de la fabricación aditiva existen multitud de dosificaciones que pueden emplearse para el desarrollo de esta técnica. De forma general, las características comunes son las siguientes [1]:

- Utilización de bajas relaciones agua/cemento.
- Incorporación de diferentes aditivos (super-plastificantes, aditivos aceleradores de fraguado).
- La bombeabilidad o facilidad con la que el material es desplazado a través del sistema de impresión, sin producir obstrucciones que impidan la correcta deposición del material.
- La *imprimabilidad* o facilidad de deposición del material sobre la capa anterior extrusionada, mediante el dispositivo de extrusión o boquilla utilizado.
- La edificabilidad o resistencia del material depositado a deformarse bajo carga. La resistencia de una capa bajo la fuerza de cada una de las capas extruidas a medida que se van depositando.

- El tiempo abierto, es decir el periodo de tiempo en el que las propiedades de imprimabilidad del material permanecen dentro de las tolerancias consideradas como aceptables.

Por todo ello, durante el proceso de impresión es fundamental controlar los tiempos de fraguado de las mezclas, las resistencias iniciales, así como el límite de fluencia y la viscosidad del material. De esta manera, se consigue evitar problemas en el dispositivo de impresión empleado. Asimismo, se debe controlar que la resistencia del material aumente conforme se va imprimiendo la pieza, garantizando la resistencia de cada capa y la capacidad para soportar la inmediata carga colocada.

1. Conceptos esenciales

A continuación, consideraremos una serie de términos fundamentales en el estudio de los materiales de base cementicia y que aparecerán de forma recurrente a lo largo del presente trabajo [2,3]:

- **Cemento (cement).** Material mineral finamente molido que después de haber sido mezclado con agua forma una pasta que fragua y endurece por reacciones de hidratación, y que, después de endurecer, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.
- **Árido (aggregate).** Material mineral granular adecuado para su uso en hormigón. Su carácter pétreo no debe ser reactivo con los productos de las reacciones de hidratación del cemento (naturaleza inerte). Los áridos pueden ser naturales, artificiales o reciclados a partir de materiales previamente utilizados en construcción. Se diferencia entre árido fino ($\emptyset < 4$ mm) y árido grueso ($\emptyset > 4$ mm).
- **Aditivo (admixture).** Material añadido al hormigón durante el proceso de amasado en pequeñas cantidades en relación con la masa de cemento, para modificar las propiedades del hormigón fresco o endurecido.
- **Adición (addition).** Material mineral finamente dividido utilizado en el cemento, durante la fase de fabricación, con el fin de mejorar ciertas propiedades. Dentro de esta categoría encontramos el humo de sílice y el filler calizo.

- **Mortero (Mortar).** Material constituido por la mezcla de cemento, árido fino y agua, con o sin la incorporación de aditivos y adiciones, que desarrolla sus propiedades por hidratación del cemento.
- **Hormigón (Concrete).** Material constituido por la mezcla de cemento, árido grueso, árido fino y agua, con o sin la incorporación de aditivos y adiciones, que desarrolla sus propiedades por hidratación del cemento.
- **Geopolímero.** Polímero inorgánico que se forma cuando los minerales de Al_2O_3 y SiO_2 disueltos se someten a la polimerización para formar una red tridimensional (3D) de aluminosilicatos amorfos con una resistencia similar o superior a la del hormigón [4].

En este punto es importante comentar que una gran parte de la bibliografía y empresas dedicadas a la fabricación aditiva de materiales en base cemento utilizan el concepto de hormigón para definir el material de impresión. Sin embargo, en muchos casos se trata de mortero y, en algunos casos, se puede recurrir al concepto de micro hormigones, pero sin llegar **al límite de los 5 mm de diámetro** de árido para considerarlo árido grueso y por lo tanto tratarse de hormigón [5].

2. Introducción a los cementos

Dado que el cemento es el componente fundamental de los materiales con los que vamos a trabajar en el presente trabajo, en esta sección se describen brevemente. En España, los cementos están regulados por la Instrucción de Recepción de Cementos (RC-08) [6]. Los componentes del cemento son los siguientes:

- **Clínker Pórtland:** son productos que se obtienen como resultado de calcinar hasta la fusión parcial mezclas de calizas y arcillas.
- **Clínker aluminosos:** se obtienen por la fusión de calizas y bauxitas con un contenido de alúmina inferior al 36%.
- **Escorias siderúrgicas:** proceden de procesos siderúrgicos obtenidos por templado o enfriamiento brusco, según la vía del horno alto (siderurgia integral) para el caso del acero.

- **Puzolanas naturales:** son rocas tobáceas, volcánicas vítreas, de naturaleza alcalina o pumítica. Contienen sílice y alúmina capaz de fijar cal en presencia de agua formando compuestos de propiedades hidráulicas.
- **Cenizas volantes:** son los residuos de la combustión de los polvos que acompañan los gases en las centrales termoeléctricas. En proceso de desaparición en España ante el cierre paulatino de las térmicas de carbón y, por lo tanto, también este co-producto del hormigón.
- **Humos de sílice:** es un subproducto de la obtención de silico y de ferrosilicato. Mediante la reducción de cuarzo puro y carbón se genera un humo de micropartículas de sílice.
- **Filleres calizos:** compuestos de carbonato cálcico, que junto con el clínker Pórtland, mejora las propiedades y comportamiento de los morteros y hormigones, tanto en estado fresco como endurecido. Permiten mejorar la dispersión, la hidratación, la trabajabilidad, la retención de agua, la capilaridad y la menor retracción.
- **Reguladores de fraguado:** son de naturaleza muy diversa permitiendo un control adecuado del fraguado. El más usado es el sulfato de calcio.
- **Adiciones de cemento:** su dosificación es inferior al uno por ciento y su función es modificar el comportamiento del cemento.

La Tabla A1.1.1 de la RC-08, que se muestra en la figura 2.1, define los principales tipos de cementos en función de su composición.

- **CEM I:** cementos Pórtland con un contenido de clínker Pórtland entre el 95% y el 100%
- **CEM II:** cemento Pórtland con escorias o con humo de sílice puzolana.
- **CEM III:** Cementos con escorias de horno alto.
- **CEM IV:** Cementos puzolánicos.
- **CEM V:** Cementos compuestos.

Tabla A1.1.1 Cementos comunes

Tipo	Designación	Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D ²¹	Composición (proporción en masa %)										Componentes minoritarios			
					Componentes principales													
					Natural P	Natural calcinado Q	Silíceas V	Cenizas volantes W	Esquistos calcinados T	Caliza ⁴⁾								
CEM I	Cemento pórtland	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
	Cemento pórtland con escoria	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Cemento pórtland con puzolana	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento pórtland con ceniza volante	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III	Cemento portland con esquistos calcinados	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
		80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
		80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	Cemento pórtland con caliza	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento pórtland mixto ³⁾	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento con escorias de horno alto	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		60-89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		45-64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM V	Cemento compuesto ⁴⁾	40-64	18-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		20-38	31-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	

1) Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios (núcleo de cemento).
 2) El porcentaje de humo de sílice está limitado al 10%.
 3) En cementos portland mixtos CEM III/A-W y CEM III/B-W, en cementos puzolánicos CEM III/A y CEM III/B y en cementos compuestos CEM III/A y CEM III/B los componentes principales diferentes del clínker deben ser declarados en la designación del cemento (véase el apartado A1.1.2.1).
 4) El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado conforme al UNE EN 13639, será inferior al 0,20% en masa para calizas LL, o inferior al 0,50% en masa para calizas L.

Figura 2.1. La Tabla A1.1.1 de cementos comunes de la RC-08, que muestra los principales tipos de cementos en función de su composición [5].



En el presente trabajo consideraremos dosificaciones con CEM I. Este tipo de cementos se obtienen por la mezcla de clínker portland, reguladores y hasta un 5% de adiciones (escorias siderúrgicas, puzolana natural, cenizas volantes, filler calizo o humo de sílice). De acuerdo con la instrucción RC-08 se distinguen tres tipos en función de la resistencia inicial: 32.5N, 32.5R, 42.5N, 42.5R, 52.5N, 52.5R (figura 2.2).

Clase de resistencia ¹⁾	Resistencia a compresión UNE-EN 196-1 ²⁾			Tiempo de fraguado UNE-EN196-3		Estabilidad de volumen según UNE-EN 196-3	Calor de hidratación ³⁾	
	Resistencia inicial (N/mm ²)		Resistencia nominal (N/mm ²)	Inicio (min)	Final (h)		Expansión (mm)	UNE-EN 196-9 (J/g)
	2 días	7 días				28 días		41 horas
32,5N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10	≤ 270	
32,5R	≥ 10,0	-						
42,5N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60			
42,5R	≥ 20,0	-						
52,5N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45			
52,5R	≥ 30,0	-						

¹⁾ R = Alta resistencia inicial
N = Resistencia inicial normal
²⁾ 1 N/mm² = 1 MPa
³⁾ Solo para los comunes de bajo calor de hidratación

Figura 2.2. Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación [5].

La composición química básica del clínker portland son la cal, la sílice, la alúmina y el óxido de hierro, los cuales se encuentran formando silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos. Los principales constituyentes del cemento portland son el silicato tricálcico (C_3S), el silicato dicálcico C_2S , el aluminato tricálcico (C_3A) y el aluminoferrita tetracálcica (C_4AF). El silicato tricálcico y el silicato dicálcico forman juntos, alrededor del 70% del porcentaje en masa del cemento Portland, por término medio. Al reaccionar con el agua, tanto el C_3S como el C_2S forman el principal producto de hidratación, el gel de silicato de calcio-hidrato (C-S-H), que contribuye, prácticamente, a todas las propiedades beneficiosas del cemento endurecido. El C_3S se hidrata mucho más rápido que el C_2S , por lo que contribuye esencialmente al desarrollo temprano de la resistencia del hormigón. En consecuencia, al añadir más C_3S en la composición del cemento es beneficioso para el proceso de endurecimiento [5].



3. Reacción de hidratación del cemento

La hidratación del cemento es una reacción química muy exotérmica, lo que implica que se genera gran cantidad de calor durante el proceso de endurecimiento y fraguado del hormigón. La cantidad de calor generada en un instante dado es una indicación de la velocidad de las reacciones en ese instante. De esta manera, mediante técnicas calorimétricas se puede seguir la cinética de hidratación del proceso. El proceso de endurecimiento del hormigón puede dividirse en cuatro etapas: etapa de preinducción (I), inducción (II), la aceleración (III), deceleración (IV) y difusión (V) (figura 2.3). Durante las etapas I y II, el hormigón se considera en estado fresco [7,8]. El comportamiento del hormigón durante estas fases es especialmente importante para el presente estudio.

Las reacciones iniciales comienzan, inmediatamente, tras la adición de agua sobre la mezcla de cemento. Las partes externas de las partículas de cemento se disuelven, lo que lleva asociado una gran generación de calor. Las reacciones iniciales forman una capa inestable y densa de producto de hidratación C-S-H alrededor de las partículas de cemento. Esta capa reduce en gran medida la hidratación posterior del cemento, ya que forma una barrera alrededor del núcleo de las partículas de cemento. Este estado se denomina fase de inducción y es, también, un estado del hormigón en fresco. Durante la fase de inducción, la barrera reacciona lentamente hasta convertirse en una capa más estable y porosa, tras lo cual el agua puede llegar al núcleo de la partícula de cemento con mayor facilidad.

Después de la formación de la capa porosa comienza la fase de aceleración (III), que también se denomina fase de fraguado del cemento. El comienzo de esta fase marca el tiempo de fraguado inicial del hormigón. Durante esta fase, la velocidad de las reacciones de hidratación aumenta gradualmente y alcanza su máximo después de varias horas. La velocidad de reacción no es tan explosiva como en la fase I, porque la superficie total de las partículas de cemento ha disminuido. Durante la fase de aceleración se forman grandes redes de gel C-S-H, que también llenan el espacio entre las partículas de cemento. Esto aumenta significativamente la resistencia del material. El final de la fase de aceleración también marca el tiempo de fraguado final del material. Después de esto, se considera que el material está endurecido. Durante la fase de endurecimiento, las partículas de cemento se hidratan aún más, haciendo que la red de gel C-S-H se vuelva más rígida con el tiempo.

La mayoría de los hormigones han alcanzado un porcentaje sustancial de la resistencia final (>95%), a 28 días después de la mezcla. Por ello, la edad de 28 días se utiliza para ensayar la resistencia del hormigón o para desencofrar con seguridad las construcciones de hormigón. La imagen inferior de la figura 2.3 muestra la producción de calor durante las diferentes etapas. Se aprecia claramente la generación explosiva de calor durante las primeras reacciones, seguida de un pronunciado descenso. La imagen superior de la figura 2.3 muestra el grado de hidratación durante las etapas y muestra que la velocidad de reacción de las partículas de cemento es alta durante las etapas III y IV.

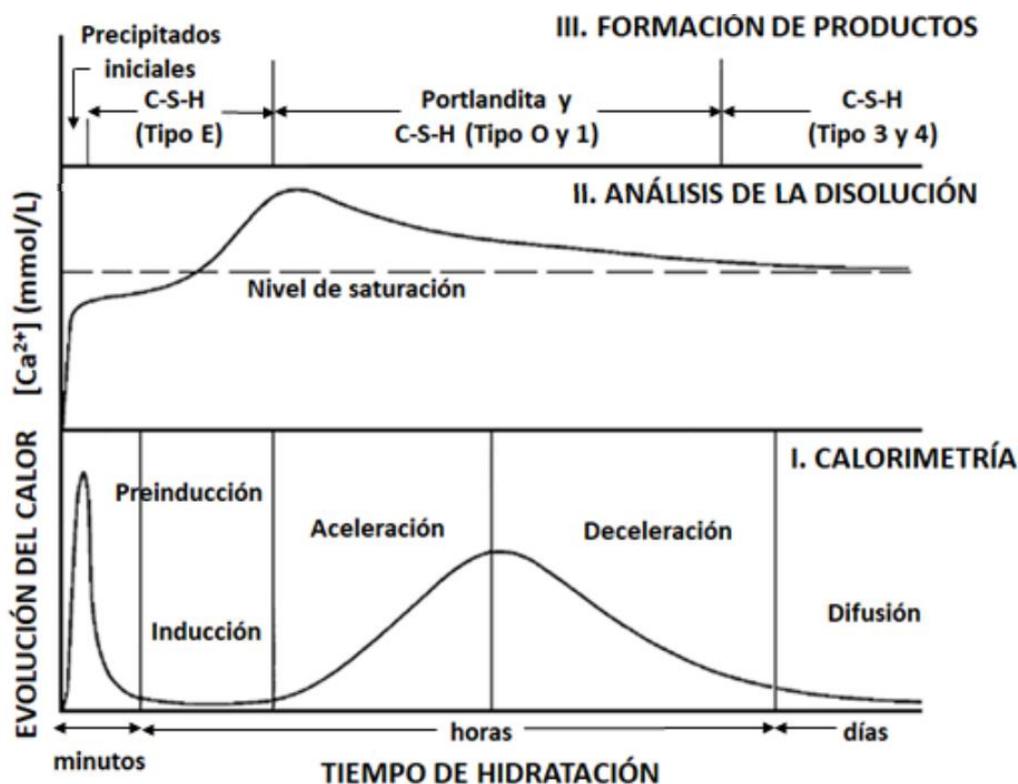
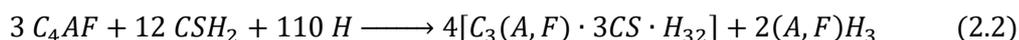
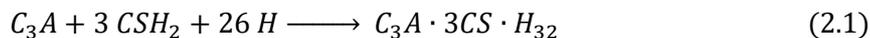


Figura 2.3. Representación esquemática de los procesos de hidratación del cemento [8].

Los silicatos C_2S y C_3S son los principales compuestos que regulan la resistencia del material. Al reaccionar con el agua, estos compuestos forman el gel CSH y la Portlandita $Ca(OH)_2$. El gel CSH permite formar el esqueleto básico que permite la unión entre los áridos y la Portlandita que además se encarga de controlar el pH del material. El aluminato tricálcico posee una velocidad de hidratación instantánea de tal forma que al reaccionar con el yeso deshidratado forma la Etringita. Este compuesto hidratado evita la reacción instantánea de fraguado [9].

En la primera fase se producen las reacciones de formación de Etringita $Al_2O_3 - Fe_2O_3 - trisulfato$.



Como se muestra en las dos reacciones anteriores, el C_3A y C_4AF compiten por los iones de sulfato disponibles SO_4^{2-} . El C_4AF reacciona más lentamente que el C_3A , por lo tanto, la mayor parte del sulfato se destinará a la obtención de $C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32}$ según la reacción 2.1. La figura 2.4 muestra un ejemplo de cómo el hidrato cubre la parte no hidratada de la partícula de cemento, a medida que transcurre del tiempo [10].

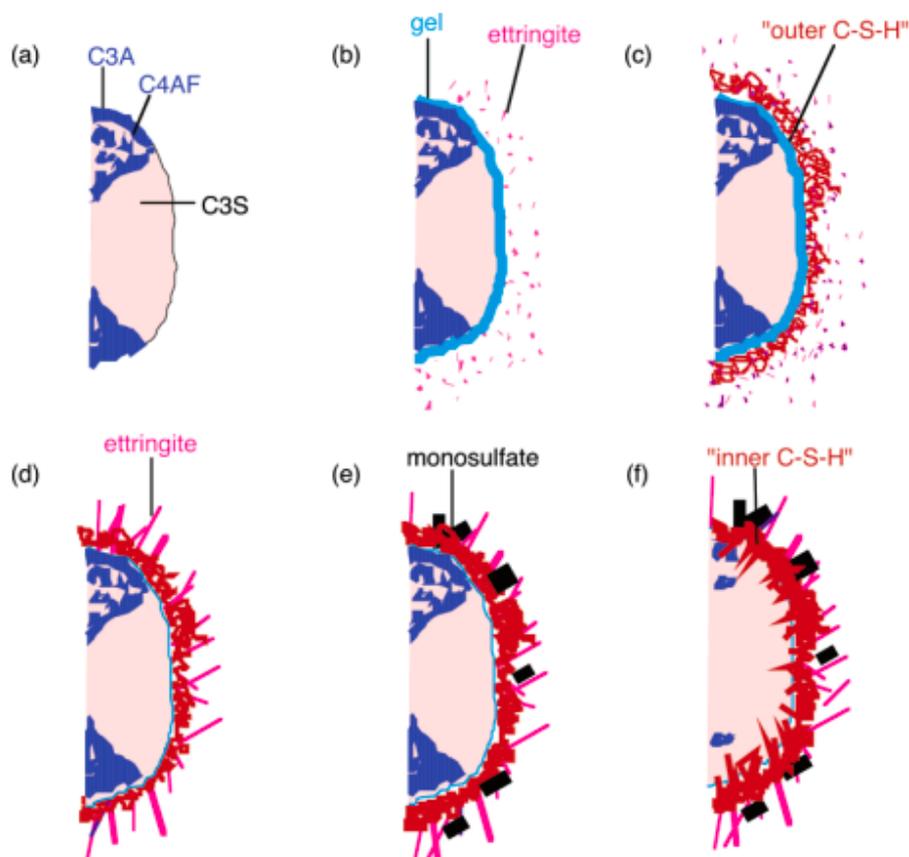


Figura 2.4. Representación esquemática del cemento anhidro (a) el efecto de la hidratación después de (b) 10 min, (c) 10 h, (d) 18 h, (e) 1-3 días, y (f) 2 semanas (Adaptación de K. L. Scrivener, tesis doctoral, Universidad de Londres, 1984) [10].



Se puede observar el recubrimiento de las partículas de cemento por el hidrato y la solubilización de variedad de especies iónicas en la solución. Además, como resultado de esta expulsión de iones, las partículas de cemento se recubren con productos de hidratación, adquiriendo una carga superficial. Tanto las cargas negativas como las positivas están presentes en la superficie de las partículas de cemento. Sin embargo, nunca llega a hidratarse el 100% del cemento en toda la vida de la estructura correspondiente.

4. Adiciones y aditivos

El diseño de la mezcla en fresco para conseguir un material imprimible requiere de distintos aditivos y adiciones. Por ello, su selección es un factor fundamental que afecta a las propiedades reológicas y mecánicas del material en fresco. El conocimiento de la forma en la que los aditivos afectan a las propiedades del material y la forma que interaccionan entre ellos es fundamental para el diseño de un material imprimible. Además de su efecto principal, los aditivos suelen ejercer otros efectos secundarios, favorables o desfavorables para la aplicación requerida. Tales efectos dependen, especialmente, del resto de los componentes del hormigón y de las condiciones ambientales. Por ello, es conveniente realizar ensayos previos comparativos, diseñando amasadas de prueba con diferentes dosis de aditivo. Estos aditivos son los mismos que se utilizan en hormigones, con una dosificación inferior al 5%, para mejorar sus propiedades. Los fabricantes de aditivos deben etiquetar correctamente estos productos de acuerdo con la norma UNE-EN 934-6:2001 [11]. En general, podemos distinguir los siguientes tipos de aditivos que van a permitir obtener una formulación óptima para el diseño del material [12]:

- **Superplastificantes.** Se trata de aditivos cuya función principal es la de aumentar la trabajabilidad de las amasadas, reduciendo la relación agua/cemento. Al aumentar el contenido de agua se consigue mejorar la trabajabilidad. Sin embargo, tiene un impacto negativo en las resistencias mecánicas y en la durabilidad. Por ese motivo, al introducir súperplastificantes en las mezclas, se consigue reducir la cantidad de agua de amasada hasta un 30%. En general, los plastificantes permiten reducciones máximas son del 15%. Por ello, utilizándolos se consiguen mayores resistencias iniciales (desde las 4 primeras horas) que las de un hormigón convencional [5].

- **Aceleradores de fraguado.** Son aditivos que tienen un efecto contrario a los retardadores de fraguado. Los aceleradores de fraguado son compuestos que adicionados a las mezclas, aceleran el proceso de fraguado, provocando un rápido endurecimiento. En cuanto a su naturaleza son productos formados por cloruros, bases o sales alcalinas. Es importante tener en cuenta que el calor es un acelerador y la cantidad de agua añadida desacelera el proceso de fraguado. Algunos sistemas de fabricación aditiva de materiales de base cemento inyectan este tipo de aditivos en la boquilla para acelerar el proceso de fraguado inmediatamente después de depositar el material [5]. Esto permite la apilabilidad de los diferentes cordones, al endurecerse a mayor velocidad el material de los cordones que se sitúan debajo del cordón que se está imprimiendo.
- **Retardadores.** Suelen ser de naturaleza orgánica, permitiendo el aumento de los tiempos de fraguado.
- **Modificador de la viscosidad (VMA).** Permiten modificar selectivamente la reología sin alterar significativamente la cinética de hidratación. Estos aditivos son de naturaleza orgánica, como los éteres de celulosa, que se añaden a los materiales cementantes para aumentar su viscosidad y el límite elástico. Algunos ejemplos de modificadores reológicos son la metilcelulosa y la arcilla calcinada [12].
- **Inyección de un acelerador:** permiten modificar tanto la reología como la cinética de hidratación en un pequeño periodo de tiempo.



A continuación, se consideran las principales adiciones, añadidas en la obtención y fabricación del cemento, tras su clinkerización. Las más utilizadas para el diseño de un material imprimible:

- **Humos de sílice:** permite un control de las propiedades reológicas.
- **Filleres calizos:** favorece la dispersión, hidratación, trabajabilidad, retención de agua, capilaridad, retracción y fisuración.
- **Adición de fibras.** Los primeros intentos de extrusión de materiales cementicios fueron mediante el uso de materiales compuestos con alto contenido de fibras. Las fibras permiten reducir la retracción del material tras el fraguado [13].

El control de las condiciones ambientales, es decir, de impresión, son fundamentales para que el efecto de cada aditivo sea el adecuado. De esta forma, las propiedades mecánicas y reológicas, que limitan la imprimabilidad del material, están constreñidas por las condiciones ambientales de impresión. Por lo tanto, la fabricación aditiva de materiales de base cemento se debe llevar a cabo en condiciones controladas de laboratorio o industriales.

Referencias

- [1] A.V. Rahul, M. Santhanam, H. Meena, Z. Ghani, *3D printable concrete: Mixture design and test methods*, Cement and Concrete Composites, Volume 97, 13-23, 2019.
- [2] AENOR, *UNE-EN 206-1:2008 Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad*, 2008.
- [3] Ministerio de Fomento, *EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural*, 2008. Recientemente (29 junio 2021) sustituido, según RD470/2021, por el Código Estructural, reglamentación que regula las estructuras de hormigón, de acero y mixtas de hormigón-acero, tanto de edificación como de obra civil.
- [4] V. Voney, P. Odaglia, C. Brumaud, B. Dillenburger, G. Haberta, *From casting to 3D printing geopolymers: A proof of concept*, Cement and Concrete Research, Volume 143, 2021.
- [5] C. Thomas, P. Tamayo, J. Setién, D. Ferreño, J. A. Polanco, J. Rico, *Effect of high temperature and accelerated aging in high density micro-concrete*, Construction and Building Materials, Volume 272, 2021.
- [6] J. Montoya, *Hormigón Armado*, 14^º Ed, Editorial Gustavo Gili, 2000.
- [7] L. J. Hermens, *Strength development of concrete used for 3D concrete printing: determination of the influence of temperature on the development of concrete strength properties before initial set and the applicability of maturity methods*, Master Tesis, TU/e, 2018.
- [8] M. M. Garrido, *Modificaciones estructurales del gel C-S-H irradiado con láser continuo de CO₂*, Tesis doctoral, UCM, 2019.
- [9] I.G. Richardson, The nature of the hydration products in hardened cement pastes, Cement and Concrete Composites, Volume 22, 2, 97-113, 2000.
- [10] M. Bishop, S. G. Bott, A. R. Barron, *A New Mechanism for Cement Hydration Inhibition: Solid-State Chemistry of Calcium Nitritotris(methylene)triphosphonate*, Chem. Mater., 15, 16, 3074–3088, 2003.
- [11] Real Decreto 1797/2003, de 26 de diciembre, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-03)
- [12] V. Esnault, A. Labyad, M. Chantín, F. Toussaint, *Experience in Online Modification of Rheology and Strength Acquisition of 3D Printable Mortars*, Springer, 2018.
- [13] V. Lesovik et al., *3D-Printed Mortars with Combined Steel and Polypropylene Fibers*, MDPI, 9, 79, 2021.

