

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES



PRÁCTICA SUPERVISADA – INGENIERÍA CIVIL AÑO 2017:

*DOSIFICACIÓN DE MORTERO CEMENTICIO PARA
IMPRESIÓN 3D*

AUTOR: Hugo Matías Losso

TUTOR: Dr. Ing. Francisco José Luperi

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al laboratorio de estructuras de la facultad por abrirme sus puertas y brindarme sus instalaciones para el desarrollo del presente trabajo, como también a los ingenieros José Luperi y Franco Soffiatti por permitirme participar en un proyecto tan interesante y con tanto potencial.

Doy gracias a mis padres, Hugo y Nora, y a mi hermano Agustín por su amor y apoyo incondicional. Por darme la posibilidad de cumplir una meta tan importante, ya que sin ellos hubiera sido imposible.

A Agustina por estar día a día a mi lado brindándome todo su amor y su apoyo.

También a los grandes amigos que me dio la facultad: Ivan, Juan, Gonza, Agustina, Tuni, Cristian y Juan Pablo. Sin dudas el camino no hubiera sido lo mismo sin su amistad.

RESUMEN

La fabricación aditiva es una tecnología transversal, que abarca muchos ámbitos de producción distintos, con escalas de aplicación y objetivos muy diferentes. Aplicada a la construcción brinda principalmente la posibilidad de construir estructuras de hormigón sin la utilización de encofrados lo que representa una gran ventaja respecto a tiempos, libertad arquitectónica y reducción de costos.

Las propiedades claves del hormigón de impresión en estado endurecido son la resistencia a la compresión y a la flexión, las cuales se miden a través de sus ensayos tradicionales. Las propiedades más críticas en el estado fresco del proceso de impresión son la extrudabilidad y la capacidad o tasa de construcción. La primera se refiere a la posibilidad de transportar el hormigón fresco a través de las tuberías y el sistema de bombeo a la boquilla de impresión, pudiendo ser extruido en un filamento continuo. Está influenciada principalmente por la trabajabilidad del hormigón y por las proporciones de la mezcla. La tasa de construcción se relaciona con la capacidad de imprimir un cierto número de capas en altura, sin deformación significativa de los filamentos impresos, permitiendo una correcta unión entre las mismas. Depende en particular de un parámetro llamado open time o intervalo de trabajo, relacionado a la variación de la trabajabilidad con el tiempo. Las dos propiedades clave, extrudabilidad y capacidad de construcción, se sustentan entonces en el conocimiento de la trabajabilidad y del intervalo de trabajo, obtenidos a través de la medición de la resistencia al corte del material en estado fresco.

En el presente trabajo se caracterizaron materiales disponibles y con ellos se ha dosificado y evaluado un mortero cementicio para impresión 3D, que en base a los resultados obtenidos cumple con las características exigidas por el proceso constructivo. Se obtuvieron sus parámetros característicos: Valores de resistencias a la compresión y flexión, la variación de la resistencia al corte con el tiempo y su intervalo de trabajo, como también posibles velocidades de construcción que el mismo permitiría.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1.MARCO INSTITUCIONAL – ORIGEN DEL TRABAJO	5
1.2.OBJETIVOS	6
1.2.1. Objetivos generales.....	6
1.2.2. Objetivos particulares.....	6
1.3.TAREAS DESARROLLADAS	6
2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL	8
2.1.MANUFACTURA DIGITAL.....	8
2.2.FABRICACIÓN ADITIVA – IMPRESIÓN 3D.....	8
2.2.1. Beneficios generales de las tecnologías de “manufactura aditiva”	9
2.2.2. Limitaciones y desafíos de las tecnologías de manufactura aditiva	9
2.2.3. Uso de la fabricación aditiva en diferentes sectores.....	10
2.3.FABRICACIÓN ADITIVA APLICADA EN LA CONSTRUCCIÓN.....	11
3. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES	14
3.1.ANALISIS GRANULOMETRICO.....	15
3.1.1. Procedimiento.....	15
3.1.2. Instrumental.....	16
3.1.3. Resultados.....	17
3.2.PERDIDA POR LAVADO EN TAMIZ N° 200.....	20
3.2.1. Procedimiento.....	20
3.2.2. Instrumental.....	20
3.2.3. Resultados.....	20
3.3.GRANULOMETRIA POR SEDIMENTACION – METODO DEL HIDROMETRO	21
3.3.1. Procedimiento.....	22
3.3.2. Instrumental.....	22
3.3.3. Resultados.....	23
3.4.DENSIDAD Y ABSORCION.....	26
3.4.1. Procedimiento.....	26
3.4.2. Instrumental.....	27
3.4.3. Resultados.....	27
3.5.DENSIDAD A GRANEL O PESO UNITARIO VOLUMETRICO (PUV).....	28
3.5.1. Procedimiento.....	29
3.5.2. Instrumental.....	29
3.5.3. Resultados.....	29

4. DOSIFICACION Y EVALUACION DE MEZCLAS	31
4.1.GRANULOMETRIA.....	31
4.2.ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO.....	35
4.2.1. Instrumental.....	35
4.2.2. Procedimiento.....	35
4.2.3. Resistencia a tracción por flexión.....	36
4.2.4. Resistencia a la compresión	38
4.3.ENSAYOS EN ESTADO FRESCO.....	41
4.3.1. Procedimiento.....	41
4.3.2. Resultados.....	45
5. CONCLUSIONES	51
6. BIBLIOGRAFIA	53

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 - Laboratorio de Estructuras, Universidad Nacional de Córdoba</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.1 - Figura Ilustración del proceso – Fuente: Manual Básico FDM I3D, INTI Diseño industrial</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3.1 - Filler calcáreo, muestra del laboratorio.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.2 - Tamizadora mecánica, laboratorio de estructuras.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.3 - Grafico: Granulometría de arenas</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.4 - Curva granulométrica del filler</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3.5 - Esquema de un hidrómetro.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.6 - Método del hidrómetro, Laboratorio de suelos</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.7 - granulometría completa del filler.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.8 - Ilustración de la condición saturado superficie seca de un árido</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4.1 - Granulometrías de materiales, mezcla de referencia y mezcla de partida.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.2 - Ensayo de corte sobre mezcla de partida</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.3 - Resistencia al Corte Vs Tiempo.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.4 - Izq: Probetas en molde luego de la preparación. Der: probetas en recipiente para curado.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.5 - Probeta prismática Lista para ensayo de tracción por flexión, Norma IRAM 1622</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.6 - Rotura de probeta prismática en ensayo de tracción por flexión, Norma IRAM 1622 ..</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.7 - Mitad de probeta prismática lista para ensayo de compresión</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.8 - Rotura a compresión de probeta prismática.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.9 - Probeta de mortero en estado fresco</i>	<i>43</i>

<i>Figura 4.10 - Ensayo de compresión en estado fresco.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.11 - Probeta de mortero fresco bajo carga en ensayo de compresión en estado fresco ...</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.12 - Resistencia al corte medida Vs tiempo.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.13 – Tensión de corte teórica Vs tiempo.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.13 – Ensayo de compresión en estado fresco: Deformación acumulada Vs tiempo</i>	<i>49</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1 - Granulometría de la arena fina de cantera cercana.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3.2 - Granulometría de la arena fina del Paraná</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3.3 - Tabla: Granulometría del Filler.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 3.4 - Perdida por lavado en tamiz N°200 (75 µm) – IRAM 1540.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3.5 - Resultados hidrómetro N°1</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3.6 - Resultados hidrómetro N°2</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 3.7 - Densidad y absorción de Arena del Paraná.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3.8 - Densidad y absorción de Arena de cantera Cercana</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3.9 - PUVC Arena de cantera cercana</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3.10 - PUVC Arena del Paraná</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 4.1 - Dosificación de referencia y dosificación de partida</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4.2 - Mezclas para ensayo de resistencias mecánicas, Norma IRAM 1622.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 4.3 - Resultados de ensayos de compresión y tracción por flexión en probetas prismáticas que recibieron tratamiento de curado</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 4.4 - Resultados de ensayos de compresión y tracción por flexión en probetas prismáticas que no recibieron tratamiento de curado</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 4.5 - Velocidades de construcción</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4.6 – Tension de corte actuante según velocidad de construcción</i>	<i>42</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MARCO INSTITUCIONAL – ORIGEN DEL TRABAJO

El presente documento es el resultado del trabajo realizado por parte del autor en el marco de la asignatura Práctica Profesional Supervisada bajo la modalidad Pasante Interno – Becario; siendo el mismo un requisito para poder acceder al título de ingeniero civil en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

El objetivo fundamental de esta asignatura es que el alumno tome contacto con el medio laboral antes de recibirse, mediante el cumplimiento de un número mínimo de horas de trabajo, permitiéndole así integrar conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera con actividades a desarrollar en su vida profesional.

En este contexto, el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Córdoba se ofrece permanentemente como entidad receptora para que los alumnos puedan desarrollar allí su práctica supervisada. El Laboratorio es una entidad dependiente del Departamento de Estructuras de la mencionada Facultad, que presta servicios (ensayos, asesoramiento, investigación) tanto a empresas públicas como privadas y también a organismos propios de la Universidad.

Figura 1.1 - Laboratorio de Estructuras, Universidad Nacional de Córdoba



Como entidad receptora el Laboratorio brindó sus instalaciones al autor para llevar adelante el trabajo “**Dosificación de mortero cementicio para impresión 3D**”, en el marco de una línea de investigación avalada por la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la Universidad, que tiene como objetivo final desarrollar la tecnología de impresión 3D con mortero cementicio para la construcción in situ de viviendas

1.2. OBJETIVOS

De las anteriores consideraciones surgen los objetivos de esta Práctica Supervisada:

1.2.1. Objetivos generales

- Tomar contacto con la práctica profesional, aplicando y profundizando conocimientos adquiridos durante la carrera.
- Interactuar con profesionales afines a las áreas de la tecnología del hormigón y otras tecnologías relacionadas al caso particular.
- Adquirir experiencia en la elaboración de informes y en la comprensión y utilización de normas.

1.2.2. Objetivos particulares

- Recopilar y analizar información y estudios previos sobre morteros cementicios e impresión 3D aplicada a la construcción.
- Proponer dosificaciones de morteros y evaluarlas mediante diferentes ensayos, introduciendo modificaciones en función de estos.
- Obtener una dosificación final que cumpla los requisitos necesarios.

1.3. TAREAS DESARROLLADAS

La técnica de fabricación aditiva o impresión 3D irrumpe en el ámbito de la construcción como una alternativa que posibilita la automatización de ciertos procesos, permitiendo lograr un producto final de características similares a la construcción tradicional. Por su funcionamiento impone ciertos requerimientos en el material utilizado: cualidad de ser bombeado, extruido, y poseer ciertas características reológicas en su estado fresco.

Desde esta base, se realizaron los ensayos necesarios para obtener la dosificación de un mortero cementicio que sea lo suficientemente fluido para poder bombearlo, pero a la vez suficientemente firme para mantener su forma al ser depositado por la máquina impresora, pudiendo soportar su propio peso y el de las sucesivas capas a medida que avance el proceso.

Como se detalla más adelante, se trabajó principalmente en el área de la tecnología del hormigón, desarrollando las siguientes tareas:

- Recopilación bibliográfica: Búsqueda y análisis de información sobre impresión 3D, morteros cementicios, antecedentes similares, marco normativo.
- Caracterización de los materiales a utilizar para la composición del mortero.
- Planteamiento de dosificaciones posibles.
- Realización de ensayos para evaluar los parámetros más importantes.
- Análisis de resultados y elaboración de conclusiones.

2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

2.1. MANUFACTURA DIGITAL

Entendemos por *manufactura digital* a un conjunto de tecnologías que permiten transformar materiales usando como información inicial archivos digitales que son representaciones virtuales de objetos, elaborados con programas de diseño asistido por computadoras «cad» o ingeniería asistida por computadora «cae». A niveles generales permiten entre otras cosas: mayor fidelidad, velocidad y economía de recursos, como también materializar piezas o modelos de morfología compleja que no se podrían fabricar con las tecnologías tradicionales.