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA ESKOLA

ESCUELA
DE INGENIERÍA DE BILBAO

Capítulo 3

Caracterización reológica y ensayo Vicat de materiales en fresco de base cementicia

La calidad estructural de morteros y hormigones depende, evidentemente, de la calidad de cada uno de los componentes utilizados en la mezcla. Sin embargo, este no es el único factor limitante. La calidad también depende en gran medida de las propiedades reológicas del material en fresco. Por ejemplo, en el hormigón autocompactante, durante su colocación en el encofrado debe poder fluir hacia todos los rincones del molde para llenarlo por completo. Por otro lado, cuando el hormigón presenta una consistencia inadecuada y endurece en una masa no homogénea se pueden dar resultados catastróficos [1]. Esto pone de relieve la importancia de la caracterización reológica de los hormigones.

Volviendo al proceso de fabricación aditiva, para evaluar la *imprimabilidad* de los materiales de base cementicia, es necesario estudiar la evolución de las propiedades de los materiales después de ser depositados. A este propósito es fundamental controlar en la línea de impresión, la rigidez y la resistencia del material cementicio. El mayor reto asociado a la impresión 3D de estos es la determinación del aumento del límite de fluencia estático después de la deposición [2].

Actualmente se disponen de ensayos sencillos como los ensayos de penetración instantánea (Aguja de Vicat) o continua y los de flujo inducido por la gravedad, con el fin de controlar, con dispositivos sencillos, la evolución de las propiedades de los materiales a lo largo del tiempo. Alternativamente, las mediciones de reometría son los métodos más fiables para estimar la evolución del módulo de fluencia de un material a lo largo del tiempo, sin embargo, requieren de dispositivos caros y sensibles que no son fáciles de implementar en un entorno de impresión [3]

1. Introducción a la reología

La palabra reología fue introducida por Eugene C. Bingham en 1928, quien estableció su origen etimológico en la afirmación de Heráclito "panta rhei", que significa "todo fluye". Significa el estudio de la deformación y el flujo de la materia. Esta definición fue aceptada cuando se fundó la Sociedad Americana de Reología en 1929. Sin embargo, aunque no tenía un nombre bien definido hasta el trabajo de Bingham, la ciencia que hay detrás de la reología se ha estudiado a lo largo de la historia [4,5].

Una primera aproximación para describir el comportamiento de los fluidos reales es el modelo de viscoelasticidad lineal (η), es decir, el esfuerzo de corte o cizalla (τ) aplicado es proporcional al gradiente de la velocidad $\dot{\gamma}$. Por lo tanto, se tiene que:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \left[\frac{Pa}{s} \right] \quad (3.1)$$

Los fluidos que no cumplen esta relación lineal se denominan fluidos no newtonianos (figura 3.1), que se clasifican en:

- **Dilatante.** La viscosidad del fluido aumenta al aumentar la velocidad de deformación por esfuerzo cortante, como ocurre con las arenas movedizas y las suspensiones de almidón, que se espesan cuando se aplica una deformación.
- **Pseudoplástico.** Disminuyen su viscosidad al aumentar la velocidad de deformación por esfuerzo cortante. Algunos ejemplos son las suspensiones coloidales, el plasma de la sangre y las resinas.

- Plástico de Bingham.** Se considera una idealización de un fluido plástico. Se trata del caso límite de sustancia plástica, en el que existe un esfuerzo (límite de fluencia) antes del cual, comienza a fluir. El comportamiento a fluencia puede no ser necesariamente lineal, dando lugar a otro tipo de fluido. Algunos ejemplos son las suspensiones de arcillas, la pasta de dientes, el chocolate y la mostaza.

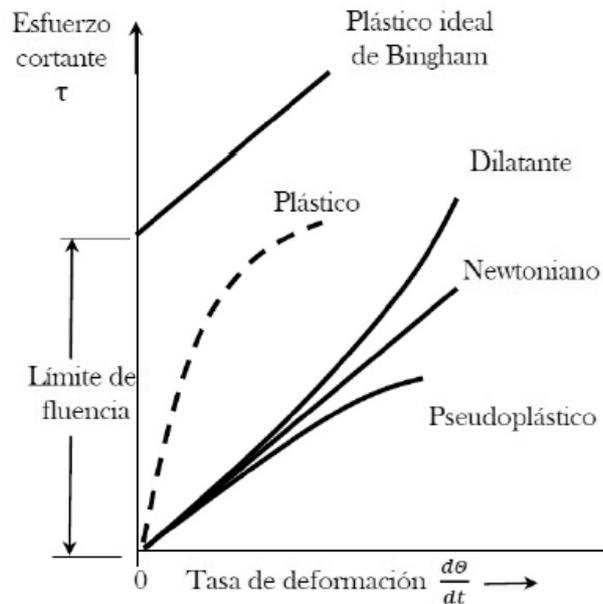


Figura 3.1. Clasificación de los materiales de acuerdo con su comportamiento reológico.

Los modelos reológicos más sencillos para describir el comportamiento de los sólidos y los fluidos hacían uso de las leyes de Hooke y Newton, con base en una relación lineal entre sus términos. Cuando se enunciaron las primeras teorías viscoelásticas, que se basaban en una combinación de ambas leyes, se dio el nombre de viscoelasticidad lineal a ese concepto. Uno de los ejemplos más sencillos de este tipo de comportamiento es el plástico de Bingham, que a partir de un valor umbral de tensión de cizallamiento se comporta como un fluido newtoniano.



2. Modelo reológico de materiales en fresco de base cementicia

Los materiales cementicios son heterogéneos por lo que la aproximación más adecuada para la modelización de su comportamiento reológico en estado fresco se basa en la mecánica de fluidos no newtonianos. De esta forma, el comportamiento macroscópico del flujo se describe en términos de ecuaciones constitutivas, las cuales establecen relaciones entre la tensión de cortadura y el gradiente de velocidad. Los modelos reológicos comúnmente aceptadas para la caracterización de los materiales en base cemento en estado fresco son los relativos a los modelos Bingham (ecuación 3.2) y Herschel-Bulkley (ecuación 3.3), las cuales establecen que el material fluirá únicamente si se le somete a una tensión de corte superior a un valor crítico determinado límite de fluencia. El modelo de Herschel-Bulkley, a diferencia del modelo de Bingham, asume un comportamiento no lineal del material para esfuerzos superiores al límite de fluencia [5,6].

$$\tau = \tau_o + \eta\dot{\gamma} \quad (3.2)$$

$$\tau = \tau_o + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3.3)$$

Por lo tanto, los materiales cementicios en estado fresco se comportarán como un sólido cuando la tensión aplicada se encuentre por debajo de dicho límite de fluencia y como un líquido cuando ésta se encuentre por encima. Ese valor de tensión umbral se conoce como *tensión de fluencia*, y puede definirse como el punto en el que se produce un cambio en el comportamiento del material. En el caso de un fluido plástico de Bingham, el material comienza a fluir una vez que se alcanza el límite de fluencia, y por debajo de ese valor, se comporta como un sólido. También es importante comentar que se han propuesto otros modelos más específicos que también tienen en cuenta la existencia de un límite de fluencia [7]. Algunos de ellos son el modelo de Robertson-Stiff, Casson, Modificado de Bingham, Vom Berg, etc.

3. Modelo tixotrópico de materiales en fresco de base cementicia

Los materiales de base cementicia sufren la hidratación, lo que afecta a sus propiedades mecánicas y su comportamiento reológico. Este cambio en las propiedades permite que el material en estado fresco se acumule y sea capaz de soportar la creciente carga generada por las capas depositadas. Por lo tanto, es necesario conocer la cinética reológica del material a medida que transcurre la reacción de hidratación. Dado el comportamiento del material es posible distinguir dos valores del límite de fluencia: límite de fluencia estático τ_0 y límite de fluencia dinámico τ_y [8]. El límite de fluencia estático indica la tensión máxima requerida para que el material fluya desde un estado de reposo, mientras que el límite de fluencia dinámico se define como la tensión mínima necesaria para mantener el flujo. Así, para aplicaciones en las que se requiere el bombeo del material, como es el caso de la fabricación aditiva, los materiales ideales son aquellos que muestran este tipo de comportamiento tixotrópico, ya que para mantener el flujo sólo es necesario aplicar la tensión correspondiente al límite de fluencia dinámico. Además, tras la extrusión, el material reconstruye su estructura, aumentando su resistencia hasta el valor correspondiente al límite de fluencia estático [8].

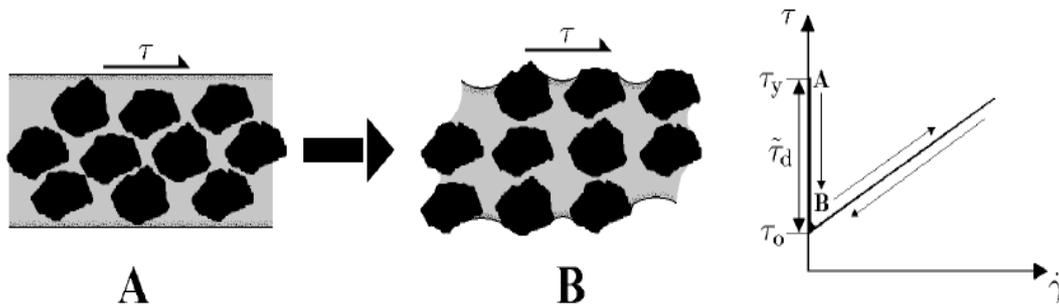


Figura 3.2. Diferencias estructurales entre límite de fluencia estático (τ_0) y límite de fluencia dinámico (τ_y) [8].

Dichos parámetros, característicos del material en estado fresco (límite de fluencia estático, límite de fluencia dinámico y viscosidad plástica) pueden ser determinados a partir de ensayos con reómetro. Así, sometiendo al material a un ensayo con esfuerzo creciente (velocidad de deformación constante), el resultado típico que se obtendría es el mostrado en la figura 3.3a.

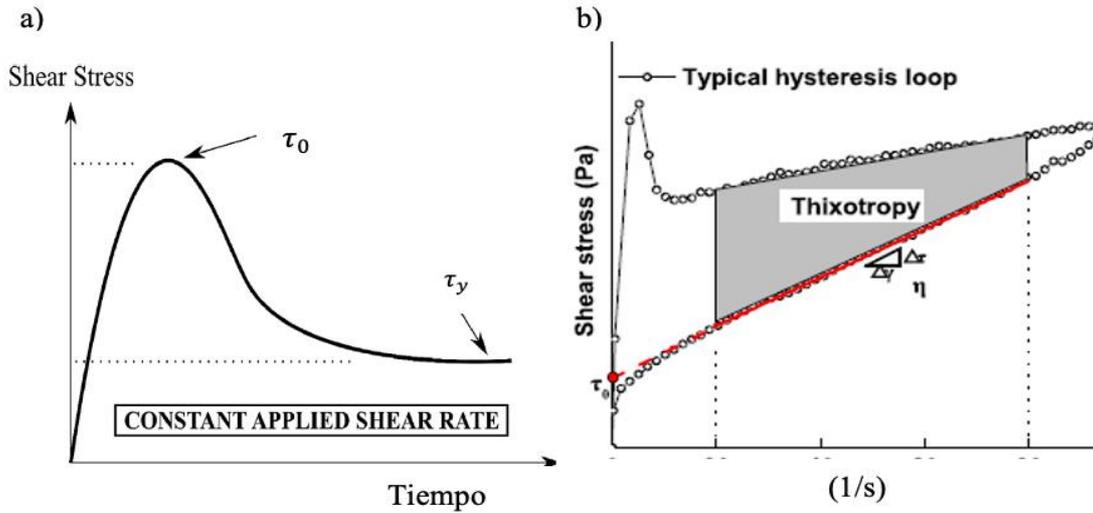


Figura 3.3. a) Evolución con el tiempo del límite elástico de un material tixotrópico b) Ciclo de histéresis de un material tixotrópico [9].

Otro parámetro reológico de gran importancia en la caracterización de los materiales en base cemento en estado fresco es la tixotropía, la cual puede definirse como el descenso en la viscosidad del material cuando se aplica un esfuerzo de cortadura, seguido de una recuperación gradual de la misma cuando dicha cortadura desaparece. Para un ensayo con reómetro ejecutado a velocidad de deformación variable (ciclo de histéresis), la tixotropía está relacionada con el área del bucle tixotrópico que se produce (área encerrada entre las curvas ascendente y descendente del ciclo, tal como se muestra en la figura 3.3.b). Dado que la tixotropía está relacionada con la diferencia existente entre los límites de fluencia estático y dinámico del material, se propone el denominado parámetro tixotrópico (I_{thix}) para su cuantificación:

$$I_{thix} = \frac{\tau_0 - \tau_y}{\tau_y} \quad (3.4)$$

donde τ_0 y τ_y representan, respectivamente, el límite de fluencia estático y el límite de fluencia dinámico del material. En este caso, un mayor valor de I_{thix} indicaría que el material presenta una mejor tixotropía [9].

Hasta ahora hemos visto las características principales del comportamiento tixotrópico de los materiales de base cemento. Sin embargo, es interesante conocer la relación que existe entre la evolución de las propiedades reológicas del material y la estructura química del cemento [10]. El comportamiento mecánico de este tipo de materiales se basa en la

organización de la red de granos de cemento en suspensión con el agua. Tras la mezcla de los componentes, los granos de cemento comienzan a flocular bajo la influencia de las interacciones coloidales. Esta estructura reticular floculada induce un aumento de la rigidez y la resistencia, en un intervalo de tiempo de varios segundos. Tras largos períodos de tiempo, la rápida formación de los enlaces C-S-H en las zonas de contacto entre los granos permite obtener la estructura continua del material. Este fenómeno de nucleación de los productos de hidratación se produce antes del fraguado y son un fenómeno químicamente irreversible. Sin embargo, si la potencia del sistema de bombeo y/o sistema de mezclado es suficiente, estos enlaces pueden romperse. Es importante tener en cuenta que, en la impresión 3D de materiales de base cementicia, a menudo se añaden aceleradores que permite la formación temprana de otros hidratos como la etringita, el monosulfato y los hidratos de aluminato que son responsables del aumento temprano del límite elástico estático. El primer aumento del límite elástico se debe a un proceso rápido de floculación, mientras que el segundo, en escalas de tiempo más largas provoca grandes variaciones del límite elástico, se debe principalmente a la nucleación de algunos hidratos en los puntos de contacto entre los granos 3.4.

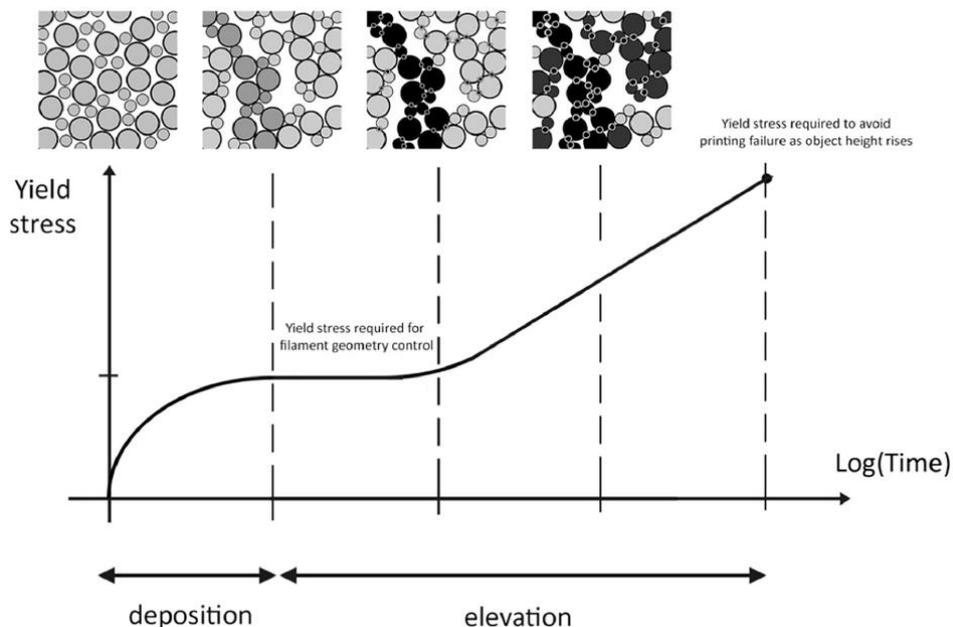


Figura 3.4. Evolución de la tensión de fluencia en función del tiempo. En escalas de tiempo cortas, la floculación permite imprimir un filamento con características geométricas bien controladas mientras que, en escalas de tiempo más largas, la nucleación de los hidratos permite la impresión de objetos verticales y delgados [10].



4. Cinética tixorópica

El límite de fluencia de los materiales en base cemento aumenta con el tiempo cuando se encuentran en reposo debido, principalmente, a dos procesos:

- Los cambios físicos reversibles que se producen en la estructura del material debido a la tixotropía.
- Los cambios estructurales irreversibles debidos a la hidratación del cemento.

A edades tempranas, la tixotropía juega un papel dominante en la estructuración del material, mientras que, a edades mayores, es la hidratación quien determina la evolución de las propiedades del mismo. Habitualmente se considera que, durante el periodo de latencia anterior al fraguado, el crecimiento con el tiempo del límite de fluencia del material en reposo es lineal [11]. Por lo tanto, podemos escribir la siguiente ecuación cinética de evolución del límite de fluencia estático:

$$\tau_0(t) = \tau_{0,0} + A_{thix} \cdot t \quad (3.5)$$

donde $\tau_{0,0}$ es el valor inicial del límite de fluencia del material, A_{thix} es la velocidad de estructuración, que representa la velocidad a la que aumenta el límite de fluencia y t es el tiempo transcurrido desde que el material se encuentra en reposo. Después de este periodo de incremento lineal, el cual puede prolongarse hasta los 60 minutos, y la aproximación lineal deja de ser válida. A partir de este momento, el cambio en las propiedades reológicas se acelera y la cinética de acumulación estructural se describe mejor mediante un término exponencial. Este cambio en la cinética tixotrópica puede explicarse por el inicio del fraguado y el aumento del volumen del sólido debido a la interpenetración de los cristales C-S-H creados. Se propone, entonces, una ley exponencial para la evolución del límite de fluencia que viene dado por la ecuación 3.6 [12].

$$\tau_0(t) = A_{thix} \cdot t_c \cdot (e^{t/t_c} - 1) + \tau_{0,0} \quad (3.6)$$

Al igual que en la ecuación 3.5, τ_c es el valor inicial del límite de fluencia del material, A_{thix} es la velocidad de estructuración, que representa la velocidad a la que aumenta el límite de fluencia, t_c es el tiempo característico (característico del material en estado fresco) y t es el tiempo transcurrido desde que el material se encuentra en reposo. Todos estos modelos son fundamentales tanto en la simulación del proceso de impresión como para la selección de los parámetros óptimos de impresión.

5. Efecto de los aditivos sobre las propiedades reológicas

En las últimas décadas se han llevado a cabo numerosos estudios sobre los efectos de los aditivos, adiciones, áridos y otros componentes en las propiedades reológicas de los materiales de base cemento. Como hemos comentado el modelo de Bingham es el más adecuado para el estudio de este tipo de materiales. Con arreglo a este modelo, cambios en la relación agua/cemento tienen efectos sobre el límite de fluencia y la viscosidad plástica. Estas tendencias pueden mostrarse de forma intuitiva en un gráfico, representado el límite elástico frente a la viscosidad plástica, como se muestra en la figura 3.5. Esta forma de presentación fue introducida por Bloomer, y es de gran utilidad ya que el límite elástico y la viscosidad plástica varían de forma compleja con la composición [13].

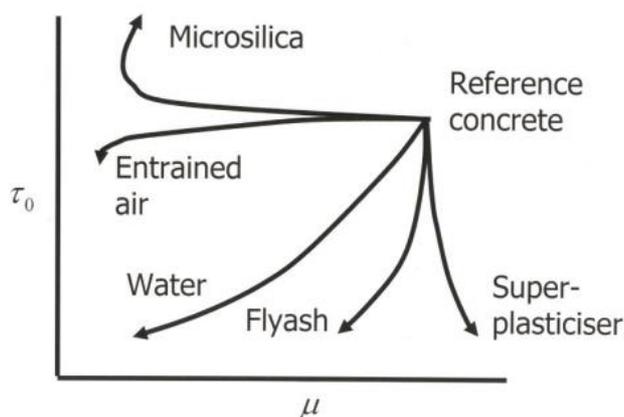


Figura 3.5. Variación de las propiedades reológicas de los materiales de base cementicia al aumentar en el sentido de las flechas diferentes componentes [13].

Las tendencias mostradas en la figura 3.5 se construyen a partir de datos experimentales de tal forma que la dirección de la punta de la flecha muestra el efecto de aumentar la cantidad del componente representado.



6. Modelo de fallo plástico

Como ya hemos comentado en el primer capítulo, en el proceso de fabricación aditiva de materiales de base cementicia, los objetos pueden colapsar durante el proceso de fabricación. Aunque las deformaciones que se producen en estos materiales no han sido estudiadas en profundidad, en general, podemos distinguir dos mecanismos de deformación. En el primer mecanismo, el material fluye en el proceso de deposición, antes de que un rápido aumento de la resistencia provocado por modificadores de la viscosidad o aceleradores, detengan el flujo viscoplástico y el material adopte una forma estable. Otros mecanismos se basan en la deposición del material en condiciones de no cizalla, directamente en un estado de forma estable, que puede durar de minutos a horas. Las deformaciones viscoelásticas que pueden producirse durante este periodo pueden influir tanto en la conformidad geométrica como en la estabilidad del objeto durante la impresión. Respecto a las deformaciones elásticas, el módulo de Young E puede determinarse, directamente, a partir de experimentos de compresión no confinada (capítulo 4). Dependiendo de cuál de los mecanismos se trata se pueden adoptar diferentes aproximaciones de modelización: Dinámica de fluidos computacional (CFD) para el primero o la modelización por elementos finitos (FEA) para el segundo. Una combinación de ambos puede ser necesaria para describir el comportamiento completo del material [14].

Teniendo en cuenta que la resistencia del material es inicialmente baja en relación con su peso propio, la apilabilidad (edificabilidad) es una propiedad importante a la hora de evaluar su idoneidad para impresión. Esta propiedad no sólo depende de las características del material, sino también del diseño del objeto, el tamaño, la geometría y los parámetros del proceso, como la velocidad de impresión. En el proceso de extrusión por capas se extruye un material cementante y los objetos se construyen capa a capa. Después de la extrusión, el límite elástico inicial de cualquier capa ($\tau_{0,0}$) debe soportarse a sí mismo por lo que [15]:

$$\tau_{0,0} = \frac{\rho g h}{\sqrt{3}} \quad (3.7)$$

donde ρ , g y h son la densidad, la constante de gravedad y la altura de la capa respectivamente.

El factor $\sqrt{3}$ se introduce como consecuencia del criterio de plastificación de Von Mises. Al final del proceso, la tensión de fluencia de la capa más baja, $\tau_{0,f}$, debe ser suficiente para soportar toda la altura H_m :

$$\tau_{0,f} = \frac{\rho g H_m}{\sqrt{3}} \quad (3.8)$$

Así que la relación entre las tensiones de fluencia inicial y final es:

$$\frac{\tau_{0,f}}{\tau_{0,i}} = \frac{H_m}{h} \quad (3.9)$$

En la mayor parte de los sistemas de impresión, los espesores de las capas son del orden de 10-30 mm, mientras que las alturas finales están entre 800-1500 mm. Por lo tanto, $\tau_{0,f}/\tau_{0,i}$ varía entre 25 y 150 [16].

En la fabricación aditiva de materiales de base cemento, la velocidad a la que aumenta el límite elástico en el dominio lineal es un parámetro fundamental del proceso (A_{thix}). Con $t_{h,min}$, el tiempo mínimo necesario para alcanzar la capa final, produciendo un elemento de altura H_m y teniendo en cuenta las ecuaciones 3.8 y 3.9, tenemos entonces:

$$A_{thix} = \frac{\rho g h}{\sqrt{3} t_{h,min}} \quad (3.10)$$

Para los procesos puramente tixotrópicos (es decir, de floculación reversible), un límite superior para A_{thix} es de 2 Pa/s, por lo que el tiempo más corto para producir un objeto de 1 m de altura no puede ser inferior a 1h 40 minutos, si consideramos solo los efectos tixotrópicos [17]. También es útil expresar $t_{h,min}$ como una función de A_{thix} :

$$t_{h,min} = \rho g h / \sqrt{3} A_{thix} \quad (3.11)$$



Esto puede utilizarse para definir una velocidad horizontal máxima v , por encima de la cual la acumulación estructural no sería lo suficientemente rápida para soportar la tasa de deposición de material:

$$v = \sqrt{3}LA_{thix}/\rho gh \quad (3.12)$$

donde L es la longitud del contorno. En el caso de las geometrías de muros de contorno, según las observaciones del proceso típico de producción de muros, sería aproximadamente 3 veces mayor que la longitud del elemento.