Dentro de esta se encuentran las tecnologías por adición o *fabricación aditiva*, que se caracterizan por obtener o dar la forma final a un sólido físico en tres dimensiones agregando selectivamente material, generalmente mediante la superposición de capas sobre capas. Proceso comúnmente conocido como *impresión 3D*.

2.2. FABRICACIÓN ADITIVA – IMPRESIÓN 3D

Existe una gran variedad de sub-tecnologías diferentes dentro de los procesos aditivos, todas ellas se enfocan en la obtención final de objetos físicos-tangibles a partir de la creación de un archivo CAD 3D (computer-aided design) el cual es una mera representación de la geometría del objeto deseado. Estos archivos son colocados en un software del tipo CAM (computer-aided manufacturing) el cual realiza un rebanado o slicing horizontal en capas individuales del modelo 3D, generando las instrucciones necesarias para la fabricación de cada una de las capas, paso a paso, por el equipo respectivo.

Figura 2.1 - Figura Ilustración del proceso – Fuente: Manual Básico FDM I3D, INTI Diseño industrial



En la actualidad, estas tecnologías pueden usar una gran variedad de materias primas: diferentes tipos de plásticos, metales y sus diferentes aleaciones, compuestos cerámicos, materiales cementicios, materiales compuestos específicos para aplicaciones particulares o bien hasta alimentos; todos en las diferentes configuraciones físicas posibles: polvos, líquidos, semisólidos y sólidos.

2.2.1. Beneficios generales de las tecnologías de “manufactura aditiva”

Se enumera a continuación algunas de las ventajas propias de esta tecnología sobre los sistemas de fabricación tradicionales:

- **Del diseño CAD a la Parte/Pieza/Producto rápidamente:** Los procesos de “Manufactura Aditiva” permiten que un diseño CAD 3D se convierta directamente en un objeto físico material con *poca mano de obra*, englobando varios pasos productivos, *reduciendo drásticamente los tiempos totales de fabricación*.

- **Personalización y creación de series cortas:** Permiten generar productos con una *mayor personalización y especificidad*, sin costes adicionales de fabricación, tales como costos de herramientas adicionales o como cambios en matricería o moldes. *En la industria de la construcción, la no utilización de encofrados significaría una gran reducción de costos.*

- **Libertad geométrica:** Permite realizar el diseño enfocado 100% en la función final que se requiere satisfacer. Por ejemplo, permitiría diseñar componentes con estructuras internas huecas o reticuladas estructuralmente, imposibles de producir con técnicas de fabricación convencionales.

- **Diseñar Piezas reduciendo pesos o volúmenes:** Al construir capa a capa es posible un tipo de *fabricación más flexible permitiendo producir estructuras ligeras y más optimizadas*. Por ejemplo, las partes se pueden hacer con estructuras del tipo panal de abejas o con reticulados complejos que mantienen la resistencia estructural necesaria con una menor densidad y un peso más reducido. En la industria de la construcción el transporte de materiales es un condicionante muy importante y por lo tanto poder reducir el peso de algunos elementos constructivos mediante la fabricación aditiva sería muy beneficioso.

2.2.2. Limitaciones y desafíos de las tecnologías de manufactura aditiva

A pesar de los evidentes beneficios mencionados hasta aquí, existen algunas limitaciones de estas tecnologías que impiden que se implementen de manera rápida y generalizada en las diferentes industrias:

- **Disponibilidad y costo de los materiales:** Si bien es posible utilizar técnicas de “Fabricación Aditiva” con muchos materiales diferentes, la gama de materias primas disponible es inferior a la que puede ser utilizada por otros métodos de fabricación. *Actualmente existen desarrollos en el extranjero que utilizan morteros cementicios o*

geopolímeros pero que no están disponibles comercialmente, siendo esta una motivación para el desarrollo de este trabajo.

- **Acabado superficial de las piezas y velocidad de fabricación:** La velocidad de fabricación condiciona la calidad superficial de los objetos impresos. La estratificación generada por la acumulación de capas, es un defecto que puede apreciarse en la superficie de la pieza, la mejora de esta característica reside en la disminución de los espesores de las capas incidiendo de manera directa en el tiempo de fabricación, haciendo complejo este equilibrio.

- **Limitaciones dimensionales de las piezas:** El volumen de los productos que se pueden manufacturar con estas tecnologías está condicionado por el volumen del área de trabajo específico de cada equipo según la tecnología empleada.

- **Coste de la maquinaria y equipos asociados al sector:** Similar a lo que sucede con los materiales, el costo y la disponibilidad de la maquinaria se ve muy influenciado por el tamaño del mercado global actual.

2.2.3. Uso de la fabricación aditiva en diferentes sectores

Como se vio hasta aquí, la fabricación Aditiva conlleva un paradigma de fabricación diferente respecto a otros sistemas de producción, generando tanto innovaciones inmediatas como posibilidades conceptuales muy importantes de cara al futuro. Actualmente está siendo utilizada a diario en decenas de industrias para producir tanto prototipos como objetos finales.

Ejemplo de lo anterior son la industria automovilística que junto con la aeronáutica y aeroespacial utilizan esta tecnología para disminuir tiempos y costos en el desarrollo y evaluación de prototipos como también para la producción de piezas finales. La posibilidad de imprimir piezas huecas les permite aligerar pesos, incidiendo de manera directa en el ahorro energético y en el impacto medioambiental. Otro ejemplo es la industria médica que utiliza la fabricación aditiva en aplicaciones tan diversas como la realización de maquetas de simulación, herramientas especiales para intervenciones quirúrgicas, implantes, y hasta la formación artificial de tejidos humanos mediante la deposición de células vivas. También en la fabricación de audífonos, prótesis dentales y ortopédicas a medida del paciente ganando mucho en confort. La industria farmacéutica, electrónica, de la moda y el calzado, tanto como la militar y la gastronómica son otros casos que se pueden citar como sectores que ya utilizan de manera constante esta nueva tecnología.

Esta síntesis ilustra claramente que la fabricación aditiva es una tecnología transversal, que abarca muchos ámbitos de producción distintos, con escalas de aplicación y objetivos muy dispares. Aplicada a la construcción y arquitectura la fabricación aditiva puede ayudar en menos tiempo y con menor coste a plantear soluciones constructivas novedosas que en sí mismas tengan un impacto positivo, principalmente en abaratar la edificación y acelerar los tiempos de la construcción actual.

2.3. FABRICACIÓN ADITIVA APLICADA EN LA CONSTRUCCIÓN

La posibilidad que brinda la fabricación aditiva de construir estructuras de hormigón sin la utilización de encofrados es una gran ventaja en términos de producción, libertad arquitectónica y reducción de costos. También permitiría automatizar procesos utilizando robots controlados digitalmente, e implementar estas nuevas técnicas de construcción por ejemplo en ambientes altamente contaminados. El objetivo es entonces la aplicación de la impresión 3D a la escala de una obra de construcción, junto con la producción de elementos estructurales para ser ensamblados posteriormente lo cual actualmente ya se está realizando en el extranjero. Ejemplos de ello son las empresas Winsun de origen chino y Apis Cor de origen ruso.

La técnica de fabricación aditiva por extrusión puede llegar a ser una técnica de construcción a escala industrial muy eficiente, pero para lograr esto de manera óptima, se necesita superar ciertas limitaciones importantes: En primer lugar, la unión entre capas, lo cual es una debilidad en estructuras impresas cuando no se dispone de un esquema estructural con encadenado, aunque no es tan limitante cuando el elemento impreso trabaja solo a compresión y/o corte. Otra limitación es el control del tiempo de endurecimiento del material: como se dijo anteriormente, el mismo debe ser lo suficientemente duro para sostener el peso de las futuras capas depositadas, pudiendo esta restricción conducir a un prolongado tiempo de construcción. Además, se requiere que el bombeo de material tenga un caudal constante, por lo que se utilizan bombas de cavidad progresiva lo cual limita el tamaño máximo de áridos utilizados a 3 o 4 mm.

El intervalo entre la impresión de 2 capas debe ser entonces lo suficientemente largo para permitir que el material desarrolle la fuerza mecánica adecuada para sostener el peso de las capas depositadas posteriormente, pero lo suficientemente corto para garantizar una buena fuerza de unión entre capas y una velocidad de construcción adecuada.

El tiempo óptimo entre deposición de capas será entonces el más corto que permita la estabilidad de la estructura durante la construcción, como así también el desarrollo de la mayor fuerza de unión posible y una tasa de construcción compatible con una estructura estable de hormigón fresco depositado.

En relación a lo anterior, existen algunas investigaciones muy importantes que plantean los conceptos más relevantes a tener en cuenta a la hora de dosificar y evaluar morteros para impresión 3D:

- Le T. T., Austin S.A., Lim S., Buswell R. A., Gibb A. G. F., Thorpe T.; *“Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete”*, RILEM (2012)
- Perrot A., Rangeard D., Pierre A.; *“Structural built-up of cement-based materials used for 3D printing extrusion techniques”* (2015)
- Luperi F. J., Soffietti F. P.; *“Dosificación y caracterización de mortero de base cementicia para la impresión 3D”*, IDIT CONICET-UNC (2016)

Las mismas han sido una guía constante a la hora de desarrollar el trabajo, y a continuación se exponen sus conclusiones más relevantes:

El hormigón de impresión debe poseer las ventajas del hormigón autocompactante como del hormigón proyectado. El principio básico del hormigón autocompactante es que los agregados tengan una granulometría continua con un contenido mínimo de huecos y un volumen considerable de cemento con un superfluidificante, que llena el espacio entre las partículas del agregado para darle fluidez, permitiendo eliminar así el proceso de compactación con vibrado. En el hormigón proyectado la mezcla se diseña con la menor cantidad de huecos posible. Esto es importante con el proceso en húmedo para facilitar el flujo en las mangueras de suministro y es logrado con una granulometría continua combinada (agregados, cemento y adiciones en polvo). Se necesita un contenido de cemento relativamente alto para facilitar la adhesión y formar una capa lubricante en el interior de las tuberías de transporte permitiendo que la mezcla sea bombeable y proyectable.

Entonces el comportamiento autocompactante de un hormigón de impresión influiría en la capacidad de extruir filamentos consistentes, mientras que el uso de los principios del hormigón proyectado puede ayudar a asegurar que el hormigón fresco sea transportado eficazmente en el sistema de tuberías y bomba sin bloqueos ni segregación.

Las propiedades claves del hormigón de impresión en estado endurecido son la resistencia a la compresión y a la flexión, las cuales se miden a través de sus ensayos tradicionales.

Las propiedades más críticas en el estado fresco del proceso de impresión son la *extrudabilidad* y la *capacidad o tasa de construcción*. La primera se refiere a la posibilidad de transportar el hormigón fresco a través de las tuberías y el sistema de bombeo a la boquilla de impresión, pudiendo ser extruido en un filamento continuo. Está influenciada principalmente por la *trabajabilidad* del hormigón y por las proporciones de la mezcla (composición, relación agua-cemento, uso de aditivos). Se logra buena extrudabilidad aplicando los principios del hormigón autocompactante y del hormigón rociado en el diseño de la mezcla.