7. Interferencias entre capas

Los estudios reológicos permiten caracterizar un material imprimible de acuerdo con las características de *imprimabilidad*. Esto implica la capacidad del material para pasar, en un pequeño periodo de tiempo, de una suspensión bombeable, prácticamente líquida a un cuasi-sólido capaz de soportar su propio peso sin ningún tipo de encofrado o soporte. Sin embargo, otro factor que debe ser considerado son las interfases entre capas sucesivas. Estas interfases débiles suelen denominarse *juntas frías*, siendo la consecuencia de la interacción de coladas de material de capas distintas. Se ha demostrado que su origen radica en la ausencia de mezcla en la interfaz entre las capas del hormigón. Este fenómeno es debido a la naturaleza tixotrópica del material que genera un rápido aumento de la consistencia de la primera capa, impidiendo que el flujo de la segunda se mezcle con la primera capa en la interfaz. En materiales imprimibles de baja porosidad, el líquido no tiene tiempo de fluir y reemplazar el líquido evaporado en la superficie de la capa depositada. En consecuencia, se crea una región seca de espesor del orden de unos cientos de micrómetros en la interfase. En esta región, después del secado, no queda suficiente agua para hidratar el polvo de cemento y la resistencia de la interfase disminuye. Además, un área de contacto efectiva reducida puede provocar una disminución de la resistencia de la unión [17, 18].

8. Ensayo de aguja Vicat

La aguja de Vicat es un ensayo ampliamente utilizado para hallar el tiempo de fraguado de los cementos. Este ensayo viene regulado por múltiples normas en todo el mundo como la ISO 9597, la ASTM C191-04 o la AASHTO T 131 [19]. Su amplio uso radica en su sencillez. El fundamento de esta prueba también se ha adaptado para el ensayo de morteros y hormigones, modificando las dimensiones de la aguja (ASTM C807, C403). En la figura 3.6 se muestra las dimensiones del dispositivo de ensayo de aguja Viact. La base del ensayo consiste en medir la profundidad de penetración de una aguja sobre una probeta de material en estado fresco [20].

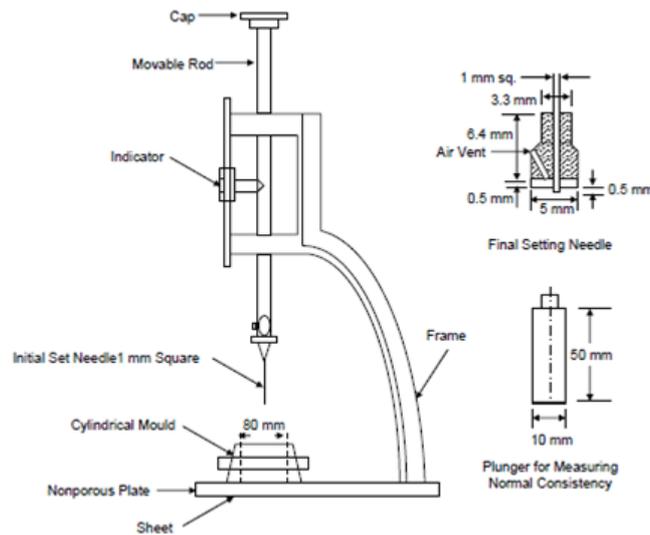


Figura 3.6. Esquema del sistema experimental del ensayo de aguja Vicat [19].

Por lo tanto, la penetración de la aguja sobre una probeta en función del tiempo permite estimar el tiempo de fraguado, obteniéndose una gráfica como la que se muestra en la figura 3.7.

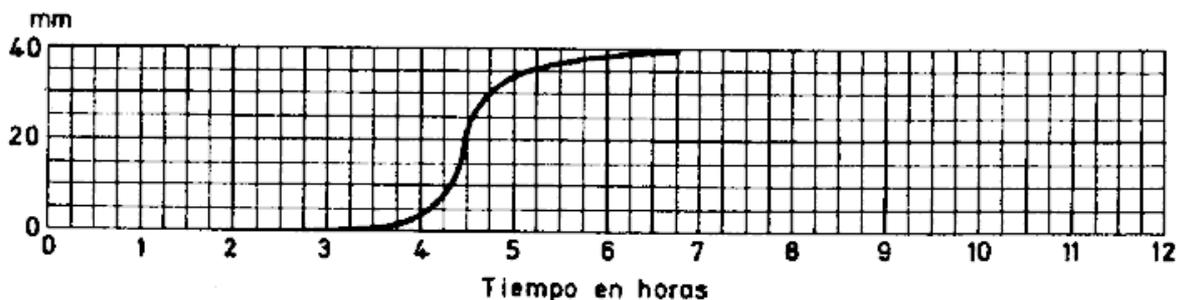


Figura 3.7. Curva de fraguado de una pasta de cemento [19].



Sin embargo, el ensayo de Vicat sigue siendo un método destructivo para el material que se encuentra en reposo. En consecuencia, la reproducibilidad de los resultados (el tiempo de fraguado) es significativamente baja. Para la caracterización de los materiales de base cementicia, el método reológico proporciona resultados más precisos y características físicas que permiten caracterizar con exactitud la evolución del material durante el periodo de inducción. El ensayo Vicat es de gran utilidad en una primera aproximación hacia la caracterización del material en fresco. Sin embargo, es importante correlacionarlo con otros experimentos más precisos. Por ejemplo, sería de gran interés relacionar la profundidad de penetración con el límite de fluencia [21,22].

En [22] se ha demostrado que a priori no se puede encontrar ninguna correlación que relacione el límite de fluencia y la profundidad de penetración de Vicat. Durante la primera hora, la velocidad de la aguja es demasiado alta para despreciar los efectos viscosos. En tales condiciones, no existe una relación directa y sencilla para calcular el límite de fluencia de una pasta de cemento. En consecuencia, el ensayo de Vicat no es fiable para el estudio del periodo tixotrópico. Sin embargo, otros métodos derivados del método Vicat basado en el ensayo de placa con célula de compresión permiten el seguimiento de la evolución del fraguado a partir del tiempo de mezcla.

Referencias

- [1] G. H. Tattersall, P. F. G. Banfill, *The Rheology of Fresh Concrete*, PitmanBooks Limited, 1983.
- [2] A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre, *Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques*, Mater. Struct. 49 (4), 1213–1220, 2015.
- [3] M. Benaicha, A. Belcaid, A. H. Alaoui, O. Jalbaud, Y. Burtschell, *Rheological characterization of self-compacting concrete: New recommendation*, Structural Concrete, Volume 20, Issue 5, 1695-1701, 2019.
- [4] R. G. Larson, *The Structure and Rheology of Complex Fluids* (Topics in Chemical Engineering), 1999.
- [5] C. F. Ferraris, F. Larrad, *Testing and Modelling of Fresh Concrete Rheology*, NISTIR, 1998.
- [6] P. F. G. Banfill, *Rheology Reviews*, 61 – 130, 2006.
- [7] H. Vikan, H. Justnes, F. Winnefeld, R. Figi, *Correlating cement characteristics with rheology of paste*, Cem. Concr. Res., vol. 37, 11, 1502–1511, 2007.
- [8] J. E. Wallevik, *Rheology of Particle Suspensions: Fresh Concrete, Mortar and cement Paste with Various Types of Lignosulfonates*, Phd, Norwegian University of Science and Technology, 2003.
- [9] Y. Zhang, Y. Zhang, W. She, L. Yang, G. Liu, Y. Yang, *Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete*, Construction and Building Materials, Volume 201, 278-285, 2019.
- [10] N. Roussel, G. Ovarlez, S. Garrault, C. Brumaud, *The origins of thixotropy of fresh cement pastes*, Cem. Concr. Res. 42 (1), 148–157, 2012.
- [11] A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre: *Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques*, Mater. Struct. 49, 1213-1220, 2016.
- [12] A. Perrot, A. Pierre, S. Vitaloni, V. Picandet, *Prediction of lateral form pressure exerted by concrete at low casting rates*, Mater. Struct., 48, 2315-2322, 2015.
- [13] O. H. Wallevika, J. E. Wallevikb, *Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes*, Volume 41, Issue 12, 1279-1288, 2011.
- [14] R. Comminal, W. Ricardo Leal da Silva, T. J. Andersen, H. Stang, J. Spangenberg, *Modelling of 3D concrete printing based on computational fluid dynamics*, Cement and Concrete Research, Volume 138, 2020.
- [15] T. Wangler, E. Lloret, L. Reiter, N. Hack, F. Gramazio, M. Kohler, M. Bernhard, B. Dillenburger, J. Buchli, N. Roussel, R. Flatt, *Digital concrete: Opportunities and challenges*, RILEM Tech. Lett., 1, 67–75, 2016.
- [16] A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre, *Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques*, Mater. Struct., 49, 1213-1220, 2016



- [17] J. Kruger, S. Cho, S. Zeranka C. Viljoen, G. van Zijl, 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse, *Composites Part B: Engineering*, Volume 183, 2020.
- [18] R.A.Buswell., W.R.Leal de Silva, S.Z.Jonesc, J.Dirrenbergerde, *3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research*, *Cement and Concrete Research*, Volume 112, 37-49, 2018.
- [19] ASTM C191-04, Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, 2017.
- [20] J. Montoya, *Hormigón Armado*, 14^º Ed, Editorial Gustavo Gili, 2000.
- [21] U. Pott, D. Stephan, *Penetration test as a fast method to determine yield stress and structural build-up for 3D printing of cementitious materials*, *Cement and Concrete Composites* Volume 121, 2021.
- [22] H. Sleimana, A. Perrot, S. Amziane, *A new look at the measurement of cementitious paste setting by Vicat test*, *Cement and Concrete Research* Volume 40, Issue 5, 681-686, 2010.

Capítulo 4

Caracterización mecánica en fresco de materiales de base cementicia

Tras exponer las principales características reológicas de los materiales cementicios, continuaremos con el estudio de sus propiedades mecánicas. De forma análoga a la caracterización reológica se considerará la caracterización mecánica del material en fresco a lo largo del tiempo. Este modelo de comportamiento mecánico del material, como ya se ha comentado, es utilizado, posteriormente, para la modelización de la pieza de impresión 3D con el objetivo de determinar su *imprimabilidad*.

Por lo tanto, la *apilabilidad* (capítulo 2) entendida como la capacidad de un material extruido de mantener su geometría a medida que se van depositando progresivamente capas adicionales de material es una propiedad fundamental para asegurar la viabilidad del proceso de impresión. Por ello, la modelización del comportamiento mecánico del material es fundamental para predecir el fallo plástico y por pandeo durante el proceso de impresión. Aunque el fallo plástico se ha estudiado desde el punto de vista reológico, en este capítulo lo abordaremos desde el punto de vista mecánico. En este contexto, los materiales en base cemento en estado fresco son habitualmente considerados como fluidos no newtonianos descritos por el criterio de plastificación de Von Mises. Sin embargo, a medida que endurecen dichos materiales, la aproximación basada en los criterios de plastificación de Mohr-Coulomb o de Drucker-Prager es más adecuada para predecir el fallo plástico en procesos de impresión [1,2]. En el presente trabajo únicamente consideraremos el criterio de Mohr-Coulomb, exponiendo de forma detallada, en este capítulo, su fundamento teórico.

Una introducción teórica al criterio Drucker-Prager [3] se muestra en el apéndice 1, dado que la complejidad de dicha teoría escapa de los alcances del presente trabajo. En consecuencia, la apilabilidad no va a depender sólo de las propiedades mecánicas del material, sino también del diseño del objeto que está siendo impreso (tamaño, geometría, etc) y de ciertos parámetros del proceso, como la velocidad de impresión o las dimensiones del cordón de impresión.

1. Introducción al criterio de plastificación de Mohr-Coulomb

Los materiales de base cementicia endurecidos se caracterizan por presentar una resistencia a la compresión significativamente mayor que la resistencia a la tracción a medida que transcurre el tiempo. Sin embargo, en las etapas más tempranas del material en fresco, la resistencia a la compresión es del mismo orden que la resistencia a tracción, comportándose de forma similar a los suelos [4]. Estas diferencias entre las resistencias a tracción y a compresión se ponen acentúan a medida que transcurre el tiempo. En este contexto, el comportamiento mecánico del material en fresco puede interpretarse con la *teoría de Mohr-Coulomb*, de gran aplicación en ingeniería geotécnica [5]. Se trata de un modelo que describe la respuesta de los materiales a tensiones de cizallamiento, así como a la tensión normal σ_n . El diagrama de Mohr para el criterio de *Mohr-Coulomb* en un cierto estado de tensiones se muestra en la figura 4.1. La envolvente a la tangente del círculo de Mohr describe el criterio de fallo plástico.

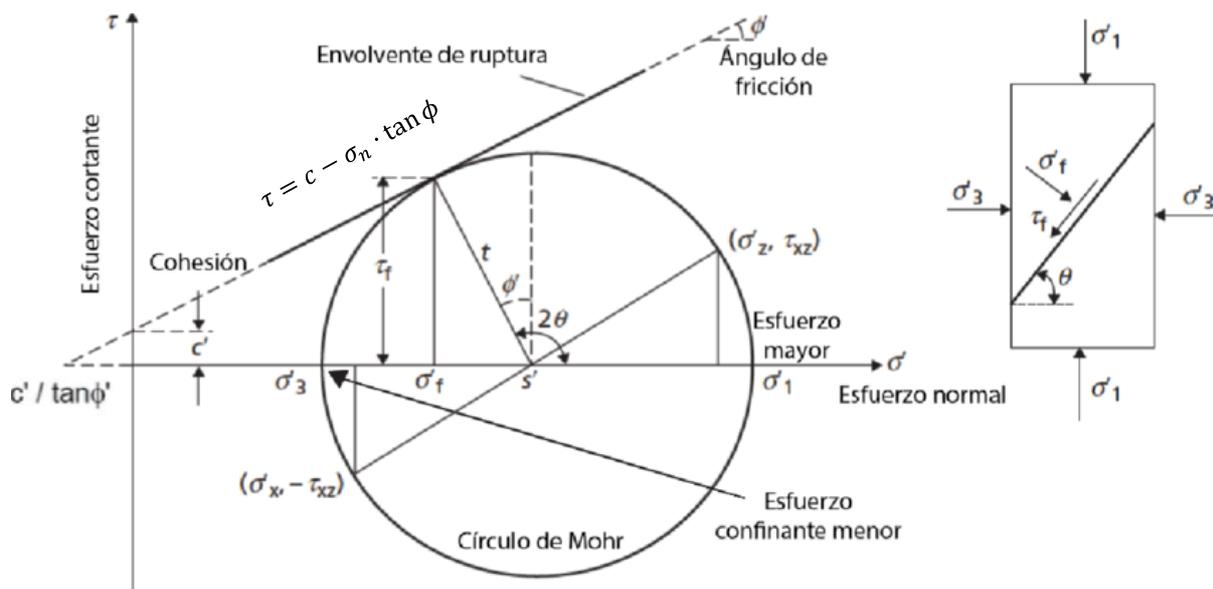


Figura 4.1. Diagrama del criterio de fallo de Mohr-Coulomb para un estado de tensiones plano [5].

En primer lugar, considérese un elemento en equilibrio estático y uniformemente tensionado. El criterio de fallo de *Mohr-Coulomb* puede expresarse analíticamente de la siguiente forma:

$$\tau = c(t) - \sigma_n \cdot \tan \phi(t) \quad (4.1)$$

donde τ es la tensión cortante, $c(t)$ es de cohesión del material, σ_n es la tensión normal y $\phi(t)$ es el ángulo de rozamiento interno del material. La cohesión del material evoluciona a medida que el material en fresco se endurece, es decir, a medida que transcurre el tiempo. Sin embargo, la evolución temporal del ángulo de rozamiento interna es difícil de estimar, y en la mayor parte de los casos se puede considerar constante. De acuerdo con la ecuación 4.1, la resistencia del material ante el esfuerzo cortante es igual a la suma de su cohesión y del término asociado al rozamiento en el plano de rotura. Este término de rozamiento viene dado por el producto de la tensión normal a dicho plano multiplicado por la tangente del ángulo de rozamiento interno del material. El fallo plástico tiene lugar cuando el círculo de Mohr correspondiente a un determinado estado tensional es tangente a la envolvente de fallo, como se muestra en la figura 4.1. A continuación, profundizaremos en el significado físico de cada término de la ecuación:

- **Término de fricción $\sigma_n \cdot \tan \phi$**

Este término depende de varios factores como el tamaño de grano, forma de grano, distribución granulométrica y densidad del material. Cuanto mayor es el tamaño de grano, mayor es el valor del ángulo de rozamiento interno ϕ . Por otro lado, el ángulo de fricción es mayor en materiales compuesto por partículas angulares con la misma forma y tamaño. Al aumentar la densidad relativa de un material poroso, disminuye el índice de poros, y por tanto aumentará el valor de ϕ .

- **Término de cohesión c**

Este parámetro se interpreta como una medida de la adherencia entre las partículas del material, representando la resistencia de corte producida por la cementación del material. Otro término relacionado, es la cohesión aparente, que en los suelos no saturados se relaciona con el efecto de adherencia entre las partículas de suelos generado por el agua de los poros, mediante fuerzas capilares. Dicho efecto desaparece con la saturación del suelo.

Por lo tanto, el material falla por una combinación crítica de esfuerzos normales y esfuerzos cortantes. A continuación, procederemos a reescribir el *criterio de Mohr-Coulomb* en términos de las tensiones principales [4]. En primer lugar, la tensión normal σ_n y la tensión cortante τ pueden escribirse en términos de las tensiones principales ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \cos \phi \quad (4.2)$$

$$\sigma_n = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \sin \phi \quad (4.3)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores y sustituyendo en la ecuación 4.1, el criterio de fallo de Mohr-Coulomb puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\sigma_1 - \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \cdot \sigma_3 = \frac{2 \cdot c}{1 + \sin \phi} \cdot \cos \phi \quad (4.4)$$

Cuando $\sigma_3 = 0$ (compresión uniaxial, σ_c):

$$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 + \sin \phi} = 2 \cdot c \cdot \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (4.5)$$

Alternativamente, cuando $\sigma_1 = 0$ (tracción uniaxial, σ_t):

$$\sigma_3 = \sigma_t = -\frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} = -2 \cdot c \cdot \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4.6)$$

Teniendo esto en cuenta, el criterio de fallo de Mohr-Coulomb puede reescribirse empleando los valores de la resistencia a compresión uniaxial (σ_c) y de la resistencia a tracción uniaxial (σ_t) del material:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = -\frac{\sigma_t}{\sigma_c} + \frac{\sigma_t}{\sigma_3} \quad (4.7)$$

Finalmente, el *criterio de fallo de Mohr-Coulomb* puede expresarse, también, en función de los invariantes de tensiones:

$$\sigma_m \cdot \sin \phi + \sqrt{J_2} \cdot \left(\cos \eta - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sin \eta \cdot \sin \phi \right) - c \cdot \cos \phi = 0 \quad (4.8)$$

Donde σ_m es la tensión hidrostática, J_2 y J_3 son, respectivamente, el segundo y el tercer invariante del tensor desviador y η es el ángulo de Lode.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (4.9)$$

$$J_2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{6} \quad (4.10)$$

$$\sin(3 \cdot \eta) = -\frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot J_3}{2 \cdot (J_2)^{3/2}} \quad (-30^\circ \leq \eta \leq 30^\circ) \quad (4.11)$$

$$J_3 = (\sigma_1 - \sigma_m) \cdot (\sigma_2 - \sigma_m) \cdot (\sigma_3 - \sigma_m) \quad (4.12)$$

Por lo tanto, en el espacio de las tensiones principales, la superficie de fallo del criterio de Mohr-Coulomb, es una pirámide irregular como la mostrada en la figura 4.2.

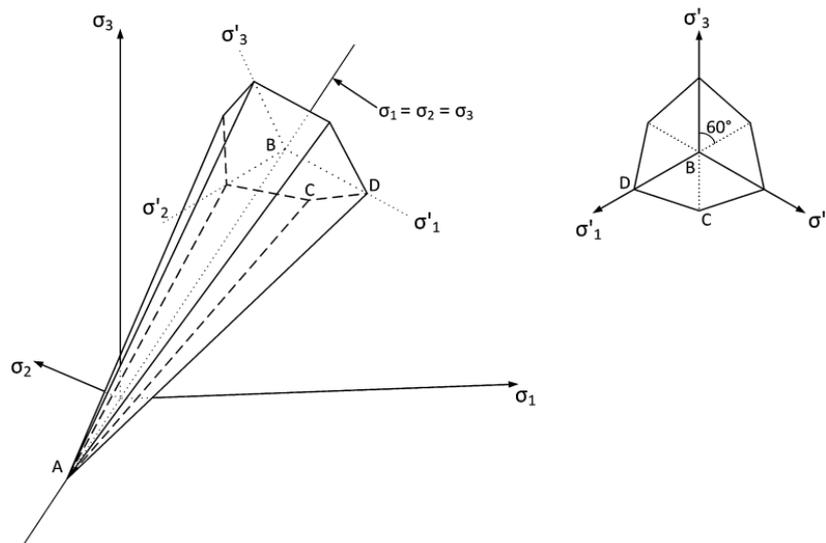


Figura 4.2. Superficie de fallo del criterio de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones principales [6].

1.1. Criterio de plastificación Mohr-Coulomb simplificado: criterio de Tresca y Rankine.

Cuando el ángulo de rozamiento interno es nulo, el criterio de fallo de Mohr-Coulomb se convierte en el criterio de fallo de Tresca (criterio de máxima tensión tangencial). Por otro lado, si el ángulo de rozamiento interno es próximo a los 90° , el criterio de fallo de Mohr-Coulomb se convierte en el criterio de fallo de Rankine (teoría de máxima tensión normal). Como se deduce, estos dos criterios de fallo son casos extremos del criterio de fallo de Mohr-Coulomb [7]. Los correspondientes diagramas de Mohr para los diferentes criterios de fallo se muestran en la figura 4.3.

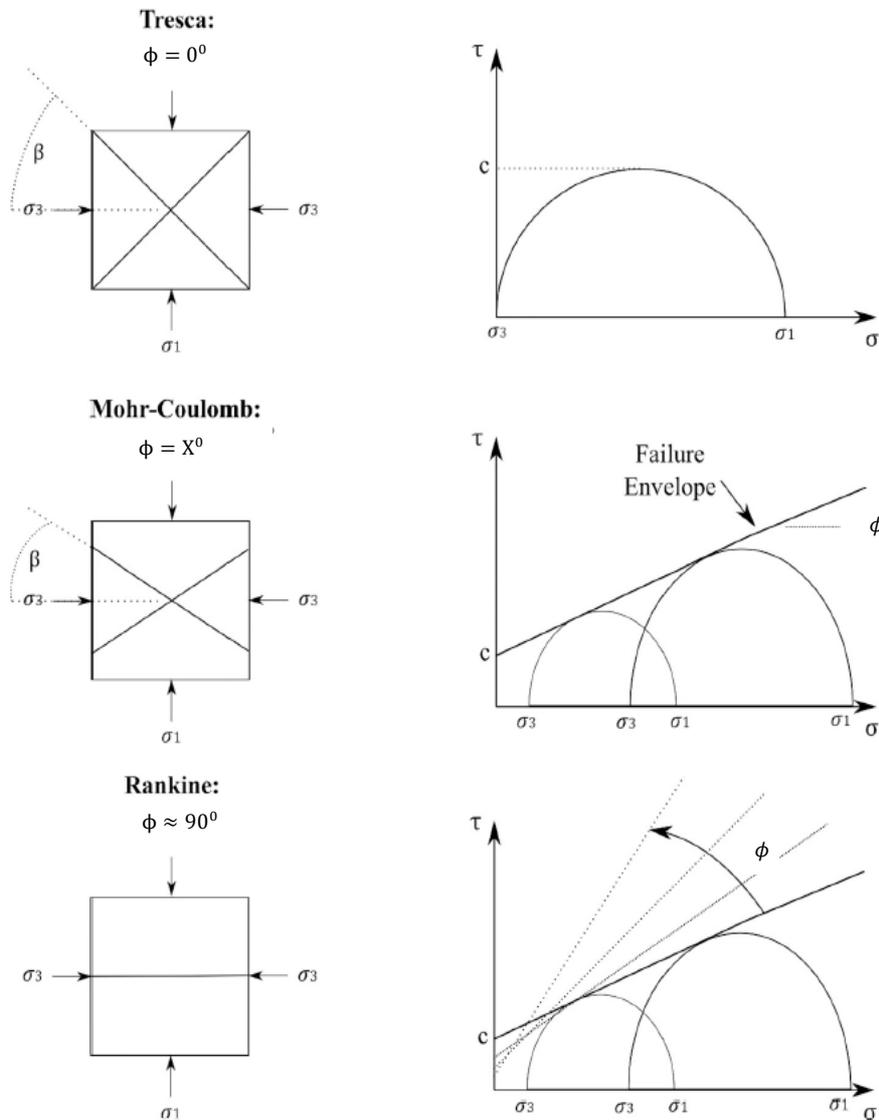


Figura 4.3. Diagrama del criterio de fallo de Tresca, Mohr-Coulomb y Rankine mediante el círculo de Mohr para un estado de tensiones plano [7].