La tasa de construcción se relaciona con la capacidad de imprimir un cierto número de capas en altura, sin deformación significativa de los filamentos impresos, permitiendo una correcta unión entre las mismas. Como la extrudabilidad, también depende de las proporciones de la mezcla y de la trabajabilidad; pero además en particular depende de un parámetro llamado *open time o intervalo de trabajo*, relacionado a la variación de la trabajabilidad con el tiempo, siendo el periodo de tiempo en el cual el hormigón fresco mantiene características que permiten su empleo, medido desde el momento en que se hidrata. Se genera un dilema aquí, ya que la trabajabilidad necesaria para mantener un caudal constante para una buena extrusión requiere un intervalo de trabajo largo, de lo contrario el material se vuelve más rígido y da como resultado una disminución del caudal y de la velocidad de impresión, y posiblemente el bloqueo del sistema. Por otra parte, si bien un intervalo de trabajo largo favorece la extrudabilidad y ayuda a la unión entre

capas, podría ser perjudicial para el aspecto de deformación de las mismas y la capacidad de construcción. *Por lo tanto las dos propiedades clave, extrudabilidad y capacidad de construcción, se sustentan en el conocimiento de la trabajabilidad y del intervalo de trabajo.*

El parámetro tradicional para medir la consistencia y la trabajabilidad en hormigones es el valor de asentamiento del cono de Abrams. A su vez existen diversas correlaciones de este parámetro con el esfuerzo de corte al reposo, pero sin embargo este parámetro no resulta representativo de la trabajabilidad del material, aun teniendo en cuenta las correlaciones sugeridas debido a que las mismas son aplicables a un rango más fluido del material respecto al necesario en la impresión 3D. Un enfoque alternativo sería llevar a cabo una investigación reológica más precisa, ajustando por ejemplo un modelo de fluido de Bingham o similar, en términos de la resistencia al corte al reposo y la viscosidad plástica, a través del método de ensayo de 2 puntos. No obstante, estos métodos tienen sus dificultades y no pueden ser llevados a cabo in-situ. Por estos motivos se opta por medir la trabajabilidad del mortero utilizando una veleta de corte manual (originalmente usada para medir la resistencia al corte de suelos), que además permite evaluar este parámetro en diferentes puntos del proceso de producción, como ser el mezclador o en la tolva previo al bombeo.

El intervalo de trabajo para un material cementicio tiene una relación con su tiempo de fraguado, usualmente medido con un aparato Vicat. Sin embargo, este equipo está diseñado para determinar el tiempo de fraguado inicial y final que no son particularmente útiles para caracterizar el cambio de la trabajabilidad con el tiempo del hormigón fresco. Diversos estudios utilizan una prueba de asentamiento para monitorear esta relación, pero de igual manera que con la trabajabilidad, tampoco es adecuada en el caso de hormigón de impresión. Se considera que el cambio de la resistencia al corte con el tiempo, medida con una veleta de corte resulta más informativo.

Se ha demostrado que una resistencia al corte en el intervalo de 0,8 – 1,5 KPa es óptima para permitir una buena extrusión. Con menos de 0,8 KPa, el hormigón fresco es demasiado húmedo y se produciría segregación en el sistema de tuberías-bomba-boquilla. Además los filamentos extruidos tendrían una gran deformación, incluso sin poder resistir su peso propio. Por encima de 1,5 KPa, el hormigón fresco sería demasiado rígido para la impresión, generando que los filamentos impresos se fracturen, sin poder imprimir de manera continua.

3. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES

Para definir los materiales a utilizar en las dosificaciones nos basamos principalmente en la investigación *“Dosificación y caracterización de mortero de base cementicia para la impresión 3D”*. En la misma se utilizó arena del Paraná, cemento portland CPN40 y como material de adición para lograr la granulometría requerida, una toba zeolítica que en ese momento se encontraba a disposición en el laboratorio para ser estudiada y analizada. A pesar de obtener resultados favorables, las conclusiones de la investigación no pudieron aplicarse de manera directa debido a que la toba no llegó a comercializarse.

En el presente trabajo se caracterizaron 2 arenas diferentes, (a. Arena del Paraná, b. Arena de una cantera cercana) con el fin de escoger la que mejores prestaciones posea para lograr una granulometría continua en la mezcla final. Se trabajó con un cemento portland CPF40, y se reemplazó la toba zeolítica como material de adición por un filler calcáreo obtenido de la cantera Blancaley de la localidad de San Agustín, provincia de Córdoba.

En sí un filler calcáreo es un material de naturaleza inorgánica y origen mineral carbonatado, compuesto principalmente por carbonato de calcio y considerado como una adición mineral inactiva, ya que no forma productos de hidratación SCH (silicatos de calcio hidratados). Sus partículas son sumamente finas y en general es un material muy utilizado en la elaboración de cemento portland ya que molido conjuntamente con el clinker, en proporciones determinadas, incide favorablemente en las propiedades y el comportamiento de morteros y hormigones, tanto en estado fresco como endurecido.

La utilización del mismo en este trabajo fue con el fin de aprovechar el fenómeno conocido como “efecto filler”, el cual tiene que ver principalmente con la capacidad de las partículas finas de llenar u ocupar los espacios disponibles en la mezcla, permitiendo así obtener una granulometría continua cumpliendo con uno de los requisitos buscados en el mortero de impresión.

Figura 3.1 - Filler calcáreo, muestra del laboratorio



3.1. ANALISIS GRANULOMETRICO

La granulometría de un agregado es la característica que más influye en la cantidad de pasta de cemento (cemento + agua) que se necesita para obtener una determinada trabajabilidad. Al ser el cemento el componente más costoso se tiende a minimizar su uso, disminuyendo la cantidad de pasta sin que se vea afectada la trabajabilidad y la resistencia del hormigón, a través de un buen diseño de la granulometría de la mezcla en función de las características buscadas. Las arenas muy finas requieren mayor cantidad de pasta de cemento por lo que resultan antieconómicas, mientras que las arenas gruesas de mala gradación (con falta de material fino) pueden producir mezclas poco trabajables. En general se busca agregados que presenten una curva granulométrica suave. La granulometría influye también en la porosidad, contracción por secado, homogeneidad, durabilidad, y como se explicó anteriormente en este trabajo, también en la *bombeabilidad* de la mezcla.

3.1.1. Procedimiento

El primer ensayo consistió en tamizar mecánicamente una muestra (de tamaño determinado por norma) de cada tipo de arena y una de filler en estado natural,

previamente secadas en estufa a 105°C hasta peso constante. El procedimiento corresponde a la “Norma IRAM 1505: Agregados. Análisis granulométrico”.