En el caso de la fabricación aditiva, σ_1 es equivalente a las tensiones normales inducidas por el peso propio de las capas de material depositadas. Según el criterio de fallo de Tresca, el plano de fallo a cortadura β es igual a 45° . En consecuencia, si se asume que $\sigma_3 = 0$:

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{\sigma_{aplicada}}{2} \quad (4.13)$$

Por lo tanto, haciendo $\phi = 0$ en la ecuación 4.8, el criterio de plastificación de Tresca se puede escribir:

$$\sqrt{J_2} \cdot \cos \eta = c \quad (4.14)$$

2. Ensayo de compresión uniaxial

El ensayo de compresión simple [8,9] es uno de los ensayos más simples que consiste en aplicar una carga axial sobre una probeta cilíndrica, con una relación altura diámetro de aproximadamente 2:1, hasta que se produzca el fallo del material. En la figura 4.4 se representa el correspondiente círculo de Mohr donde no se considera esfuerzo de confinamiento ($\sigma_3 = 0$). En un ensayo de compresión axial, no existe (o no debiera existir) el rozamiento entre las caras inferior y superior de las probetas y las placas de ensayo. Esto, permite considerar $\sigma_3 = 0$.

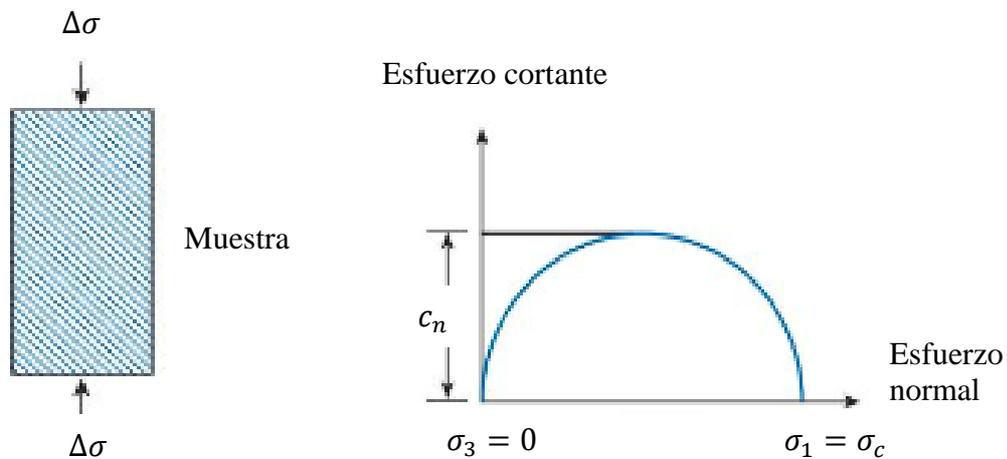


Figura 4.4. Ensayo a compresión simple: a) esfuerzos de la muestra b) Círculo de Mohr [8].

Por lo tanto, la resistencia a compresión viene dada por:

$$\sigma_c = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1 \quad (4.15)$$

En consecuencia, el *modelo de Mohr-Coulomb* se escribe como (ecuación 4.5):

$$\sigma_c = \sigma_1 = \frac{2 \cdot c(t) \cdot \cos \phi}{(1 + \sin \phi)} \quad (4.16)$$

Además, en bastantes casos [8] se puede suponer que el ángulo de rozamiento interno del material es nulo (*criterio de Tresca*), es decir, no existe rozamiento entre partículas ($\phi=0$). Entonces, la expresión anterior se reduce a:

$$\sigma_c = \sigma_1 = 2 \cdot c(t) \quad (4.17)$$

Por lo tanto, la envolvente del *criterio de plastificación de Mohr-Coulomb* es horizontal (figura 4.4.b). De esta manera, se tiene que el valor de la resistencia al cortante se corresponde con la cohesión y es igual a la mitad del valor de la resistencia a la compresión.

$$c = \frac{\sigma_c}{2} \quad (4.18)$$

Como antes se ha indicado, los materiales de base cementicia endurecidos se caracterizan por presentar una resistencia a la compresión significativamente mayor que la resistencia a la tracción a medida que se endurecen. Sin embargo, en los estadios iniciales ambas resistencias son similares aumentando la resistencia a compresión a medida que se endurece el material. En un ensayo a compresión de este tipo de materiales se esperan dos tipos extremos de comportamiento [10]:

- Comportamiento elástico-plástico: deformación de barril
- Comportamiento de rotura por cizalladura

El primer comportamiento es característico del material en fresco en los primeros estadios, mientras que el segundo es característico del material endurecido. Por otro lado, el material en fresco en un estadio intermedio entre los instantes iniciales y el material completamente fraguado presenta un comportamiento intermedio a los dos comportamientos extremos.

Así, mientras las probetas con una edad de minutos muestran una deformación plástica continua que da lugar a un fallo tipo barril (figura 4.5.a), sin la aparición de fisuras a esfuerzos cortantes; las probetas con una edad mayor fallan por la formación de este tipo de fisuras, de forma similar a como lo hace el hormigón endurecido (figura 4.5.b).

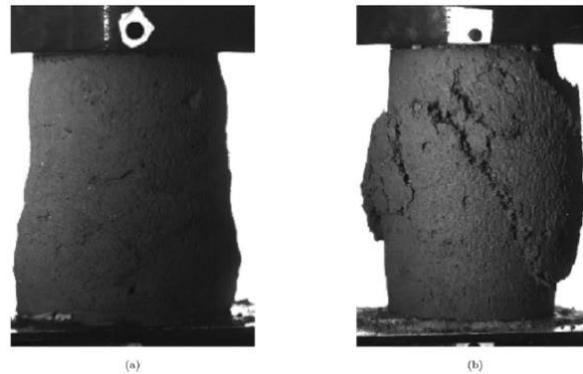


Figura 4.5. Comportamiento mecánico del material en fresco a compresión en diferentes edades: (a) 0 min (b) 420 min [10].

Alternativamente, en la figura 4.6 se muestra la evolución de la resistencia a compresión del mortero en las primeras 20 h, es decir, fuera de edades tempranas cuando el fraguado ya ha comenzado. Se observa que a medida que avanza el tiempo el comportamiento de rotura es esencialmente por cizalladura. Además, la resistencia a la compresión se ajusta a un modelo exponencial de evolución con el tiempo [11].

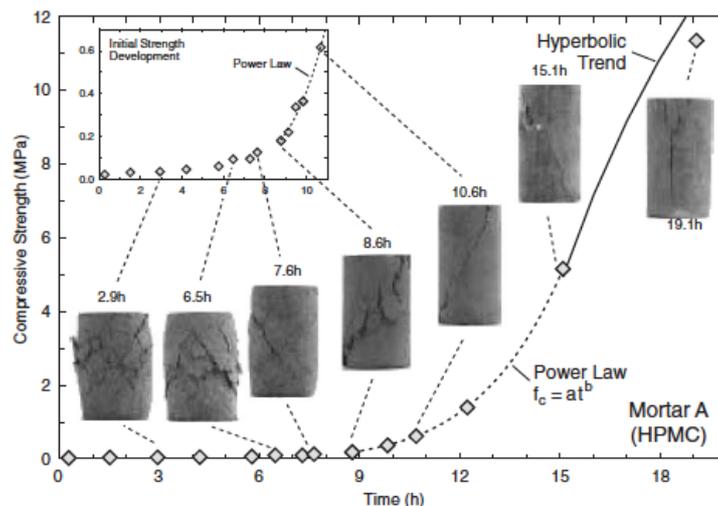


Figura 4.6. Gráfico de evolución del comportamiento mecánico del material en fresco a compresión a partir de las tres horas [11].

Modelos más complejos se han propuesto para el estudio de la evolución de la resistencia a compresión durante los primeros 28 días y *a posteriori* [12].

Referencias

- [1] R.J.M. Wolfs, F.P. Bos, T.A.M. Salet, *Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing*, Cement and Concrete Research, 106, 103–116, 2018.
- [2] R.J.M. Wolfs, F.P. Bos, T.A.M. Salet, *Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing*, Cement and Concrete Composites, 104, 2019.
- [3] J. Kim, E. Sonnenthal, J. Rutqvist, *A modeling and numerical algorithm for thermoporomechanics in multiple porosity media for naturally fractured reservoirs*, 2011.
- [4] J. Knappett, *Craig's Soil Mechanics*, 8^o Ed, CRC Press, 2012.
- [5] H. Jiang, Y. Xie, *A note on the Mohr–Coulomb and Drucker–Prager strength criteria*, Volume 38, 4, 309-314, 2011.
- [6] J. Labuz, A. Zang, *Mohr–Coulomb Failure Criterion*, Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012.
- [7] J. Kruger, S. Zeranka, G. P. A. G. van Zijl, *3D concrete printing: A lower bound analytical model for buildability performance quantification*, Autom. Constr. 106, 2019
- [8] Braja M. Das, *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*, 7^o Edición, Capítulo 1: *Propiedades geotécnicas del suelo*, CENGAGE Learning, 2011.
- [9] L. Casagrande, L. Esposito, C. Menna, D. Asprone, F. Auricchio, *Effect of testing procedures on buildability properties of 3D-printable concrete*, Construction and Building Materials 245, 2020.
- [10] A.V. Rahul, M. Santhanam, *Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates*, Cement and Concrete Composites 109, 2020.
- [11] T. Voigta T. Malonn S. P. Shahc, *Green and early age compressive strength of extruded cement mortar monitored with compression tests and ultrasonic techniques*, Cement and Concrete Research, Volume 36, 5, 858-867, 2006.
- [12] R. Castaño Álvarez, I. Calderon-Uriszar-Aldaca, I. Marcos, *Applicability of existing models for the strength development of 3D-printed thixotropic concretes during hardening*, Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2021.

Capítulo 5

Diseño experimental para la caracterización del material en fresco

En este quinto capítulo se describen los métodos experimentales para la medición y caracterización de las propiedades mecánicas y reológicas del material en fresco mediante ensayos reológicos, ensayos de aguja Vicat y ensayos de compresión no confinada. Estos ensayos son necesarios para caracterizar la evolución de las propiedades mecánicas del material en edades tempranas. Además, a partir de esta caracterización se puede predecir el fallo plástico mediante el *criterio de fallo de Mohr-Coulomb*, además de calibrar los correspondientes modelos de elementos finitos para el análisis del fallo por pandeo de la pieza impresa. Dada la ausencia de ensayos normalizados, en lo relativo a la caracterización mecánica de materiales en fresco de base cemento, es necesario el diseño de un protocolo adecuado de ensayo. Además, resulta de gran interés establecer correlación entre los diferentes ensayos de caracterización del material en fresco.

1. Ensayo reológico mediante reómetro

Una de las características de los ensayos reológicos mediante reómetro es la gran variabilidad que se observa al comparar los resultados dados por diferentes reómetros [1]. Esta gran discrepancia no supone un problema de precisión, sino que se debe a las diferentes geometrías y diseños de los reómetros (condiciones de contorno). Además, del hecho de que cuanto mayor sean las dimensiones del reómetro, menor es la precisión, ya que los parámetros reológicos están muy influidos por las propiedades del contorno. También influye la naturaleza de los materiales que se ensayan. En el caso de morteros, las materias primas presentes, como la arena, la microsíllice o el cemento, son difícilmente reproducibles, por lo que se obtiene una gran variabilidad en las mediciones.

La caracterización reológica del material se lleva a cabo mediante el reómetro rotatorio de palas *Viskomat XL* (figura 5.1) [2]. Se trata de un reómetro giratorio que se utiliza en la caracterización de pastas, morteros y hormigones con tamaño de partícula de hasta 8 mm. En este equipo se puede seleccionar una velocidad de ensayo de hasta 80 rpm en sentido horario o antihorario. El volumen del vaso de ensayo es de 3,5 l, con un volumen útil de muestra de 3 litros. El reómetro cuenta con una sonda circular para el ensayo (figura 5.1).

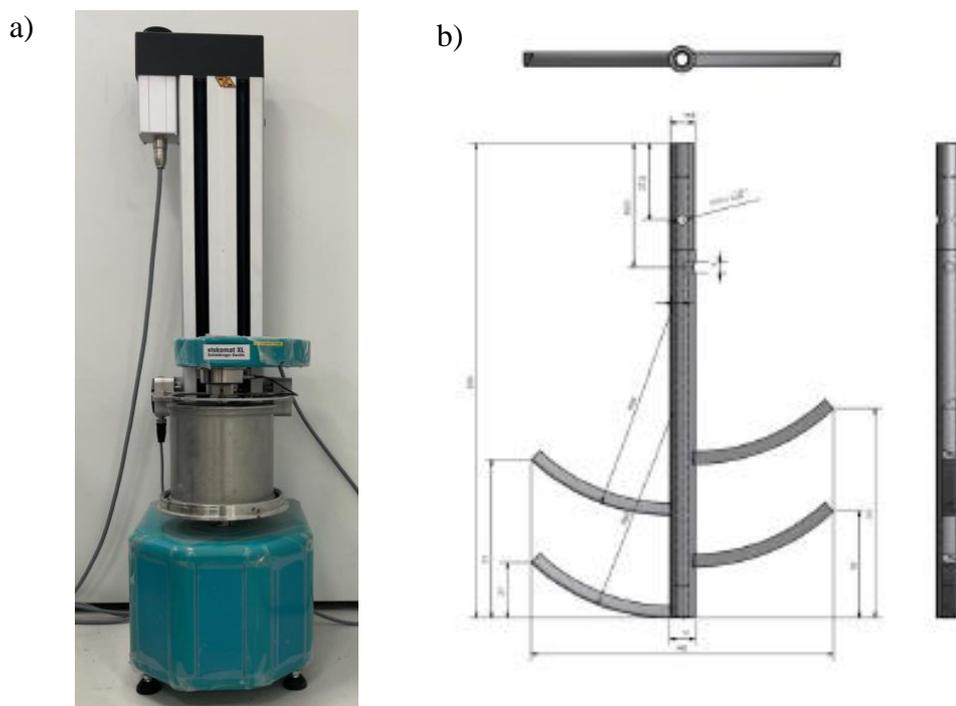


Figura 5.1. a) Reómetro *Viskomat XL*. b) Geometría de la sonda de ensayo [2].

El ensayo reológico seleccionado para el material en fresco se basa en la selección de un barrido de velocidades de pulso escalonado, tal como se muestre en la figura 5.2. Por lo tanto, el ciclo de velocidades aplicado se divide en una serie de pasos de 3 min cada uno, a una velocidad de cizallamiento de 50 rpm. Esto permite eliminar el historial de cizallamiento del material. La elección de la velocidad de cizallamiento (parámetro de control) se realiza con el fin de evitar límites demasiado bajos que podrían no ser suficientes para iniciar el flujo o demasiado altos que podrían provocar la dispersión de la muestra. De esta manera, durante el ensayo el recipiente cilíndrico rota según la velocidad seleccionada. La muestra en el interior del recipiente arrastra consigo la sonda de ensayo, provista de un sensor que permite registrar el par (figura 5.1b).

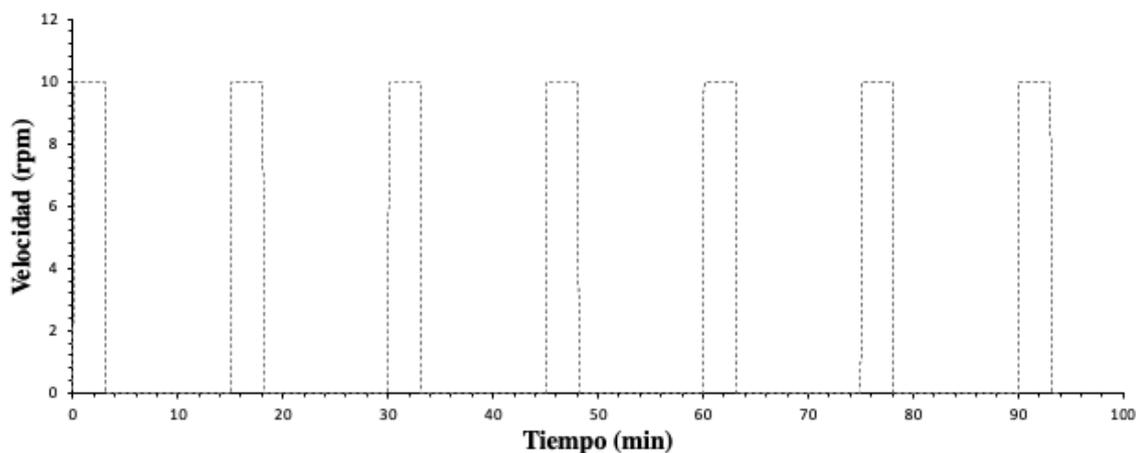


Figura 5.2. Barrido de velocidades relativo al ensayo reológico.

Al establecer un procedimiento de ensayo a velocidad de cizalla constante en cada pulso se puede hallar el límite de fluencia estático y dinámico (capítulo 4). Cuando se alcanza un determinado valor de velocidad de cizallamiento partiendo de las condiciones de reposo, el par llega a un valor máximo y luego disminuye hasta un valor de equilibrio. De esta forma, ese valor máximo del torque se relaciona con el límite de fluencia estático y el par de equilibrio con el límite de fluencia dinámico.

2. Ensayos mediante aguja Vicat

Mediante el ensayo de la aguja Vicat se pretende determinar el tiempo de fraguado inicial y final de un material en base cemento (Portland). El ensayo se basa en medir la resistencia a la penetración de una probeta de muestra cuando la aguja penetra una cierta distancia (2



cm). De esta forma se registra la resistencia de penetración a diferentes intervalos de tiempo. En la figura 5.3 se muestra el patrón de penetraciones realizados sobre la probeta de material. De esta manera debe existir al menos una separación mínima de 15 mm entre ellas. El ensayo mediante aguja Vicat realizado en este trabajo no se ajusta a ningún procedimiento normalizado, dado que tiene un carácter cualitativo en lo relativo a la caracterización del material de impresión.

Figura 5.3. Probeta ensayo Vicat.



3. Diseño de un protocolo de ensayo uniaxial

Dada la ausencia de ensayos normalizados para la caracterización de materiales en base cemento en estado fresco, es necesario desarrollar un protocolo de ensayo para la caracterización mecánica del material. A este fin, el diseño experimental se inspira en los protocolos de ensayos normalizados de geotecnia [3,4], en los ensayos normalizados de hormigón endurecido [5,6] y en los recientes estudios de caracterización mecánica de morteros para impresión en 3D [7,8,9]. Además, a lo largo del diseño se tiene en cuenta la sensibilidad del material en fresco ante cualquier perturbación externa, tanto en el diseño del molde, como en el proceso de medida. Por ello, se hace necesario en el presente trabajo, diseñar un protocolo de ensayo para la caracterización mecánica del material mediante un ensayo a compresión simple. Con este ensayo se pretende determinar tres parámetros mecánicos: módulo de elasticidad, resistencia a compresión y coeficiente de Poisson. Finalmente, se quiere definir el criterio de fallo plástico del material en fresco mediante el empleo del modelo de Mohr-Coulomb detallado en el capítulo anterior.

3.1. Terminología

A continuación, se definen los siguientes términos relativos al ensayo:

- *Módulo de elasticidad*: módulo de Young (E). Debido a que el comportamiento del material no es perfectamente lineal, se desechan la parte inicial del ensayo y la final, teniendo en cuenta solo la parte central elástica del ensayo. Por lo tanto, se debe tomar como módulo de elasticidad la pendiente de la gráfica esfuerzo-deformación entre $\varepsilon_l = 3\%$ y $\varepsilon_l = 5\%$.

$$E = \frac{\sigma_{0,05} - \sigma_{0,03}}{\varepsilon_{0,05} - \varepsilon_{0,03}} \quad (5.1)$$

- *Resistencia a la compresión no confinada (σ_c)*: se define como la tensión máxima de compresión (carga máxima de rotura) a la que una muestra cilíndrica no confinada falla en un ensayo a compresión simple.
- *Coficiente de Poisson (ν)*: se define como el cociente entre la deformación transversal ε_t y la deformación axial cambiado de signo ε_l . Por las mismas razones que en el caso del módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson se define como:

$$\nu = - \frac{\varepsilon_t(0,05-0,03)}{\varepsilon_{0,05} - \varepsilon_{0,03}} \quad (5.2)$$

3.2. Equipo de compresión

En la figura 5.4 se muestra un diagrama de la disposición de los diferentes componentes del dispositivo experimental.

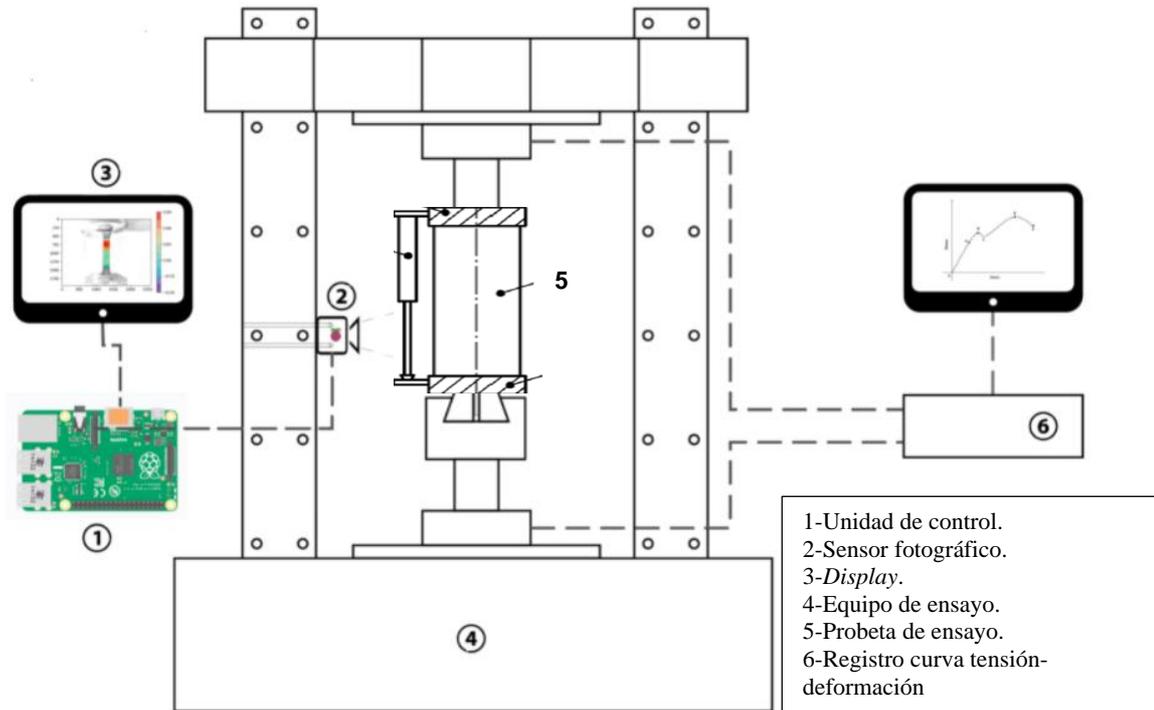


Figura 5.4. Diagrama esquemático del equipo de ensayo, incluyendo la máquina de ensayo a compresión y el sistema de análisis óptico [10].

Los materiales en fresco de base cemento son extremadamente sensibles ante cualquier perturbación que pueda modificar el estado de tensiones, y por lo tanto pueden proporcionar resultados erróneos. Por ello, la medida de la deformación transversal para determinar el coeficiente de Poisson no se puede llevar a cabo mediante el uso de galgas extensiométricas. A este efecto, se recurre a métodos no destructivos de correlación de imágenes [10]. En la figura 5.4 se muestra de forma esquemática el diseño del sistema de análisis óptico dentro del dispositivo experimental. La toma de imágenes se lleva a cabo mediante el sensor fotográfico, *Logitech C270 Webcam HD, 720p/30fps* (resolución de 1K).

3.3. Procedimiento experimental de ensayo

En la sección anterior se expuso los aspectos generales del equipo de ensayo. Ahora, se describe en profundidad el procedimiento general de ensayo a compresión.

Requisitos generales de las probetas (Apéndice 2)

Se utilizan probetas cilíndricas de dimensiones 70 mm x 140 mm con una relación diámetro/altura igual a dos. Las dimensiones son lo suficientemente grandes para reducir la influencia de los defectos presentes en la probeta, y lo suficientemente pequeñas respecto a las probetas de hormigón endurecido para disponer de una cantidad de muestra reproducible. Los moldes constan de dos partes que se puede acoplar entre si. En el apéndice 2 se muestra el diseño del correspondiente molde (Figura 5.3), los cuales se fabrican mediante impresión en 3D con PLA (altura de 140 mm y diámetro interior de 70 mm). La probeta completa requiere de una pequeña placa de acero circular de diámetro 80 mm y altura 1 mm que se debe colocar en la base del molde cilíndrico.

Protocolo de amasada



Se deben mezclar todos los componentes de la mezcla en una amasadora. La secuencia de amasado es la misma para todas las muestras, utilizando una amasadora de capacidad 5,5 l (Figura 5.5). En primer lugar, se vierten los sólidos de la dosificación seleccionada, los cuales se mezclan durante un minuto. A continuación, se añaden los líquidos (agua y aditivos líquidos) y se mezclan todos los componentes durante un minuto. Finalmente, la mezcla completa de los componentes se obtiene continuando el proceso de mezcla en la amasadora durante seis minutos más. Dentro de estos seis minutos de amasada los tres primeros se llevan a cabo a una velocidad de rotación superior a los tres minutos siguientes. Una vez finalizado el proceso de amasada, el material en fresco se recoge para la preparación de las probetas de ensayo.

Figura 5.5. Amasadora de capacidad 5,5 l.

Preparación de las probetas

El procedimiento para la preparación de las probetas del material en fresco requiere de una serie de etapas en las cuales hay que extremar el cuidado, dado la sensibilidad del material. En primer lugar, se deben ensamblar los moldes semicilíndricos. Además, se debe colocar en la parte inferior del molde modular una pletina de acero de las mismas dimensiones que la base del molde. La placa de acero se debe cubrir con un film de polipropileno, evitando así tensiones de cizalladura como consecuencia del rozamiento entre la muestra y la placa de acero. Finalmente, el molde completo se ensambla mediante cinta adhesiva como se muestra en la figura 5.6. De esta forma, se facilita el desmoldeo al cortar la cinta adhesiva. A continuación, las superficies internas del molde se recubren con un agente desmoldeante, lo cual facilita el posterior desmoldeo y evita cualquier perturbación de la muestra durante su desmoldeo. La probeta se llena con el material en fresco procedente de la amasada y se compacta con una barra de picado de acero. El molde se llena en 4-5 capas, de tal manera que se deben dar golpes uniformes hasta compactar el material (alternativa: mesa de sacudidas con n sacudidas o mediante vibración a frecuencia de 40 Hz).

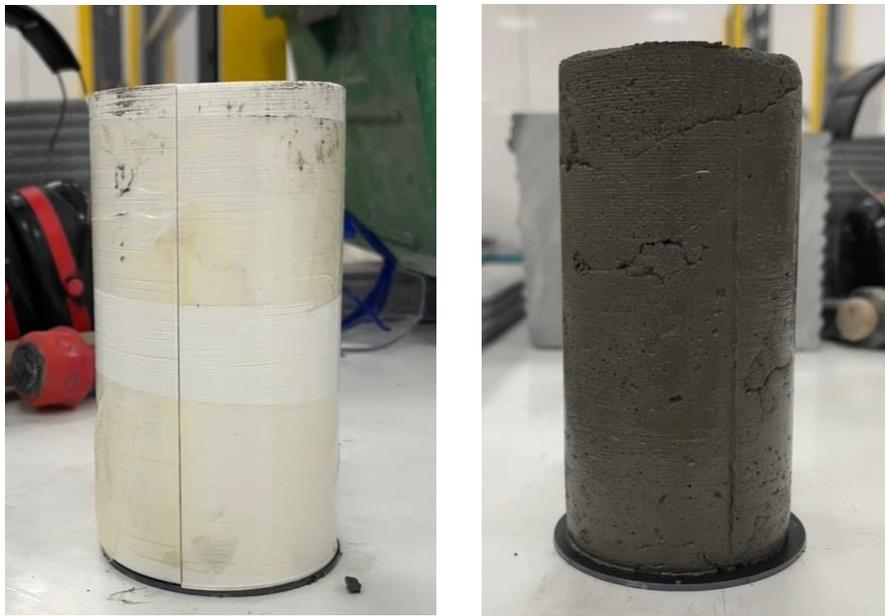


Figura 5.6. En la figura de la izquierda se muestra el molde ensamblado con los dos semicilindros y la placa inferior. En la figura de la derecha se observa la muestra de ensayo asentada sobre la placa inferior tras retirar el molde de PLA.

Tras enrasar la superficie superior con una llana, el material no es perturbado hasta que se desmoldea justamente antes del ensayo. En consecuencia, se toma este tiempo como el tiempo cero a efectos de determinación de la edad de cada probeta. En el momento del ensayo, se debe colocar la probeta en el equipo de manera que esté colineal con respecto a las pletinas superior e inferior de la máquina de ensayo. Dado que la parte superior del molde se encuentra libre, la pletina superior de la máquina de ensayo se cubre con un film de polipropileno, de la misma manera que la pletina de acero del molde. De esta forma, se pretende conseguir, prácticamente, condiciones de cero fricciones. Durante todo el proceso, se debe evitar en lo posible manipular la muestra. Justamente antes del ensayo, la muestra se desmoldea con cuidado, de tal forma que se corta la cinta adhesiva y con cuidado se retiran cada uno de los semicilindros del molde. Tras el desmoldeo, la probeta debe presentar un aspecto tal y como se muestra en la figura 5.6. Finalmente, se debe colocar colineal eje longitudinal de la máquina de ensayo, con cuidado de no deformar la probeta.

Ensayo a compresión. Toma de datos experimentales

Tras preparar la muestra se debe calibrar la máquina de ensayo a compresión (*ibertest*) de acuerdo con las características del material en cada momento (figura 5.7).

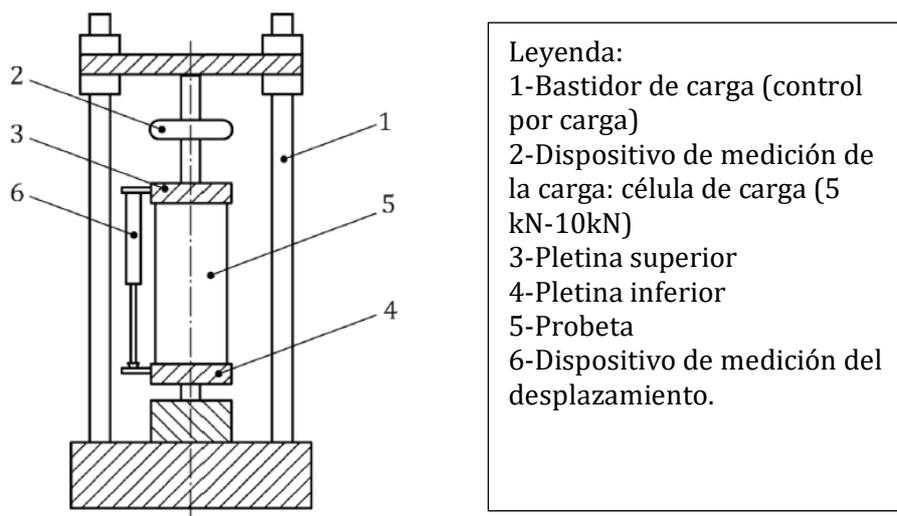


Figura 5.7. Equipo para ensayo de compresión [4].

Los parámetros óptimos de ensayo que se deben seleccionar son los siguientes:

- La **velocidad de ensayo** controlado por desplazamiento debe ser de 50 mm/min. De esta manera, se consigue que la duración del ensayo sea de entorno a un minuto.
- **Precarga aplicada** de aproximadamente 1 N. Nunca debe ser superior al 30% de la carga de rotura.
- El **porcentaje de compresión para identificación de rotura** debe ser aproximadamente del 50-60 %, en función de la edad de la muestra. Con ello se consigue observar, tanto la región elástica, como plástica de deformación del material.
- Una **célula de carga** de 500 N es suficiente para el orden de magnitud de las fuerzas necesarias para deformar el material en fresco.

Se realizan mediadas de carga y desplazamiento a los tiempos 5, 15, 30, 45, 60 y 90 minutos. Como se ha comentado, se toma como referencia de tiempo cero, el instante en el que finaliza la introducción del material en la probeta. Además, se deben tomar de 5-6 muestras de diferentes amasadas para cada instante de tiempo (variabilidad).

Cálculos

A partir de los datos de experimentales se deben obtener los tres parámetros mecánicos de interés: módulo de elasticidad, resistencia de compresión y coeficiente de Poisson.

- Cálculo de la deformación axial:

$$\epsilon_l = \Delta L / L_0 \quad (5.3)$$

Donde L_0 es la altura inicial de la probeta y ΔL es la diferencia entre la altura final y la altura inicial.

- Cálculo de la sección transversal. Corrección de área.

Mediante un análisis de correlación de imágenes se puede determinar el área transversal en cada instante del ensayo A_i . Debido a las características del ensayo y las altas deformaciones que sufren las probetas, se hace muy difícil definir correctamente la sección transversal. Por ello, en este ensayo tomaremos como sección transversal una sección circular de diámetro el promedio de los diámetros

de la probeta al 25%, 50% y 75% de la altura. Estos diámetros son hallados a partir de la correlación de imágenes digitales del ensayo.

- Cálculo de la tensión a compresión real o verdadera.

$$\sigma = F/A_i \quad (5.4)$$

Donde A_i es el área real de la probeta y F es la fuerza aplicada por la célula de carga.

- Cálculo de la resistencia a compresión.

$$\sigma = F_m/A_i \quad (5.5)$$

Donde A_i es el área real de la probeta y F_m es la carga máxima de rotura.

- Cálculo del módulo de elasticidad. Se debe tomar como módulo de elasticidad la pendiente de la gráfica esfuerzo-deformación entre $\varepsilon_l = 3\%$ y $\varepsilon_l = 5\%$ (ecuación 5.1).
- Cálculo del coeficiente de Poisson. Para ese cálculo se toma aproximadamente el 3-5% de desplazamiento que se corresponde con el rango lineal (ecuación 5.2).

4. Correlaciones de Imágenes Digitales (DIC)

La Correlación de Imágenes Digitales (DIC) [10,11] es un método que permite estimar los campos de desplazamientos y las deformaciones de estructuras o materiales sometidos a una carga mecánica mediante la comparación de secuencias temporales de imágenes digitales adquiridas durante el proceso de carga y deformación. La DIC se puede emplear en dos dimensiones (2D) o tres dimensiones (3D o DIC estéreo). En cuanto al análisis en dos dimensiones (2D DIC) se emplea una única cámara fija y se estiman los desplazamientos y deformaciones en un plano seleccionado mediante transformaciones lineales. En este caso, el plano de la imagen y el plano de deformaciones deben mantenerse paralelos y fijos durante la adquisición de todas las imágenes.

Se estima que desplazamientos significativos de hasta 5 grados con respecto a la condición de paralelismo tienen un efecto aproximado de 0,5% en los desplazamientos estimados. Desde un punto de vista algorítmico, existen dos aproximaciones:

- El DIC basado en subconjuntos (DIC local): el DIC local estima los campos de desplazamiento y deformación correlacionando cada subregión del área de interés en diferentes etapas de deformación con la correspondiente subregión en la etapa de referencia. Así, el DIC local procesa cada nodo de la malla de cálculo de forma independiente, sin imponer una continuidad de desplazamiento a los campos de desplazamiento globales.
- El DIC basado en elementos finitos (DIC global): el DIC global se basa en discretizar el AOI especificado con una malla de elementos finitos (FE) y luego rastrea todos estos elementos en la imagen objetivo simultáneamente. De esta manera, la continuidad de desplazamiento puede ser explícitamente asegurada entre elementos adyacentes por los nodos compartidos de la malla FE.

En la actualidad, existen varias soluciones de software DIC, tanto comerciales como de código abierto. En la tabla 5.1 se resumen las características de varios códigos gratuitos DIC de investigación (Open-source Digital Image Correlation (DIC) software).

Tabla 5.1. Open-source Digital Image Correlation (DIC) software.

Software	2D/3D	Aproximación	Lenguaje	SO	Repositorio
GOM 2D	2D	Local/Global	~	Windows	https://www.gom.com/en/products/
DICe	2D/3D	Local/Global	C++	Multiplataforma	https://github.com/dicengine/dice
dolphin_dic	2D/3D	Global	Python	Multiplataforma	https://bitbucket.org/mgenet/dolphin_dic/src/master/
Ncorr	2D	Local	Matlab	Linux/Windows	https://github.com/justinblaber/ncorr_2D_matlab
pydic	2D	Local	Python	Multiplataforma	https://gitlab.com/damien.andre/pydic
pyxel	2D	Global	Python	Multiplataforma	https://github.com/jcpassieux/pyxel
py2DIC	2D	Local	Python	Multiplataforma	http://github.com/Geod-Geom/py2DIC/
YaDICs	2D/3D	Local/Global	C++	Linux	http://yadics.univ-lille1.fr/wordpress/



Referencias

- [1] C. F. Ferraris and N. S. Martys, *Relating fresh concrete viscosity measurements from different rheometers*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., vol. 108, 3, 229–234, 2003.
- [2] Viskomat XL. Recuperado de <http://www.rheologysolutions.com/viskomat-xl/>. Febrero de 2020
- [3] ASTM D2166-06, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, 2010.
- [4] UNE-EN-ISO-17892-7:2019, Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 7: Ensayo de compresión no confinada. (ISO 17892-7:2017), 2019.
- [5] UNE-EN 12390-1:2020, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes, 2020.
- [6] UNE-EN 12390-2:2020, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia, 2020.
- [7] R. J. M. Wolfs, F.P. Bos, T. A. M. Salet, *Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete*, Construction and Building Materials, Volume 181, 447-454, 2018.
- [8] A. V. Rahul, M. Santhanman, *Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates*, Volume 109, 2020.
- [9] R. J. M. Wolfs, F.P. Bos, T. A. M. Salet, *Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing*, Cement and Concrete Composites, Volume 104, 2019.
- [10] P. P. Das, et al., *RealPi2dDIC: A Low-cost and open-source approach to in situ 2D Digital Image Correlation (DIC) applications*, SoftwareX, 13, 2021.
- [11] V. Belloni, R. Ravanelli, A. Nascetti, M. Di Rita, D. Mattei, M. Crespi, *py2DIC: A New Free and Open Source Software for Displacement and Strain Measurements in the Field of Experimental Mechanics*, MDPI, 19(18), 2019.

Capítulo 6

Resultados experimentales y discusión

En este último capítulo se exponen los resultados experimentales relativos a los ensayos mecánicos y reológicos del material en estado fresco. Así como estudios de correlación con los ensayos de aguja Vicat. La realización de los experimentos se basa en los procedimientos de ensayo descritos en el capítulo 5: ensayo a compresión, reológico y de aguja Vicat.

1. Materiales y dosificación de las muestras de ensayo

Para la caracterización de material imprimible se han diseñado diferentes mezclas basadas en CEM I 52.5. En particular, la dosificación elegida para el presente trabajo se presenta en la tabla 6.1. Empíricamente, se ha comprobado que esta dosificación cumple las características de un material imprimible. Para las amasadas de los ensayos, los datos de la tabla se particularizan para un volumen de amasadora de 5,5 l.

Tabla 6.1. Dosificación de las muestras de ensayo.

<i>Material</i>	<i>Contenido</i>
<i>Cemento Tipo I 52,5 R</i>	700 kg/m ³ -hormigón
<i>Arena silícea (0-0,7 mm)</i>	1215 kg/m ³ -hormigón
<i>Microsílice</i>	70 kg/m ³ -hormigón
<i>Filler calizo</i>	146 kg/m ³ -hormigón
<i>Modificadores de comportamiento reológico y reductores de agua (% en peso de cemento)</i>	3,2 %
<i>Agua/Cemento (peso)</i>	0,325

2. Resultados del ensayo a compresión simple

A continuación, se muestran las gráficas esfuerzo deformación del ensayo a compresión simple de las diferentes probetas del material descrito en la tabla 6.1. Las gráficas de fuerza aplicada frente al desplazamiento de la célula de carga se muestran en el apéndice 3. Estas gráficas se obtienen directamente, a partir de los datos registrados por la máquina de ensayos (*ibertest*). A partir de estos datos de correlación de imágenes digitales se obtiene las gráficas de esfuerzo-deformación para cada ensayo. En cada tanda de ensayo relativo a la misma amasada se procede tal y como se indica en el capítulo anterior. Como se ha comentado anteriormente, las dimensiones de la sección transversal varían a lo largo del ensayo como consecuencia de la deformación plástica de la probeta en el eje horizontal. A este fin, mediante la correlación de imágenes 2D se toma el diámetro de la probeta a tres alturas: 25%, 50%, 75% de la altura inicial de la probeta (figura 6.1). De esta forma, se toma como aproximación a la sección transversal de la muestra, una sección circular de diámetro promediado. Los datos de calibración del sistema de correlación de imágenes están disponibles en el apéndice 4. En la figura 6.1.a se muestra el análisis de las deformaciones que experimenta la probeta mediante el software GOM 2D [1], y en la figura 6.1.b se muestran de forma gráfica las deformaciones proporcionadas por el software.

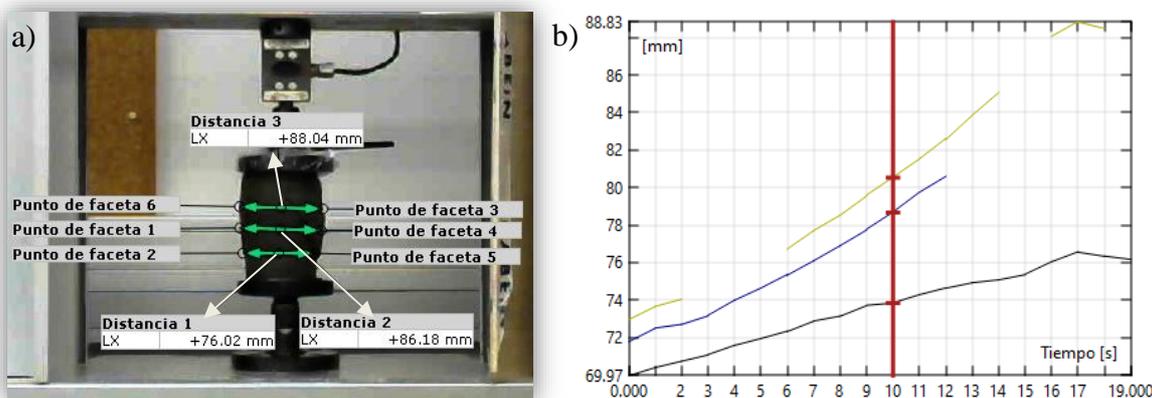


Figura 6.1. a) Imagen del ensayo a compresión analizada mediante el software de correlación de imágenes GOM 2D [1]. b) Gráfica de las deformaciones frente al tiempo de ensayo para las tres distancias seleccionadas: Distancia 1 (negro), Distancia 2 (azul), Distancia 3 (verde).

Dado que en los estadios iniciales del material en fresco las deformaciones son significativa, no podemos tomar como altura inicial la altura de la probeta. Se distinguen dos causas:

- Asentamiento debido a su propio peso al desmoldear la muestra.
- Precarga aplicada en el instante inicial del ensayo (1 N).

Por lo tanto, también se debe estimar mediante correlación de imágenes la altura inicial de la probeta (L_0). Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, a continuación, se muestran las gráficas tensión-deformación del material en fresco para diferentes amasadas (ensayos) relativas a la misma dosificación. Únicamente se representa el tramo de deformación del 0 % hasta el 30 %. A partir de este valor las muestras experimentarían una deformación significativa que hace inviable calcular las deformaciones mediante el software de análisis de imágenes. Tal como se observa en las figuras 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, el comportamiento mecánico del material en estado fresco varía en el intervalo comprendido entre los 0 y los 90 minutos. Las tensiones máximas aumentan con la edad del material. En todas las muestras, inicialmente, la carga aumenta de forma lineal con la deformación axial. Después de esta primera fase, el aumento de la tensión disminuye a medida que aumenta la deformación. Las muestras de menor edad ($t = 5, 15$ y 30 minutos) muestran un incremento de la tensión con el desplazamiento hasta alcanzar una zona de meseta. Las muestras de mayor edad ($t = 45, 60$ y 90 minutos), por el contrario, muestran un descenso de la tensión tras el valor máximo. Además, se puede observar la variabilidad de las propiedades mecánicas del material en las diferentes amasadas.

▪ **Ensayo 1**

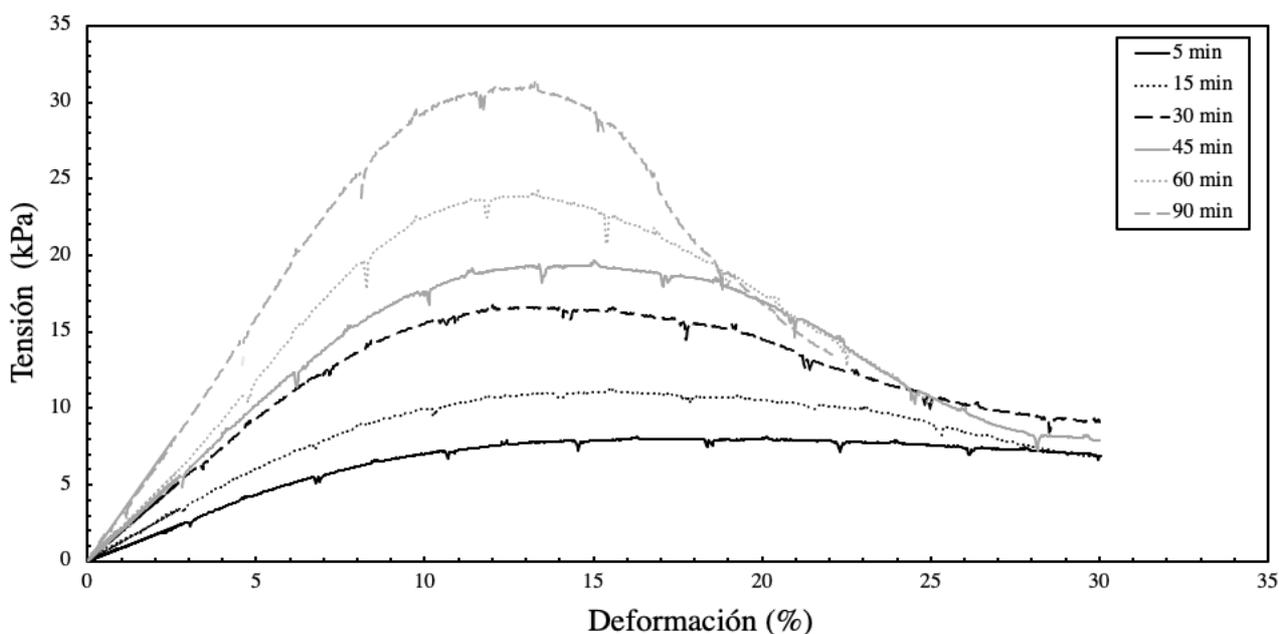


Figura 6.2. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 1.

▪ **Ensayo 2**

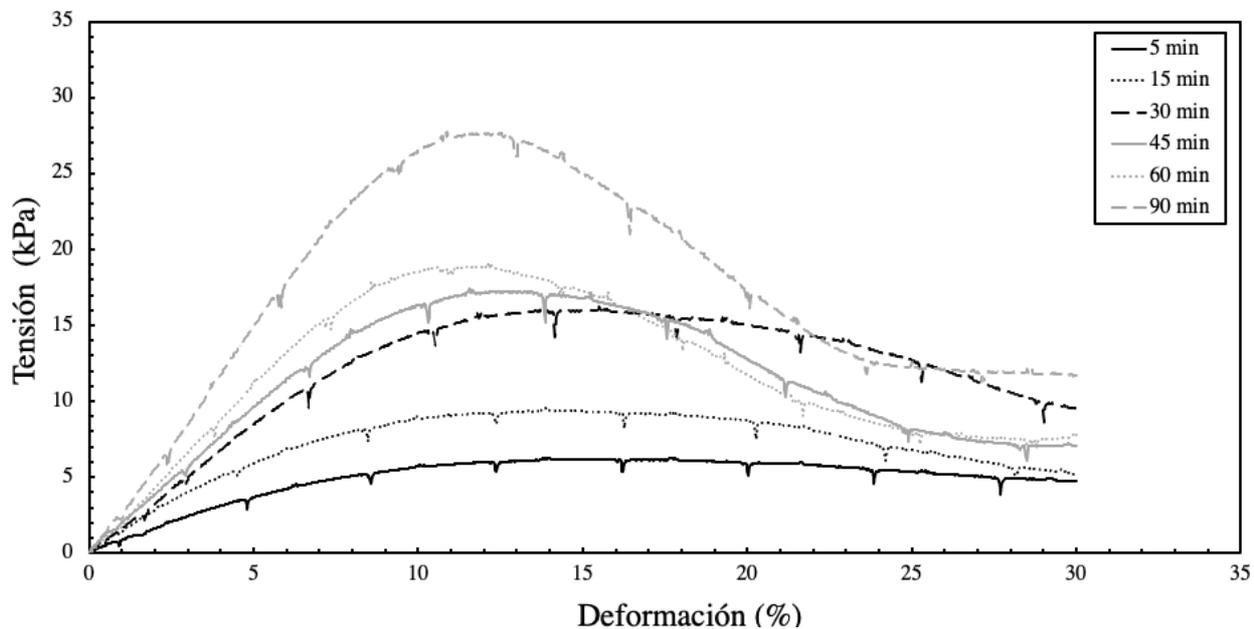


Figura 6.3. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 2.