3.1.2. Instrumental

Para este ensayo se utilizó el siguiente instrumental:

- Estufa.
- Balanza (Precisión: 0,1g).
- Tamices de aberturas cuadradas y tela de alambre tejido (Aberturas de malla: 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 600µm; 300µm; 150µm). Fondo receptor y tapa.
- Tamizadora mecánica.

Figura 3.2 - Tamizadora mecánica, laboratorio de estructuras



3.1.3. Resultados

Los resultados obtenidos para estos ensayos se indican en las siguientes tablas y gráficos:

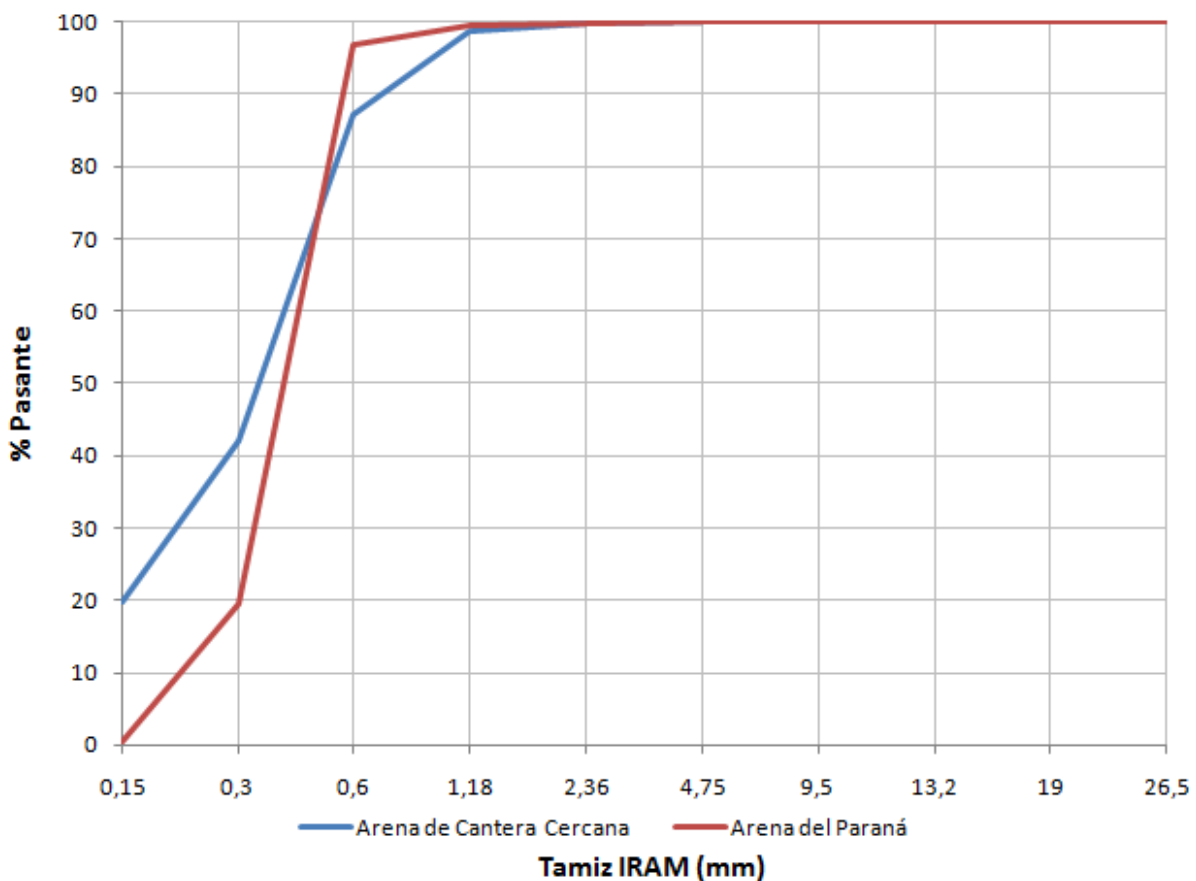
Tabla 3.1 - Granulometría de la arena fina de cantera cercana

ANALISIS GRANULOMETRICO - IRAM 1505					
MASA INICIAL [grs]			500		
TAMIZ IRAM		RETENIDO		PASANTE	
[mm]	[pulgadas]	[grs]	%	[grs]	%
4,75	No 4	0,0	0,0	499,6	100,0
2,36	No 8	1,1	0,2	498,5	99,8
1,18	No 16	5,1	1,0	493,4	98,8
0,6	No 30	57,4	11,5	436	87,3
0,3	No 50	226,2	45,3	209,8	42,0
0,15	No 100	110,5	22,1	99,3	19,9
fondo		99,3	19,9		
TOTAL		499,6	100,0		
MODULO DE FINEZA		1,52			

Tabla 3.2 - Granulometría de la arena fina del Paraná

ANALISIS GRANULOMETRICO - IRAM 1505					
MASA INICIAL [grs]			600,2		
TAMIZ IRAM		RETENIDO		PASANTE	
[mm]	[pulgadas]	[grs]	%	[grs]	%
4,75	No 4	0,0	0,0	600,2	100,0
2,36	No 8	0,9	0,2	599,3	99,9
1,18	No 16	2,4	0,5	596,9	99,5
0,6	No 30	16,5	3,3	580,4	96,7
0,3	No 50	462,8	92,6	117,6	19,6
0,15	No 100	114,0	22,8	3,6	0,6
fondo		3,6	0,7		
TOTAL		600,2	100,0		
MODULO DE FINEZA		1,84			