▪ **Ensayo 3**

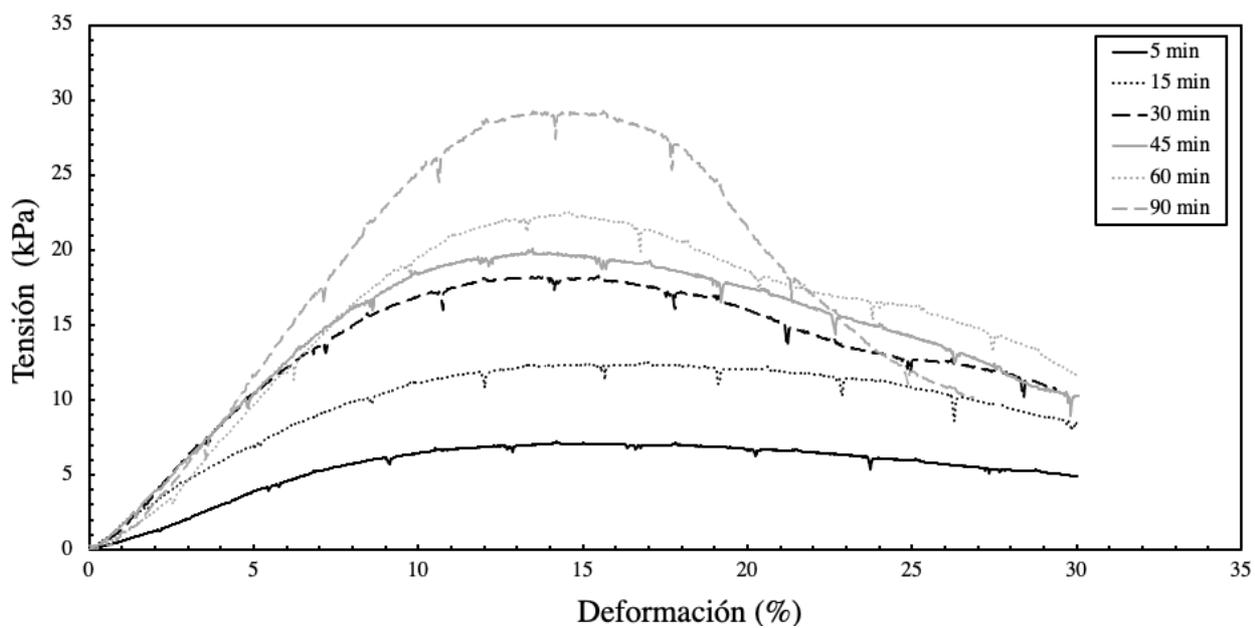


Figura 6.4. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 3.



▪ **Ensayo 4**

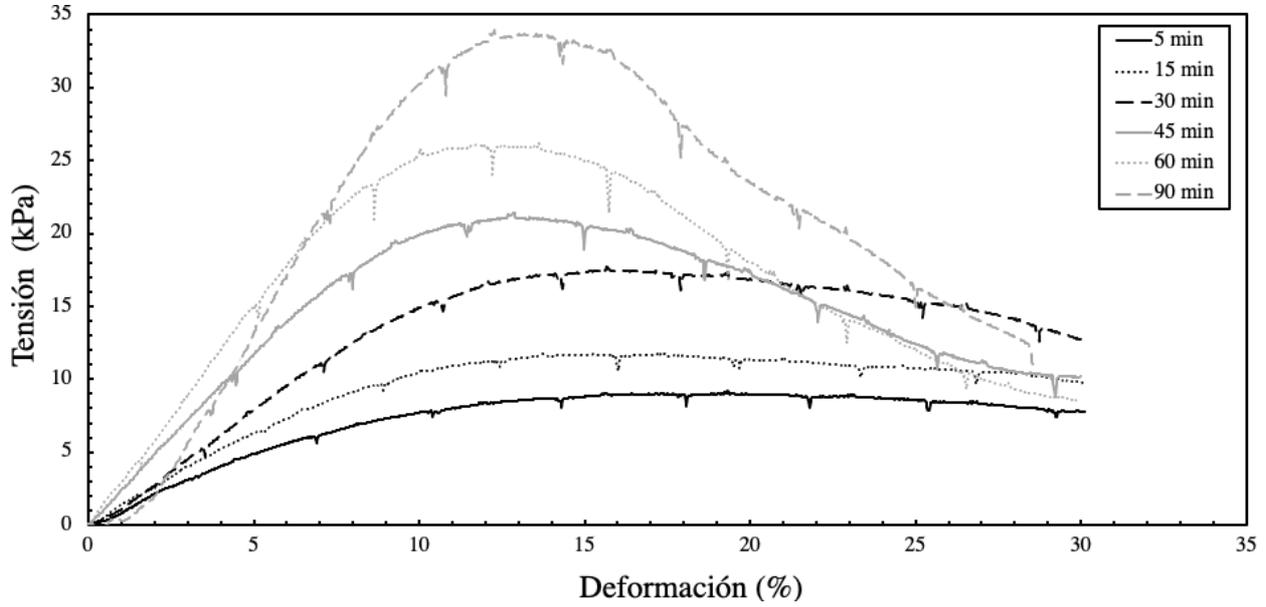


Figura 6.5. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 4.

▪ **Ensayo 5**

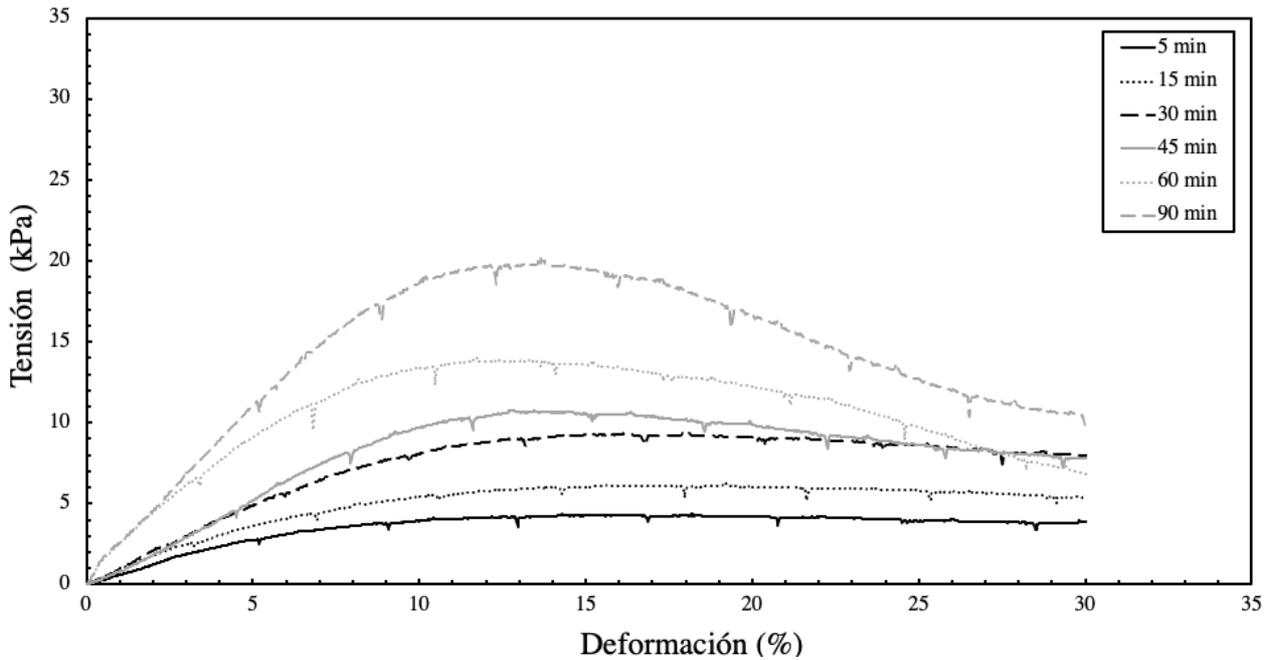


Figura 6.6. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 5.

▪ **Ensayo 6**

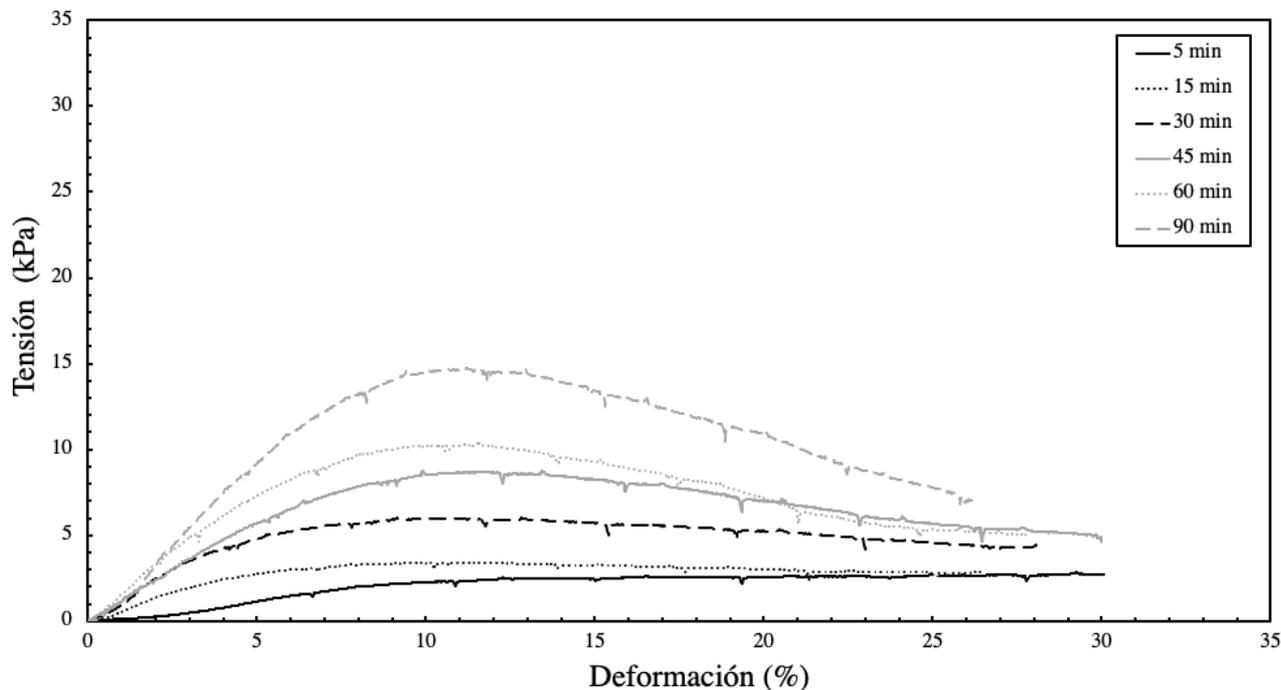


Figura 6.7. Gráfica tensión deformación relativa a la amasada 6.

La diferencia entre ambos tipos de comportamiento de las muestras a diferente edad se debe a las deformaciones laterales y al diferente comportamiento frente al fallo. La baja rigidez del material con menor edad hace que se deforme lateralmente de manera significativa durante el ensayo y la muestra falle por deformación de barril (capítulo 4). Las muestras de mayor edad se deforman menos lateralmente y presentan un plano de fallo diferenciado. A partir de este punto, la tensión disminuye. De estos ensayos se obtienen las propiedades mecánicas del material imprimible relativo a la dosificación de la tabla 6.1. En concreto, se muestran en la tabla 6.2 los valores promedio del módulo de Young (E) y de la resistencia a compresión (σ_c) a diferentes tiempos.

Tabla 6.2. Valores del módulo de Young y de la resistencia a compresión del material a diferentes tiempos.

Edad del material (min)	E (kPa)	σ_c (kPa)
5	68,25	6,34
15	90,23	9,13
30	149,21	13,90
45	179,59	16,24
60	218,63	19,29
90	287,84	26,12



3. Ensayo de aguja Vicat y ensayo reológico

A continuación, se muestran los resultados del ensayo de la aguja Vicat y de reología mediante reómetro. En primer lugar, se considera el más sencillo, el ensayo de tensión máxima de aguja Vicat. Dadas las limitaciones técnicas a la hora de realizar el ensayo a compresión y de aguja Vicat simultáneamente, con dos ensayos es suficiente para estimar la evolución temporal de la tensión máxima a penetración del material. Los resultados de esfuerzo máximo de penetración, realizados sobre probetas procedentes de las amasadas utilizadas en los ensayos a compresión uno y dos, se muestran en la tabla 6.3. En la tabla se muestran dos edades: la edad del material que toma como referencia de tiempo cero la adición del agua en la amasadora; y la edad de amasada, que al igual que las probetas de ensayo a compresión toma como referencia de tiempo cero el llenado de la probeta de ensayo. A efecto de establecer correlaciones entre ambos ensayos consideramos como edad del material, la segunda. La razón para considerar esta edad reside en que a partir del tiempo cero, en ambos casos, la muestra no es alterada. No ocurre lo mismo con la edad del amasada, en la cual, el material es alterado en la preparación de las probetas.

Tabla 6.3. Ensayo de penetración Vicat.

Ensayo 1		
<i>Edad de amasada (min)</i>	<i>Edad del ensayo (min)</i>	<i>Tensión de penetración (kPa)</i>
10	0	46
25	15	135
34	24	193
55	45	290
66	56	308
73	63	433

Ensayo 2		
<i>Edad del amasada (min)</i>	<i>Edad del ensayo (min)</i>	<i>Tensión de penetración (MPa)</i>
7	0	42
13	6	75
28	21	218
38	31	241
55	48	335
71	64	448

En la figura 6.8 se muestra la representación gráfica de evolución temporal de la tensión máxima de penetración para los dos ensayos.

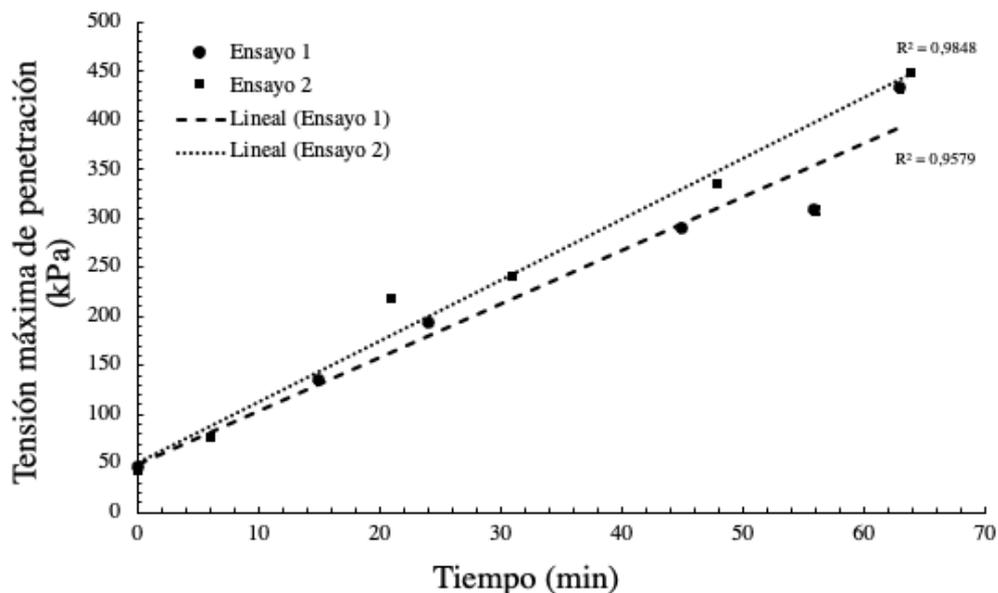


Figura 6.8. Gráfica de la tensión máxima frente al tiempo para el ensayo de aguja Vicat.

Ambos modelos lineales se han construido a partir de datos tomados a diferentes tiempos, debido a la dificultad experimental de realizar el ensayo a compresión y de aguja Vicat al mismo tiempo. Por ello, mediante un test de hipótesis se estudia estadísticamente la igualdad de las pendientes y de las ordenadas en el origen. Se consideran las siguientes hipótesis:

- H_0 : los modelos son significativamente diferentes.
- H_a : los modelos son significativamente iguales.

Tanto para la pendiente como para la ordenada en el origen, el p-valor del test (probabilidad de que la diferencia de resultado se deba al azar) es mayor que 0,05 ($\alpha = 0,5$), no hay evidencias para aceptar la hipótesis nula [2]. Por lo tanto, aceptamos la hipótesis alternativa, es decir, no hay diferencias significativas entre ambos modelos (réplicas). En definitiva, ambos ensayos son estadísticamente iguales. En consecuencia, a partir de los datos de ambos ensayos, la resistencia máxima a penetración puede formularse como función de la edad del material mediante una relación lineal:

$$\sigma_p(t) = 5,55 \cdot t + 54,50 \text{ [kPa]} \quad (6.1)$$

A continuación, se consideran los resultados del ensayo reológico del material. En este caso, se realiza una amasada específica para el ensayo reológico. Tras aplicar el barrido de velocidad de cizallamiento óptimo (figura 5.2), los resultados del par, proporcionados por el reómetro, se muestran en la figura 6.9 (apéndice 5).

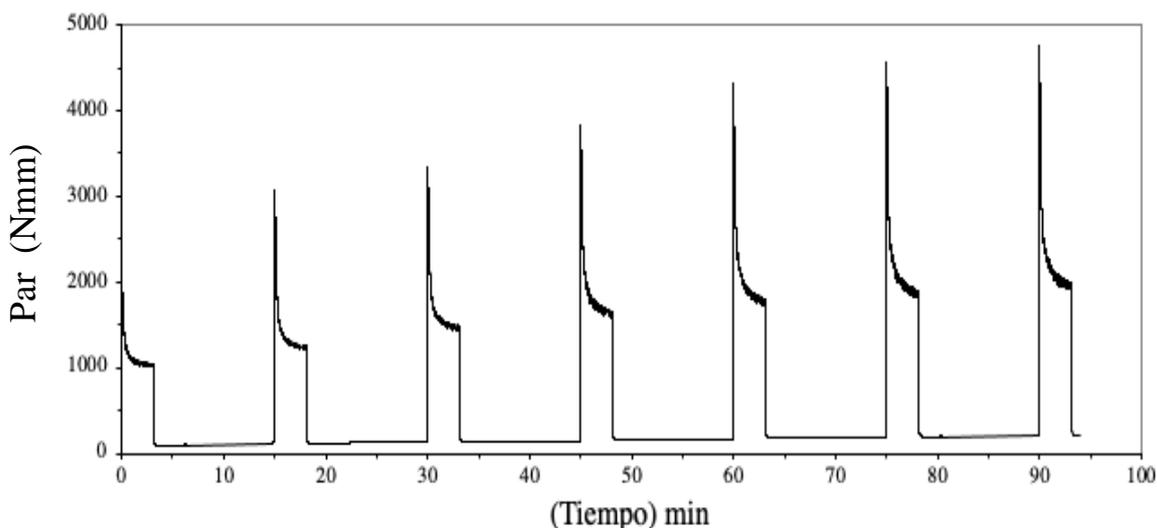


Figura 6.9. Gráfica del par frente al tiempo obtenida mediante reómetro.

Dado que el barrido de cizallamiento se realiza a velocidad de giro constante en cada pulso de onda cuadrada, solamente podemos caracterizar mediante el ensayo reológico el límite de fluencia estático y dinámico. A partir de los resultados de la figura 6.9 se calculan los valores del límite de fluencia estático τ_0 y dinámico τ_y , de acuerdo con el fundamento teórico expuesto en el capítulo 3. De esta manera, los resultados obtenidos a diferentes momentos se muestran en la tabla 6.4.

Tabla 6.4. Límite de fluencia estático (τ_0) y límite de fluencia dinámico (τ_y) obtenidos mediante ensayo en reómetro.

Edad del material (min)	Edad del ensayo (min)	Límite de fluencia estático τ_0 (Nmm)	Límite de fluencia dinámico τ_y (Nmm)	Índice de tixotropía I_{thix}
9	0	1884,1	1051,9	0,79
24	15	3066,2	1274,4	1,42
39	30	3332,0	1469,3	1,27
54	45	3824,6	1642,0	1,33
69	60	4326,9	1782,7	1,43
84	75	4557,4	1872,2	1,43
99	90	4749,7	1966,7	1,42

Resulta interesante representar gráficamente la evolución temporal del límite de fluencia estático τ_0 y dinámico τ_y con el tiempo, pues nos da una idea intuitiva de la evolución de las propiedades del material (figura 6.10).

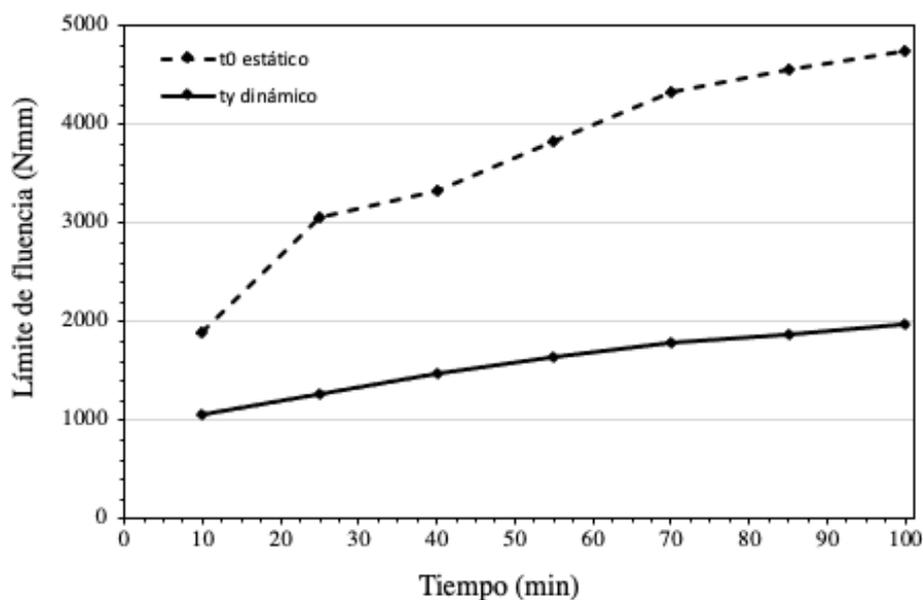


Figura 6.10. Evolución temporal del límite de fluencia estático (τ_0) y límite de fluencia dinámico (τ_y).

Finalmente, se debe puntualizar que las medidas de los respectivos límites de fluencia no son del todo rigurosas en lo relativo a la edad del material. Si se observa la señal de velocidad de cizallamiento aplicada, en el ensayo a una edad dada se debe tener en cuenta las perturbaciones que han tenido lugar en los ensayos a edades anteriores. Sin embargo, en este trabajo supondremos que la evolución de los límites de fluencia, obtenidos mediante el reómetro, no se ven afectados por la perturbación del material en los ensayos previos. Lo ideal sería preparar una muestra para cada edad y realizar un ensayo reológico para cada edad, es decir, con un solo pulso a una edad dada. Sin embargo, la gran capacidad del reómetro (3 l) hace inviable proceder de esta manera, pues se requeriría de 3 l de amasada para determinar el límite de fluencia a una sola edad.

De acuerdo con el fundamento teórico del capítulo 3, a partir de la evolución temporal del límite de fluencia estático caracterizado, se puede predecir en primera aproximación (criterio de Von Mises) el fallo por plastificación del material durante impresión (ecuación 3.7, 3.10, 3.11). De esta manera se caracteriza la *edificabilidad* del material. Por otro lado, el límite de fluencia dinámico permite caracterizar la *bombeabilidad* del material.

4. Resultados de la caracterización mecánica del material

A partir de los resultados de los ensayos a compresión (tabla 6.2), la resistencia a compresión y el módulo de Young del material descrito (tabla 6.1), pueden formularse como función de la edad del material (figura 6.11), mediante las siguientes relaciones lineales:

$$E(t) = 2,61 \cdot t + 59,18 \text{ [kPa]} \quad (6.2)$$

$$\sigma_c(t) = 0,23 \cdot t + 5,86 \text{ [kPa]} \quad (6.3)$$

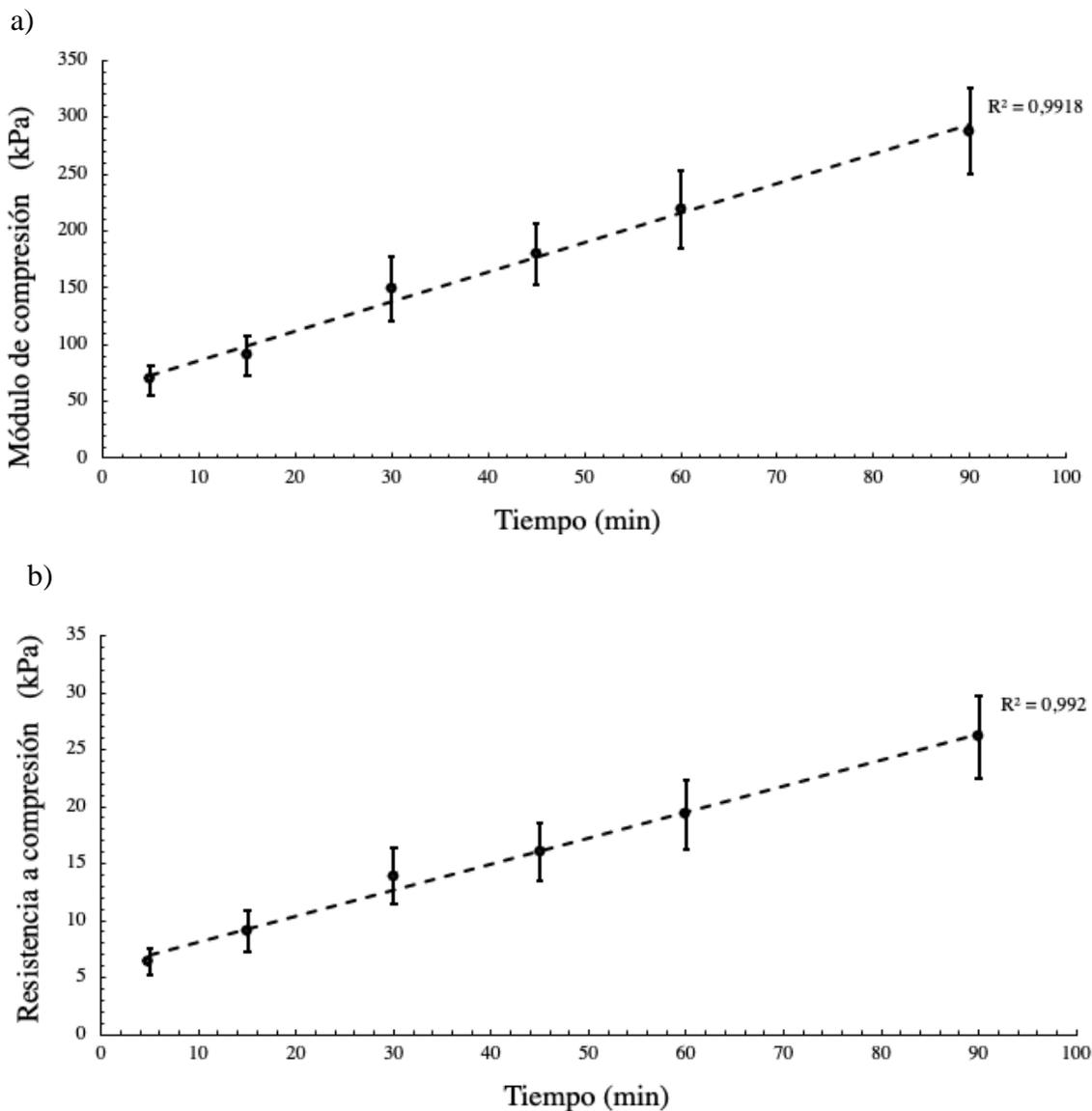


Figura 6.11. Representación gráfica: a) Evolución temporal del módulo de compresión. b) Evolución temporal de la resistencia a compresión.

Por otro lado, el coeficiente de Poisson $\nu(t)$, derivado del análisis de las imágenes, mostró un valor aproximadamente constante en torno al valor de 0,5 (figura 6.12).

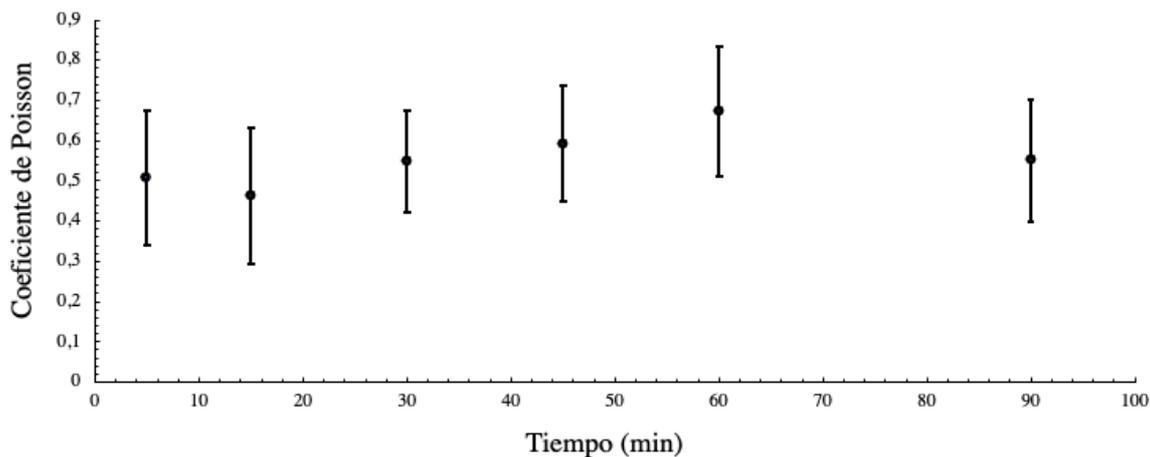


Figura 6.12. Evolución temporal del coeficiente de Poisson.

Con los resultados anteriores hemos caracterizado el material a lo largo del tiempo de forma completa. Por lo tanto, podemos dibujar los círculos de Mohr para el estado de tensiones uniaxial del ensayo a compresión (figura 6.13).

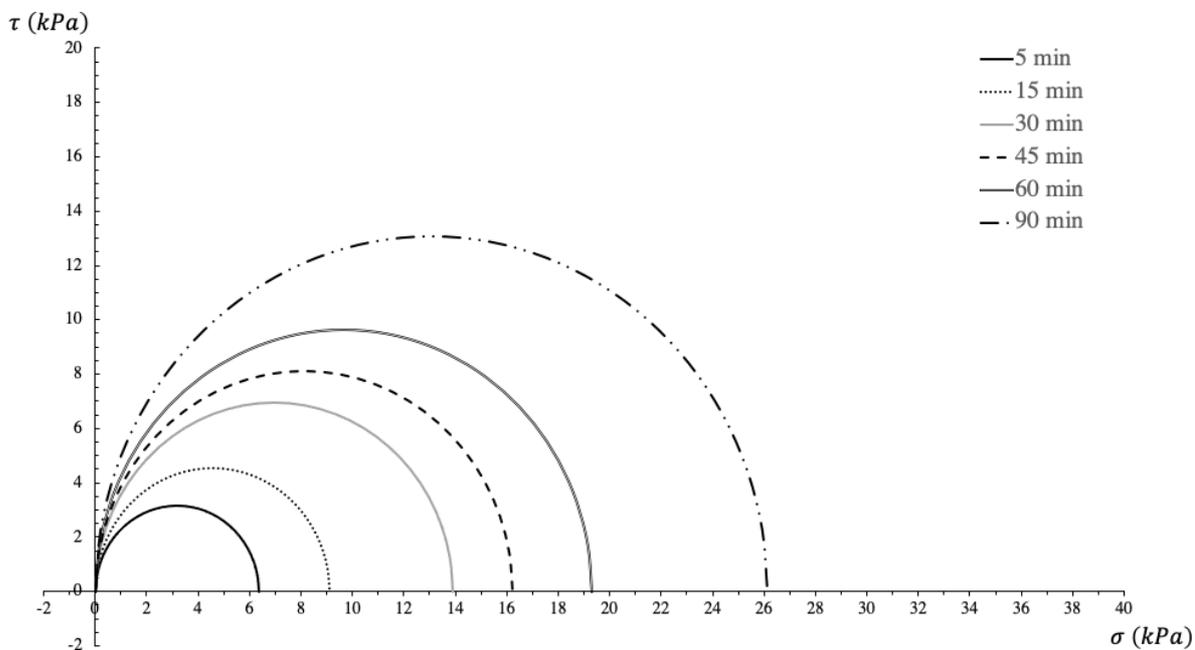


Figura 6.13. Representación de los círculos de Mohr para el estado de tensiones uniaxial.

Sin embargo, mediante el ensayo uniaxial únicamente se puede caracterizar un estado de tensiones. La caracterización, completa, mediante el *modelo de Mohr-Coulomb* requiere de la realización de ensayos triaxiales. De esta forma, se pueden obtener los sucesivos círculos de Mohr, para diferentes estados tensionales y así poder estimar la envolvente del criterio de fallo plástico y la cohesión del material a una edad dada. La falta de disponibilidad de los complejos equipos para ensayos triaxiales, propios de la mecánica de suelos, no permite su realización.

Atendiendo a la bibliografía disponible [3], ciertos autores hacen referencia a una relación entre la cohesión de un material, según el modelo de *Mohr-Coulomb*, y el límite de fluencia estático. En concreto se tiene la siguiente aproximación:

$$C \approx \tau_o \quad (6.4)$$

Esta aproximación es válida cuando las condiciones de cizallamiento puro se mantienen en los ensayos reológico y a compresión (que pueden no ser constantes, debido a factores como la geometría y el montaje). Para poder aplicar dicha expresión, debemos expresar la tensión de fluencia (τ_o) en unidades de tensión, en vez de par. A este efecto, se recurre a los datos proporcionados por el fabricante (Viskomat XL), que a partir de consideraciones de geometría del reómetro establecen una relación de conversión ($\tau_o [Pa] = 1,45 \cdot M [Nmm]$). Dada la fuente de error a la que están sometidas las medidas reológicas como consecuencia de realizar ensayos sobre una misma muestra, nos limitaremos a estimar la cohesión del material para las primeras cuatro edades. Así, eludimos los datos de límite de fluencia de las edades más antiguas, las cuales están afectadas por mayor error debido a la modificación del material en los ensayos anteriores. Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 6.5.

Tabla 6.5. Límite de fluencia estático (τ_o) y cohesión del material (C).

Edad del material (min)	Límite de fluencia estático τ_o (Nmm)	Cohesión del material C (kPa)
5	1884,1	2,73
15	3066,2	4,46
30	3332,0	4,84
45	3824,6	5,56

A partir de los datos de la tabla 6.5, mediante correlación lineal ($R^2 = 0,995$), se puede proponer un modelo de evolución temporal de la cohesión (ecuación 6.5). Así, se puede obtener la caracterización del material según el modelo de Mohr-Coulomb (figura 6.14).

$$C(t) = 0,06 \cdot t + 3,07 \text{ [kPa]} \quad (6.5)$$

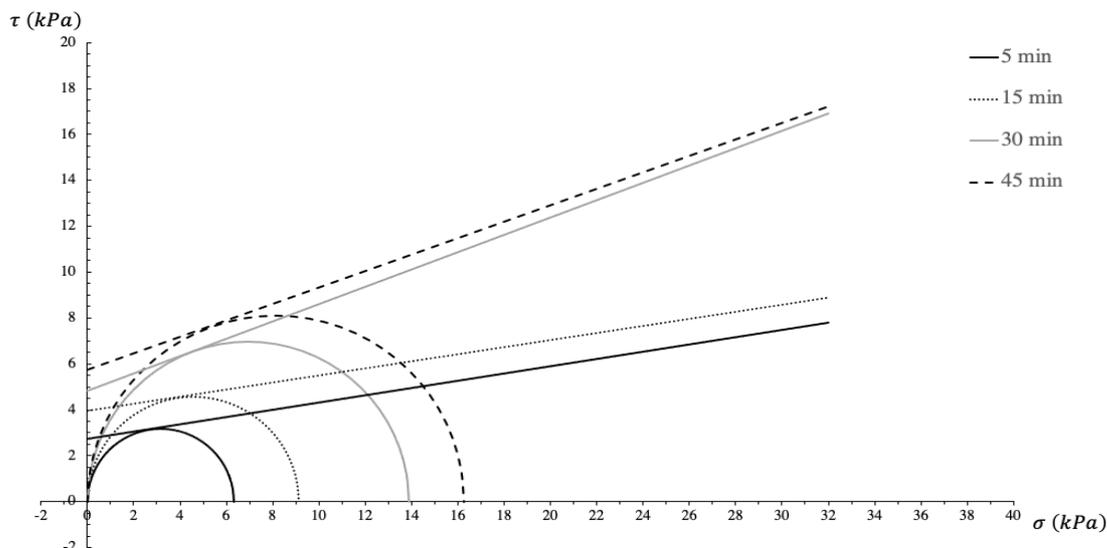


Figura 6.14. Representación del *modelo de Mohr-Coulomb* del material para los tiempos: 5, 15, 30 y 45 min.

A partir de los datos de la pendiente de las sucesivas envolventes del criterio de fallo, las cuales se muestran en la figura 6.14, podemos calcular el ángulo de rozamiento interno (ϕ). Los resultados a diferentes tiempos se muestran en la tabla 6.6.

Tabla 6.6. Ángulo de rozamiento interno (ϕ) del material a diferentes tiempos.

Edad del material (min)	Ángulo de rozamiento interno (ϕ)
5	9,00°
15	8,78°
30	20,65°
45	19,73°

A la vista de los resultados de la tabla 6.6, se observa que existe una relación entre la edad del material y el ángulo de rozamiento interno. En particular hemos obtenido un valor medio de aproximadamente 15°, con una desviación estándar de 6,5°. En consecuencia, la estimación de este valor del ángulo pone de manifiesto la invalidez de aplicar la

aproximación de ángulo cero para el ángulo de rozamiento interno (*criterio de Tresca*). Algunos autores [4], dada la compleja variación del ángulo con el tiempo, optan por considerar un ángulo de rozamiento interno constante, con un valor promedio de las sucesivas mediciones. Esta aproximación está justificada cuando la desviación estándar de los datos es pequeña, como se podría considerar en este caso. Sin embargo, a pesar de no disponer de datos procedentes de ensayos triaxiales, la combinación de ensayos uniaxiales y ensayos reológicos permite obtener una caracterización del material de acuerdo con el *modelo de Mohr-Coulomb*. Contrariamente, este procedimiento, no es el más preciso, pues está limitado por la validez de la aproximación del límite de fluencia estático a la cohesión del material. Sin embargo, permite una primera aproximación a la caracterización del material mediante el modelo de fallo de *Mohr-Coulomb*.

5. Correlación de ensayos

Dada la complejidad de los ensayos mecánicos y reológicos, resulta interesante correlacionarlos con otros ensayos más sencillos y fácilmente implementables en la línea de impresión. En particular resulta de gran interés la búsqueda de correlaciones entre los valores de penetración de la aguja Vicat (σ_p) y los valores del módulo de Young (E) y de la resistencia a compresión (σ_c). Tal como podría esperarse del hecho de que en ambos tipos de ensayos se ha observado un incremento lineal con el tiempo (ecuación 6.1, 6.2, 6.3) de los parámetros analizados, su correlación puede ser aproximada, de manera precisa, por líneas rectas (figura 6.15).

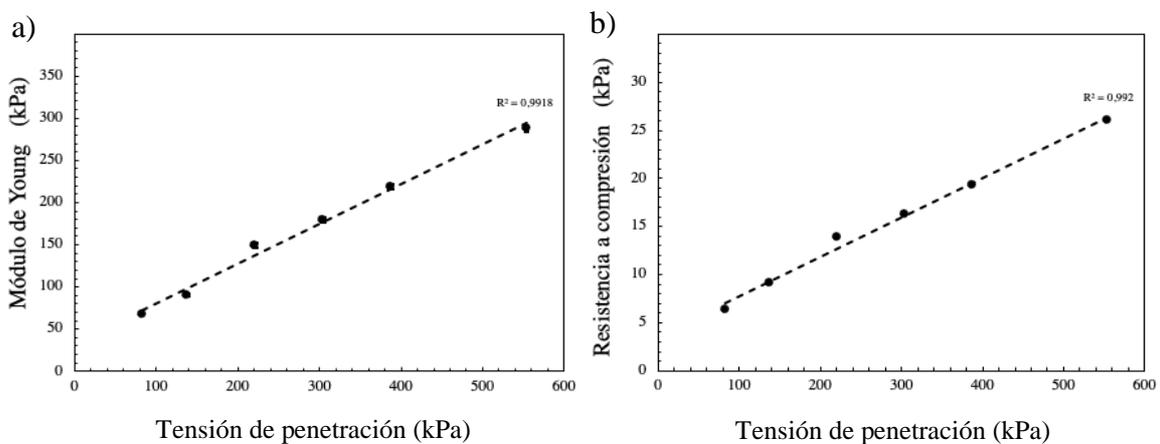


Figura 6.15. Representación de gráfica de los modelos de correlación de ensayos: a) Módulo de Young vs Tensión de penetración b) Resistencia a compresión vs Tensión de penetración.

La relación entre la tensión máxima de penetración con el módulo de Young y con la resistencia a compresión del material de impresión (tabla 6.1) en estado fresco se muestra en las ecuaciones siguientes:

$$E(t) = 0,58 \cdot \sigma_p(t) + 28,96 \text{ [kPa]} \quad (6.6)$$

$$\sigma_c(t) = 0,05 \cdot \sigma_p(t) + 3,21 \text{ [kPa]} \quad (6.7)$$

Las relaciones lineales dadas por las ecuaciones 6.6 y 6.7 son válidas para edades tempranas del material en fresco (90 min), a edades mayores se requieren de relaciones más complejas. Dado que se ha establecido una relación entre los resultados derivados de ambos tipos de ensayos, pueden emplearse los resultados procedentes de los ensayos de aguja Vicat para evaluar las características mecánicas del material en fresco durante el proceso de impresión. De esta forma, con un simple ensayo se pueden estimar los valores del módulo de Young (E) y de la resistencia a compresión (σ_c). Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos valores obtenidos son una primera aproximación a la caracterización del material, dada la falta de precisión que proporcionan el ensayo de aguja Vicat.

Referencias

- [1] Software GOM correlate. Recuperado de <https://www.gom.com/en/products/gom-suite/gomcorrelate-pro>. Marzo de 2022.
- [2] STATGRAPHICS Centurion XVIII Version 19.3.03 (64 bit), Statpoint Technologies, Inc., Herndon, VA, USA, 2022.
- [3] F.P. Bos, P. J. Kruger, S. S. Lucas, G.P.A.G. van Zijl, *Juxtaposing fresh material characterisation methods for buildability assessment of 3D printable cementitious mortars*, Cement and Concrete Composites, Volume 120, 2021.
- [4] R.J.M. Wolfs, F.P. Bos, T.A.M. Salet, *Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing*, Cement and Concrete Research, 106, 103–116, 2018.

Capítulo 7

Conclusiones

El desarrollo de la fabricación aditiva de materiales cementicios (AM) basada en la tecnología de extrusión de capas, popularmente conocida como impresión de hormigón en 3D, está progresando rápidamente en todo el mundo. A lo largo del presente trabajo se ha realizado un profundo estudio bibliográfico del estado del arte de esta tecnología. Sin embargo, para desarrollar procesos de impresión industriales económicos y evitar el uso del método ensayo-error para evaluar si un determinado material es imprimible, es necesario desarrollar métodos de análisis estructural. Por ello, en este trabajo se combinan dos tipos de ensayo para la caracterización del material en fresco imprimible. Tras la realización de este TFM, las principales conclusiones que se extraen son las siguientes:

- Los ensayos reológicos son de gran utilidad para la caracterización de los materiales de base cemento, en especial, para la caracterización de los materiales imprimibles, tal y como muestran numerosos estudios. Sin embargo, los ensayos a compresión, más característicos del material endurecido, también son de gran utilidad en la caracterización mecánica del material. En este mismo sentido, los ensayos triaxiales o a cortadura, propios de la ingeniería geotecnia, proporcionan una caracterización más completa del material. Sin embargo, su complejidad dificulta su implementación en el proceso de impresión.



- No existen experimentos normalizados para la caracterización mediante ensayos a compresión de materiales de base cemento en estado fresco. Por ello, en este trabajo se ha diseñado un protocolo óptimo, incluyendo de forma detallada el procedimiento y características de las probetas de ensayo. La implementación de métodos de correlaciones de imágenes digitales (DIC), para el análisis de las deformaciones, se hace necesaria en el protocolo de ensayo debido a las características del material.
- Mediante el ensayo reológico con reómetro rotatorio a velocidad de cizalladura constante se ha hallado el límite de fluencia estático (τ_0) y dinámico (τ_y) del material de estudio. Aunque no se ha caracterizado de forma completa el material según el modelo de Bingham (falta caracterizar la viscosidad del material), el límite de fluencia estático resulta suficiente para predecir el fallo plástico del material según el criterio de Von Mises. Además, se ha caracterizado la evolución temporal de ambos límites de fluencia durante las edades tempranas del material en estado fresco (cinética tixotrópica).
- El *criterio de fallo plástico de Mohr-Coulomb* es más preciso que el criterio de Von Mises, por lo que es el más idóneo para caracterizar el material imprimible. Otros criterios como el de *Drucker-Prager* son excesivamente complejos para implementarlos en la caracterización de un material de impresión.
- La caracterización de un material de base cemento mediante el modelo de *Mohr-Coulomb* requiere de la realización de ensayos triaxiales. Sin embargo, la combinación de ensayos a compresión con ensayos reológicos también permite la caracterización mediante este modelo. Es importante comentar que la aproximación, de igualdad entre el límite de fluencia estático y la cohesión, es válida cuando las condiciones de cizallamiento puro se mantienen en los ensayos reológico y a compresión. Sin embargo, esto no es del todo cierto para un reómetro rotatorio. En el caso de un reómetro de pistón esta aproximación es más exacta, pues al contrario de un reómetro rotatorio, las condiciones de esfuerzos cortantes son similares a las de un ensayo a compresión. En consecuencia, la caracterización de *Mohr-Coulomb* se ha realizado de forma aproximada.



- A partir de los datos del ensayo a compresión y reológico se ha estimado la evolución con el tiempo de la cohesión del material según el modelo de *Mohr-Coulomb*. De la misma manera, se ha estimado el valor aproximado del ángulo de rozamiento interno del material ($\phi = 15^\circ$). Con estos resultados se puede predecir el fallo plástico del material durante el proceso de impresión según el *criterio de fallo de Mohr-Coulomb*.
- Se ha caracterizado mediante modelos lineales la evolución temporal, durante los primeros 90 minutos (edades tempranas), del módulo de Young (E) y de la resistencia a compresión (σ_c) del material. Además, se ha observado que durante las edades tempranas del material, el coeficiente de Poisson se puede considerar constante ($\nu = 0,5$). En este punto es interesante comparar las propiedades mecánicas del material en estado fresco y en estado endurecido. Mientras que el valor del módulo de Young para el material en estado fresco es del orden de kPa, para el material endurecido (28 días) es del orden de los GPa. Alternativamente, para la resistencia a compresión del material en edades tempranas tenemos ordenes de kPa, mientras que para el material endurecido es del orden de los MPa.
- Los modelos lineales de caracterización mecánica del material en estado fresco (módulo de Young, resistencia a compresión y coeficiente de Poisson) pueden ser utilizados en trabajos posteriores para predecir el fallo por pandeo de la pieza de impresión mediante análisis por elementos finitos.
- Los estudios de correlación de ensayos de Aguja Vicat, muestra una correlación lineal, a edades tempranas, entre la tensión máxima de penetración con el módulo de Young y con la resistencia a compresión del material de impresión. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos valores obtenidos son una primera aproximación a la caracterización del material, dada la falta de precisión que proporciona el ensayo. Además, diferentes parámetros físicos no pueden correlacionarse fácilmente de manera general, sino que dependen del material. Esto supone un importante inconveniente para el desarrollo de métodos de control de calidad, in situ, del material de impresión.



A modo de resumen, en el presente TFM se ha desarrollado un protocolo de ensayo para la caracterización de un material de base cementicia en estado en fresco. En concreto se ha conseguido caracterizar:

- La evolución temporal del módulo de Young (E) en edades tempranas del material.
- La evolución temporal de la resistencia a compresión (σ_c) en edades tempranas del material.
- El valor del coeficiente de Poisson (ν) en edades tempranas del material.
- Los parámetros del modelo de *Mohr-Coulomb* en edades tempranas del material: cohesión y ángulo de rozamiento interno.

En este trabajo solo hemos considerado una dosificación del material, testada previamente mediante el método de ensayo error. A pesar de ello, en futuras líneas de investigación se puede emplear este protocolo de caracterización en el diseño de nuevas dosificaciones que se consideren imprimibles. Adicionalmente, los resultados de la caracterización del material, anteriormente enumerados, pueden ser empleados para simular el proceso de impresión (FEA). De esta manera se puede determinar si una geometría específica de pieza, con ciertos parámetros de impresión, es imprimible. Alternativamente, para una geometría de pieza impresas se pueden determinar los parámetros óptimos de impresión.



Apéndice 1. Criterio de plastificación de Drucker-Prager¹

El criterio de Mohr-Coulomb (capítulo 4) considera que la resistencia del material no depende de la tensión principal σ_2 , lo cual es incongruente con el hecho de que, para los geomateriales, la resistencia a compresión biaxial es mayor que la resistencia a la compresión uniaxial. Debido a ello se han desarrollado criterios más realistas, tanto para tener en cuenta las tres tensiones principales, como para suavizar el trazado de la superficie de fallo. Uno de estos criterios es el criterio de plastificación de *Drucker-Prager* (también llamado criterio de Von Mises extendido), el cual puede expresarse de la siguiente manera:

$$\alpha \cdot \sigma_m + \sqrt{J_2} + k = 0 \quad (1)$$

donde α y k son dos constantes del material. La expresión anterior puede reescribirse empleando la resistencia a compresión uniaxial (σ_c) y la resistencia a tracción uniaxial (σ_t), en vez de α y k , quedando:

$$\sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \cdot \sigma_m + \sqrt{J_2} - \frac{2 \cdot \sigma_c \cdot \sigma_t}{\sqrt{3} \cdot (\sigma_c + \sigma_t)} = 0 \quad (2)$$

con:

$$\sigma_t = \frac{-3 \cdot k}{\alpha + \sqrt{3}} \quad \sigma_c = \frac{3 \cdot k}{\alpha - \sqrt{3}} \quad (3)$$

En estas condiciones, el cociente σ_t/σ_c , puede ser obtenido mediante:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_c} = \frac{\sqrt{3} - \alpha}{\sqrt{3} + \alpha} \quad (4)$$

Cuando la superficie de fallo del criterio de Drucker-Prager (cónica) se ajusta a la correspondiente del criterio de Mohr-Coulomb (piramidal de base hexagonal), α y k toman los siguientes valores:

$$\alpha = \frac{-\sin \phi}{\cos \eta - (1/\sqrt{3}) \cdot \sin \eta \cdot \sin \phi} \quad (5)$$

$$k = \frac{c \cdot \cos \phi}{\cos \eta - (1/\sqrt{3}) \cdot \sin \eta \cdot \sin \phi} \quad (6)$$

Por lo tanto, en el espacio de las tensiones principales, la superficie de fallo del criterio de Drucker-Prager a diferencia del criterio de Mohr-Coulomb, es un cono como el mostrado en la figura 1.Ap.