Figura 3.3 - Grafico: Granulometría de arenas

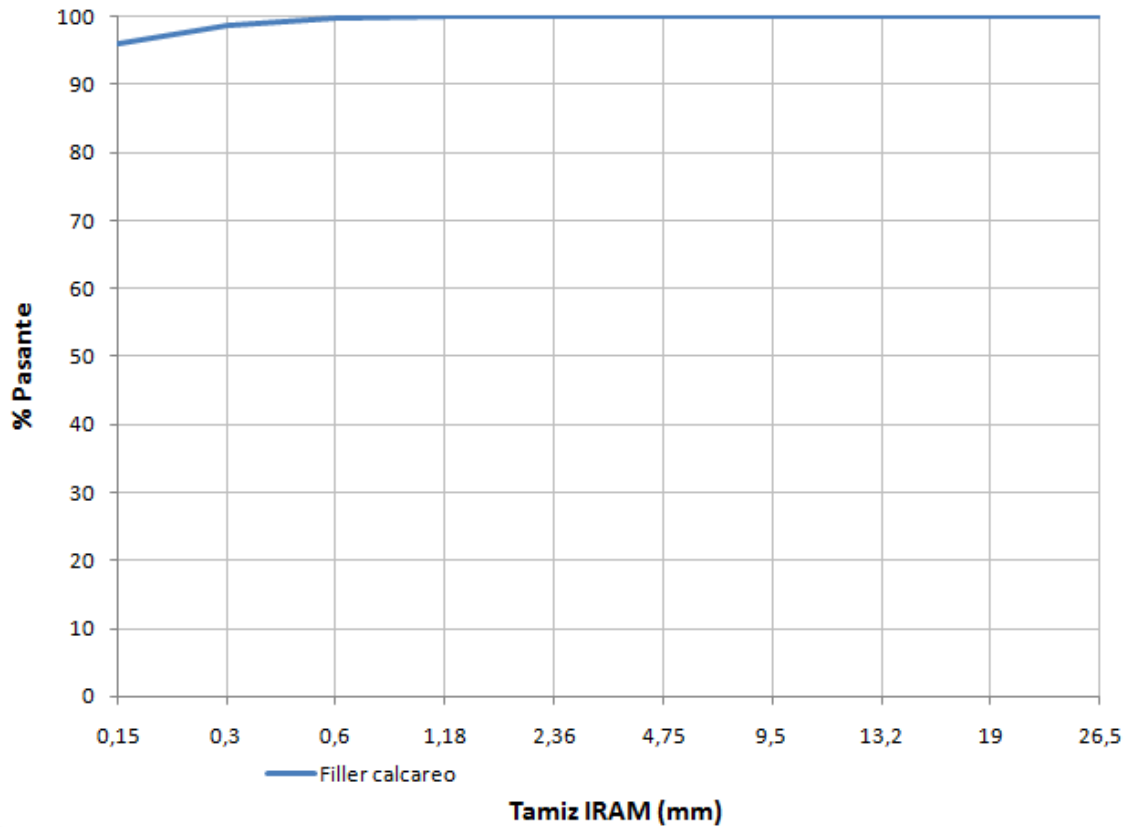


Se puede apreciar del grafico anterior que la arena de la cantera cercana es un material que tiene un mayor porcentaje de finos que la arena del Paraná, lo cual se confirma a través del módulo de fineza de ambas (1,52 para la arena de la cantera cercana y 1,84 para la arena del Paraná).

Tabla 3.3 - Tabla: Granulometría del Filler

ANALISIS GRANULOMETRICO - IRAM 1505					
MASA INICIAL [grs]			200,4		
TAMIZ IRAM		RETENIDO		PASANTE	
[mm]	[pulgadas]	[grs]	%	[grs]	%
4,75	No 4	0,0	0,0	200,0	100,0
2,36	No 8	0,0	0,0	200,0	100,0
1,18	No 16	0,1	0,1	199,9	100,0
0,6	No 30	0,4	0,2	199,5	99,8
0,3	No 50	2,1	1,1	197,4	98,7
0,15	No 100	5,6	2,8	191,8	95,9
fondo		191,8	95,9		
TOTAL		200,0	100,0		

Figura 3.4 - Curva granulométrica del filler



En el caso del filler, al ser un material tan fino con un porcentaje tan grande de partículas pasantes del tamiz de 0,15mm (N°100) los resultados dados por este ensayo no son representativos de su granulometría real. Para poder conocer con mayor precisión el tamaño de las partículas que lo componen y determinar así su distribución granulométrica completa, se procedió a realizarle los ensayos descriptos por la Norma IRAM 1540: Perdida por lavado en tamiz N°200, y por la Norma IRAM 10515: Granulometría por sedimentación o método del hidrómetro.

3.2. PERDIDA POR LAVADO EN TAMIZ N° 200

3.2.1. Procedimiento

Se lavó una muestra del material previamente secada en estufa hasta peso constante, haciendo pasar el agua de lavado con material en suspensión y disuelto a través de un tamiz IRAM 75µm. Luego se calculó la perdida en masa resultante de este tratamiento como un porcentaje en masa de la muestra original.

3.2.2. Instrumental

Para la realización de este ensayo se utilizó:

- Estufa.
- Balanza (Precisión: 0,1g).
- Un tamiz IRAM 75µm y otro de 1,18mm.

3.2.3. Resultados

Tabla 3.4 - Perdida por lavado en tamiz N°200 (75 µm) – IRAM 1540

TIPO DE MUESTRA	FILLER CALCAREO
MASE SECA INICIAL [gr]	200
MASA SECA LAVADA [gr]	9,5
PERDIDA [gr]	190,5
PERDIDA [gr]	95%

Una vez determinado que el material tiene un porcentaje mayor a un 80% de partículas pasantes del tamiz N°200 se debe utilizar el método del hidrómetro para poder obtener su distribución granulométrica.

3.3. GRANULOMETRIA POR SEDIMENTACION – METODO DEL HIDROMETRO

Este es un método ampliamente utilizado para obtener una estimación de la distribución granulométrica de suelos cuyas partículas se encuentran desde el tamiz N°200 (0,075mm) hasta alrededor de 0,001mm y sus resultados pueden combinarse con los datos obtenidos en el análisis mecánico del material.