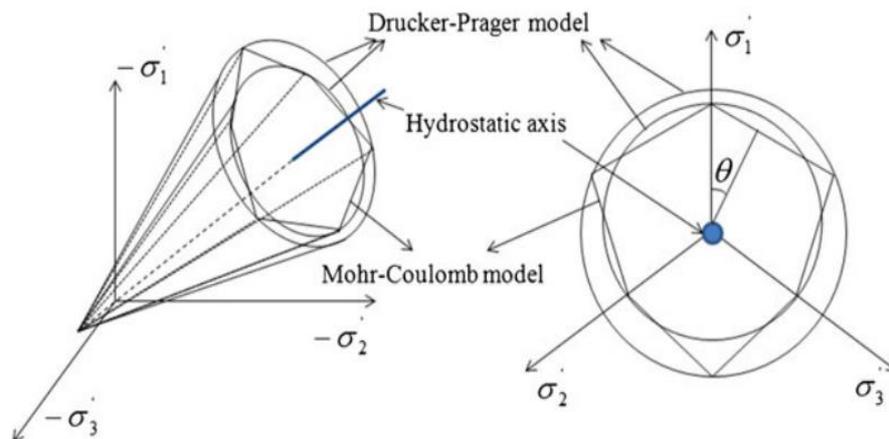


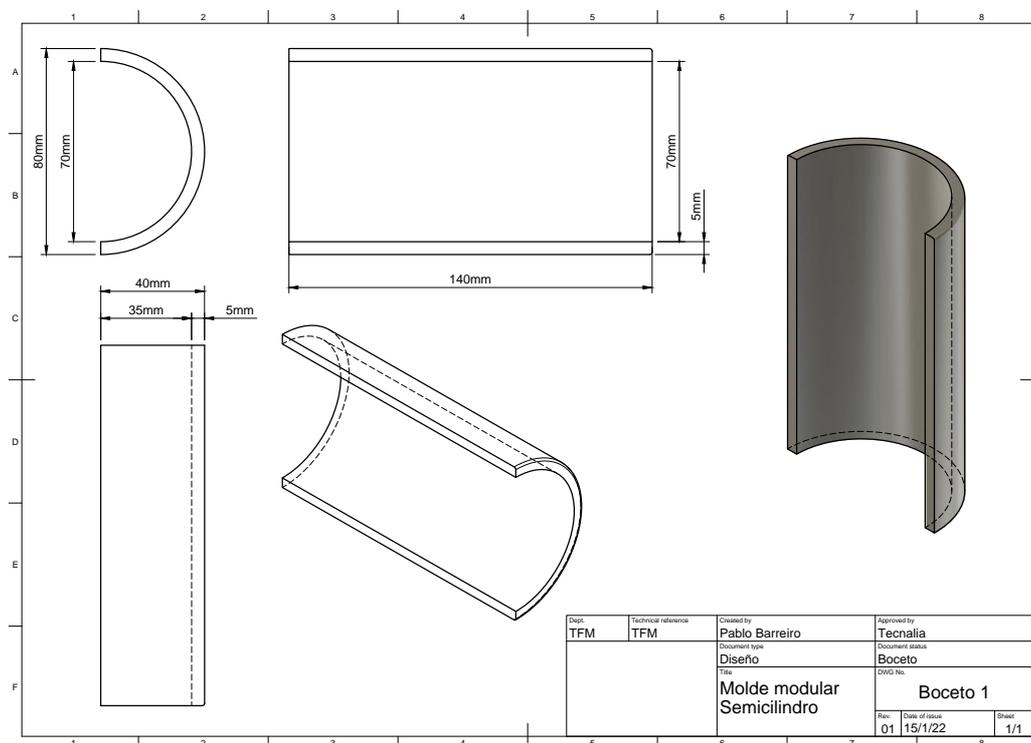
Figura 1.Ap. Superficie de fallo del criterio de Drucker-Prager y Mohr-Coulomb en el espacio de las tensiones principales y plano desviador¹.

1.J. Kim, E. Sonnenthal, J. Rutqvist, *A modeling and numerical algorithm for thermoporoelasticity in multiple porosity media for naturally fractured reservoirs*, 2011.

Apéndice 2. Diseño del molde

El diseño del molde se basa en una pieza modular que consta de tres partes: dos semicilindros poliméricos y una base de acero

- **Semicilindros de PLA.** Se diseñan dos semicilindros que se fabrican mediante impresión 3D de PLA.



- **Placa cilíndrica de acero.** Mediante mecanizado se fabrica una pieza circular de acero de dimensiones 80 mm de diámetro por 1 mm de espesor (figura 2.Ap).

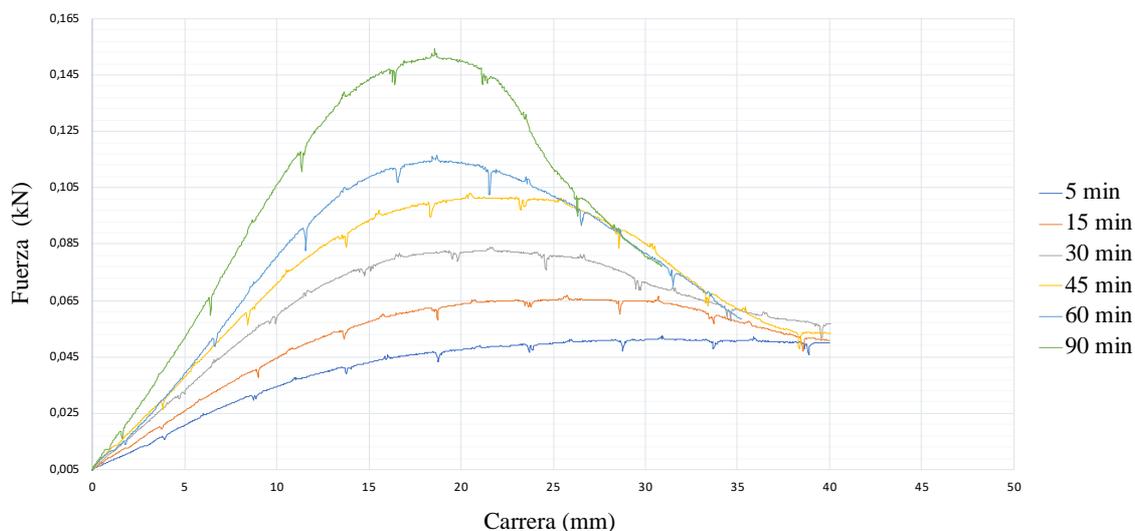


Figura 2.Ap. Diseño de la placa de acero.

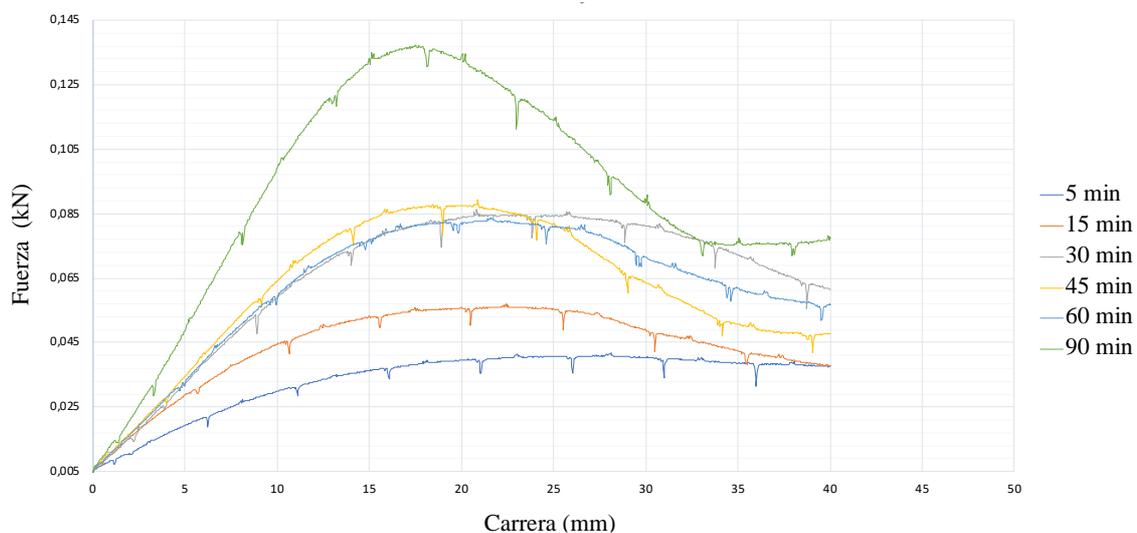
Apéndice 3. Gráficas ensayos a compresión simple

En este apéndice se muestran las gráficas fuerza aplicada frente al desplazamiento de la célula de carga. Los datos de estas gráficas se registran directamente de la máquina de ensayos a compresión (*ibertest*).

Ensayo 1

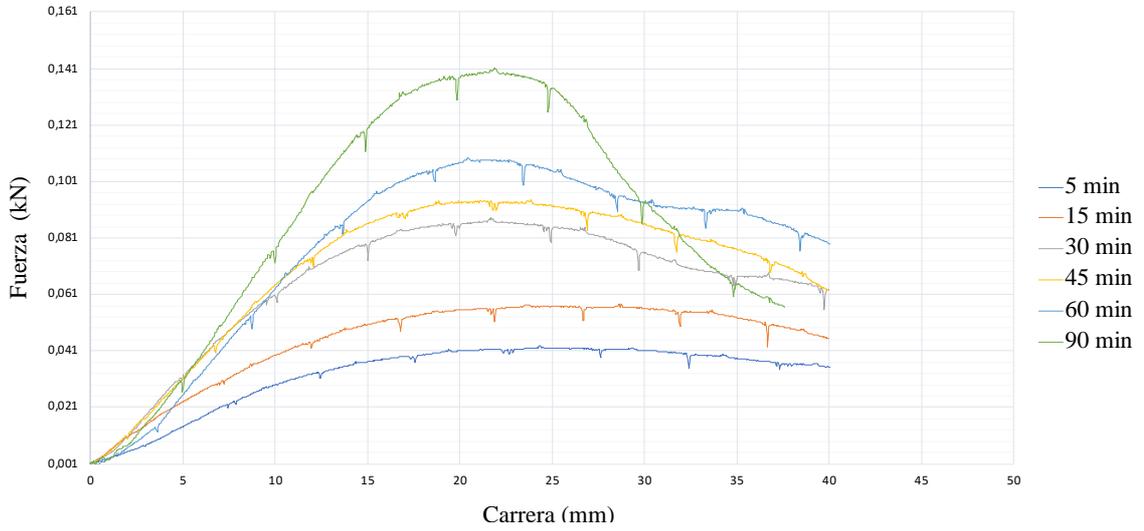


Ensayo 2

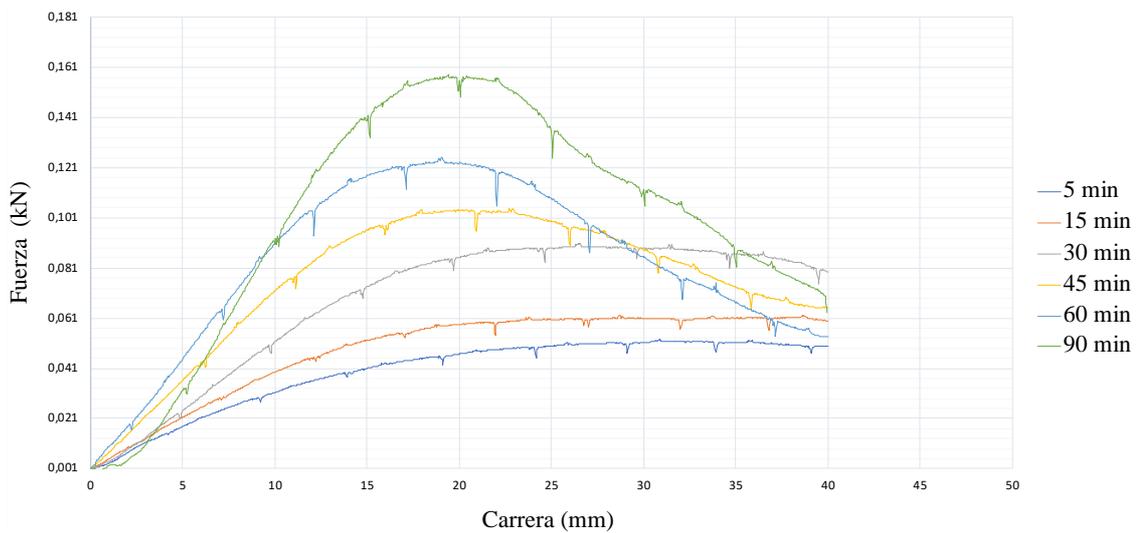




Ensayo 3

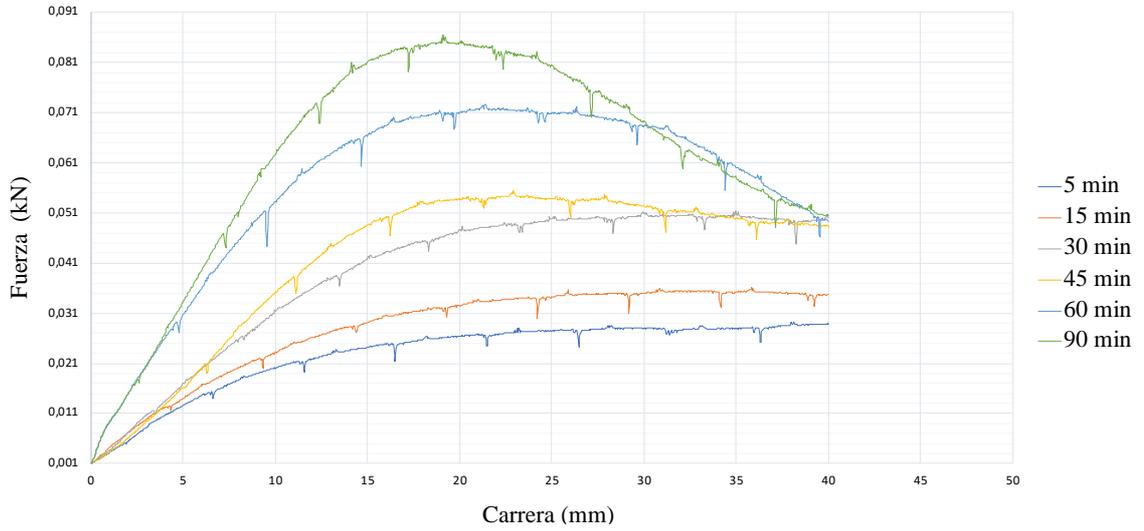


Ensayo 4

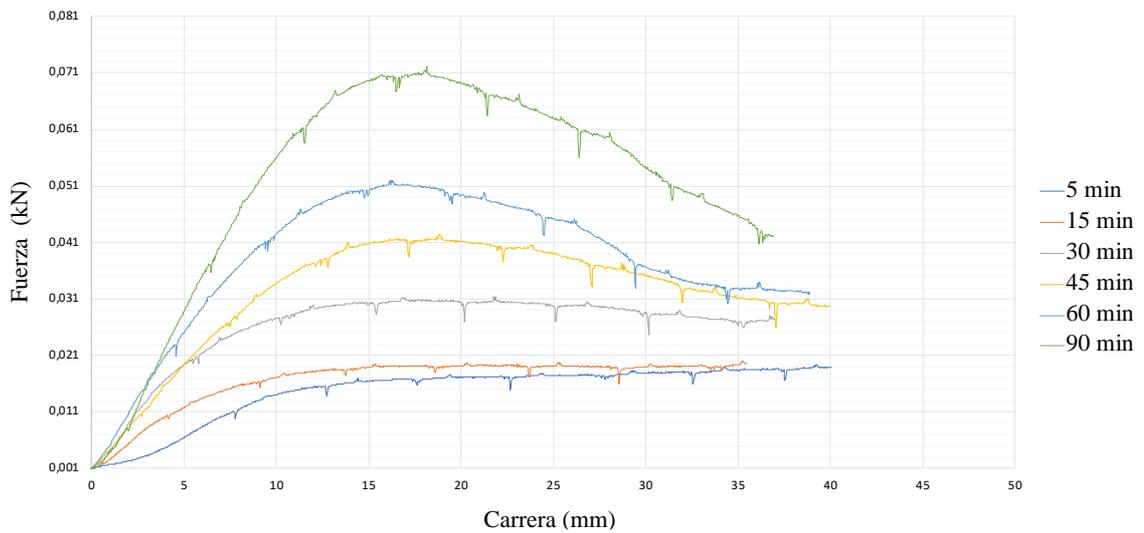




Ensayo 5



Ensayo 6





Apéndice 4. Datos deformaciones de ensayos uniaxiales

A continuación, se muestran los datos de deformación transversal ε_t y deformación axial ε_l obtenidos mediante el método de correlación de imágenes. A este fin se requiere de la utilización del software GOM Correlate 2D¹. Las mediciones de la deformación transversal se realizan a tres alturas, 25% (Dist1), 50% (Dist2), 75% (Dist3) de la altura inicial de la probeta. Las imágenes de los ensayos de las probetas son tomadas a intervalos secuenciales de dos segundos de tal forma que la deformación a lo largo del tiempo se obtiene mediante calibrado lineal de dichos datos. El calibrado de medición de las imágenes se realiza para cada tanda de ensayo.

En la tabla 4.Ap se muestran los factores de conversión que relaciona la distancia en pixeles de las imágenes con la distancia real. Se debe realizar un calibrado del factor de conversión para cada tanda de ensayos, dado que el montaje del dispositivo experimental de toma de fotos se lleva a cabo para cada ensayo. De esta manera, podemos relacionar la deformación en pixeles de la muestra, con deformación real expresada en unidades de distancia. Para ello debemos tomar un patrón, que consiste en una distancia dentro de la foto de longitud conocida y situada en el mismo plano donde se van a realizar las medidas de deformación.

Tabla 4.Ap. Factor de conversión de distancias.

<i>Ensayo</i>	<i>Factor de conversión (píxel/mm)</i>
<i>Ensayo 1</i>	0,920
<i>Ensayo 2</i>	1,037
<i>Ensayo 3</i>	1,172
<i>Ensayo 4</i>	1,207
<i>Ensayo 5</i>	1,060
<i>Ensayo 6</i>	1,033

1. Software GOM correlate. Recuperado de <https://www.gom.com/en/products/gom-suite/gom-correlate-pro>. Marzo de 2022.

Apéndice 5. Datos ensayo reológico

A continuación, se muestran las principales gráficas obtenidas con el reómetro rotatorio *Viskomat XL*, en el ensayo reológico del material.

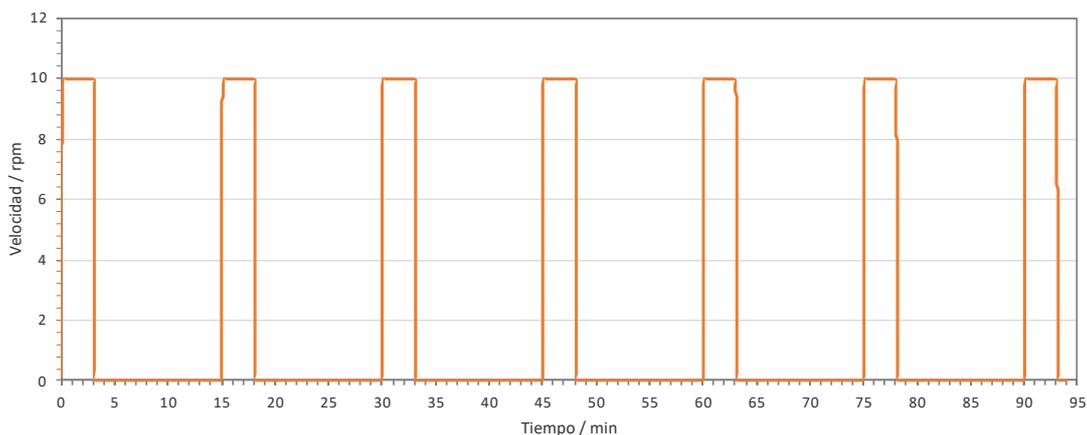


Figura 5.1.Ap. Barrido de velocidades de ensayo.

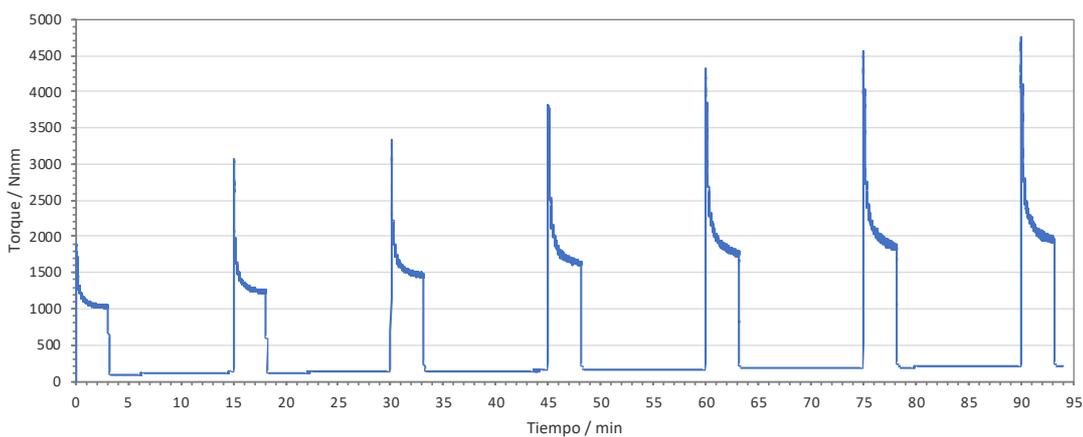


Figura 5.2.Ap. Representación del torque vs. el tiempo de ensayo.

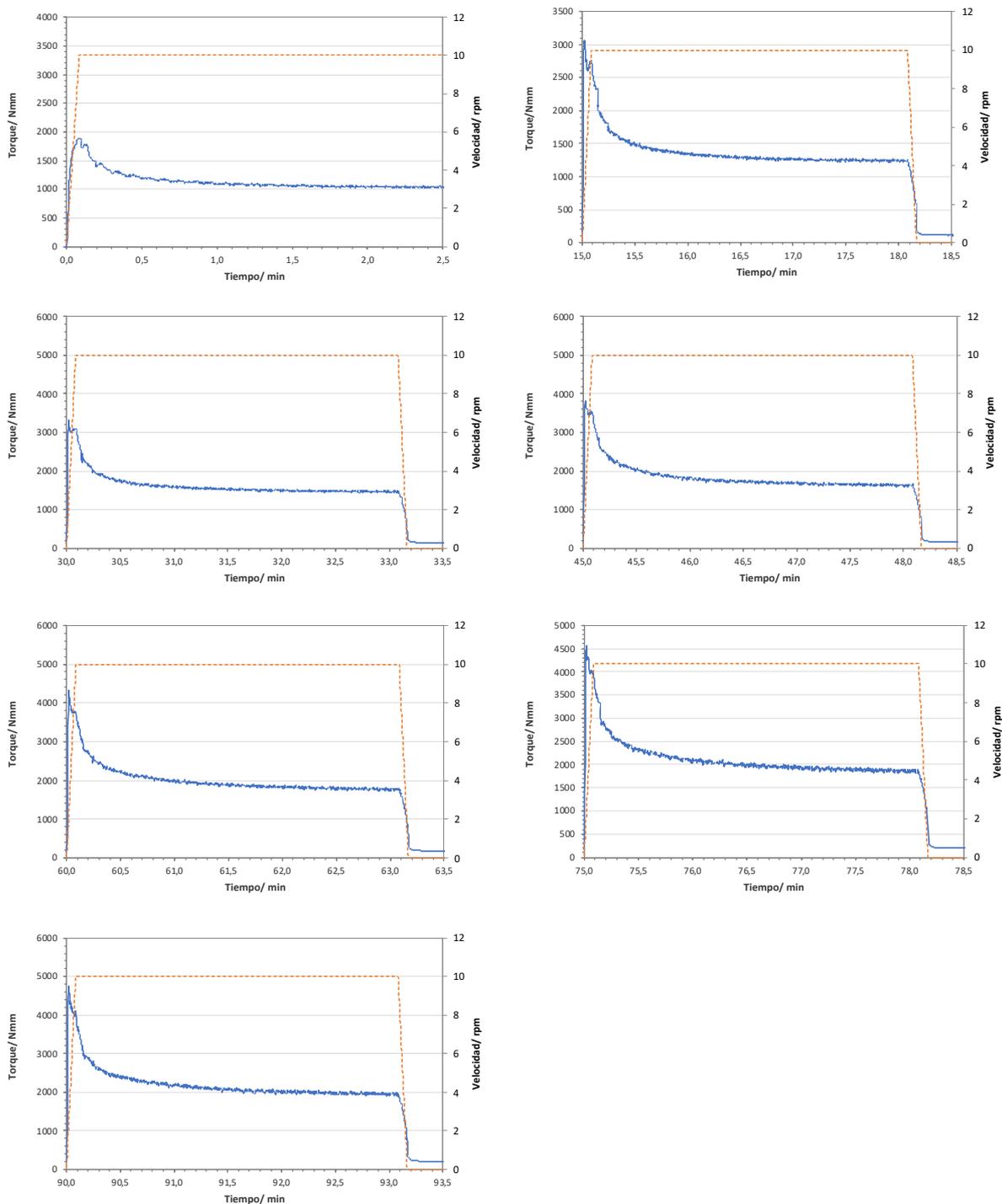


Figura 5.3.Ap. Comparación del barrido aplicado frente al torque para los diferentes tiempos de ensayo.