Utiliza la relación entre la velocidad de caída de esferas en un fluido, el diámetro de la esfera (D), el peso específico tanto de esta como del fluido (γ_s y γ_l) y la viscosidad de este último (η), en la forma expresada por la ley de Stokes:

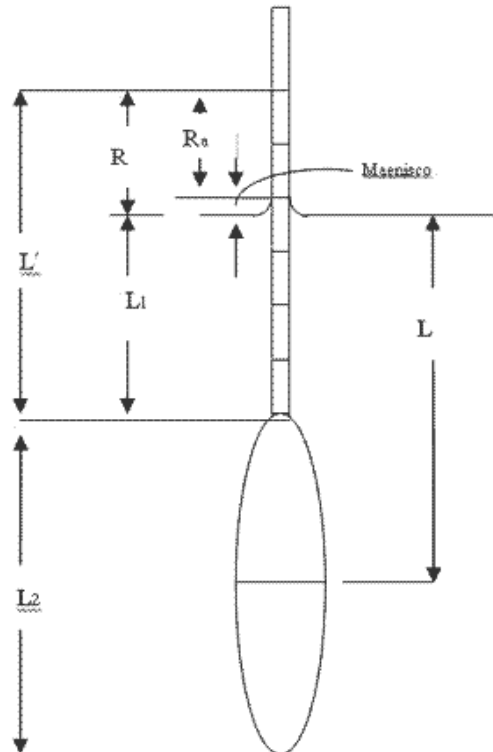
$$v = \frac{2(\gamma_s - \gamma_l)}{9\eta} \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

De donde, se obtiene el diámetro de las partículas como:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta v}{\gamma_s - \gamma_l}}$$

El hidrómetro determina la gravedad específica de la suspensión agua-material en el centro del bulbo (ver imagen siguiente). Todas las partículas de mayor tamaño que aquellas que se encuentran aún en suspensión en la zona mostrada como L (distancia entre el centro de volumen del bulbo y la superficie del agua) habrán caído por debajo de la profundidad del centro de volumen del hidrómetro. Como el hidrómetro tiene un peso constante a medida que disminuye la gravedad específica de la suspensión, el mismo se hundirá más (aumentando L). Como L representa la distancia de caída de las partículas en un intervalo de tiempo dado t, obtendremos la velocidad de caída de las mismas como $v = \frac{L}{t}$. Por consiguiente es necesario encontrar la profundidad L correspondiente a algún tiempo transcurrido t (tiempo entre lecturas) de forma que se pueda determinar la velocidad necesaria para utilizar en la ecuación de Stokes. De obtener la lectura R del hidrómetro en cada medición se puede determinar L sabiendo que $L = L_1 + \frac{1}{2}L_2$, con L_2 constante del hidrómetro y L_1 en función de la lectura obtenida.

Figura 3.5 - Esquema de un hidrómetro



3.3.1. Procedimiento

Se mezcló 50gr de filler con 125ml de solución al 4% de NaPO_3 para neutralizar las cargas sobre las partículas más pequeñas del material evitando la floculación. Se transfirió la mezcla a un cilindro de sedimentación añadiendo agua hasta completar los 1000ml, agitándose durante un minuto aproximadamente. A su vez se preparo un cilindro patrón de control con agua común y 125ml de solución de dispersante para corrección de menisco y por temperatura. Se tomaron medidas con el hidrómetro en diferentes intervalos de tiempo durante aproximadamente 48hs, midiendo la temperatura del agua para efectuar las correcciones correspondientes. El procedimiento se realizo con 2 muestras de filler en paralelo para luego promediar los resultados obtenidos.

3.3.2. Instrumental

Al no contar el laboratorio de estructuras con todo el instrumental necesario y siendo además un ensayo muy utilizado en la caracterización de suelos finos como se dijo anterior mente, el mismo se llevo a cabo en el laboratorio de geotecnia de la facultad. Para su desarrollo se utilizó:

- Agente dispersante: NaPO_3 .
- Balanza (precisión: 0,1g).

- Cilindros de Sedimentación (graduados en 1000 ml).
- Cronometro
- Termómetro
- Hidrómetro (tipo 152H).

Figura 3.6 - Método del hidrómetro, Laboratorio de suelos



3.3.3. Resultados

Los resultados obtenidos de cada hidrómetro se muestran las tablas siguientes.

Tabla 3.5 - Resultados hidrómetro N°1

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - METODO DEL HIDROMETRO			
Hidrómetro N°	Der - ASTM D422 (152 - H)		
Gs de los sólidos	2,70	a	0,99
Agente dispersante	NaPO3	Cantidad (%)	4
Peso de suelo seco (Wd)[gr]	50		
Corrección de cero	5		
Corrección del menisco	1		

t (min) transcurrido	Temp °C	Lect. Real Rreal	Ct	Lectura Corregida Rc	%más fino (Rc.a/Wd)	Corregido por menisco R	L tabla 7-5	L/t	K tabla 7-4	Diam.(mm) Kv(L/t)
1	23	38	0,70	33,70	67%	39	9,9	9,9000	0,0130	0,040904
2	23	33	0,70	28,70	57%	34	10,7	5,3500	0,0130	0,030069
3	23	30	0,70	25,70	51%	31	11,2	3,7333	0,0130	0,025118
4	23	28	0,70	23,70	47%	29	11,5	2,8750	0,0130	0,022043
8	23	23	0,70	18,70	37%	24	12,4	1,5500	0,0130	0,016185
16	23	20	0,70	15,70	31%	21	12,9	0,8063	0,0130	0,011673
30	23	17	0,70	12,70	25%	18	13,3	0,4433	0,0130	0,008656
60	22	14	0,40	9,40	19%	15	13,8	0,2300	0,0131	0,006283
120	22	12	0,40	7,40	15%	13	14,2	0,1183	0,0131	0,004506
240	22	10	0,40	5,40	11%	11	14,5	0,0604	0,0131	0,003220
399	23	8	0,70	3,70	7%	9	14,8	0,0371	0,0130	0,002504
1357	23	6	0,70	1,70	3%	7	15,2	0,0112	0,0130	0,001376
1762	23	5	0,70	0,70	1%	6	15,3	0,0087	0,0130	0,001211
2902	22	5	0,40	0,40	1%	6	15,3	0,0053	0,0131	0,000951

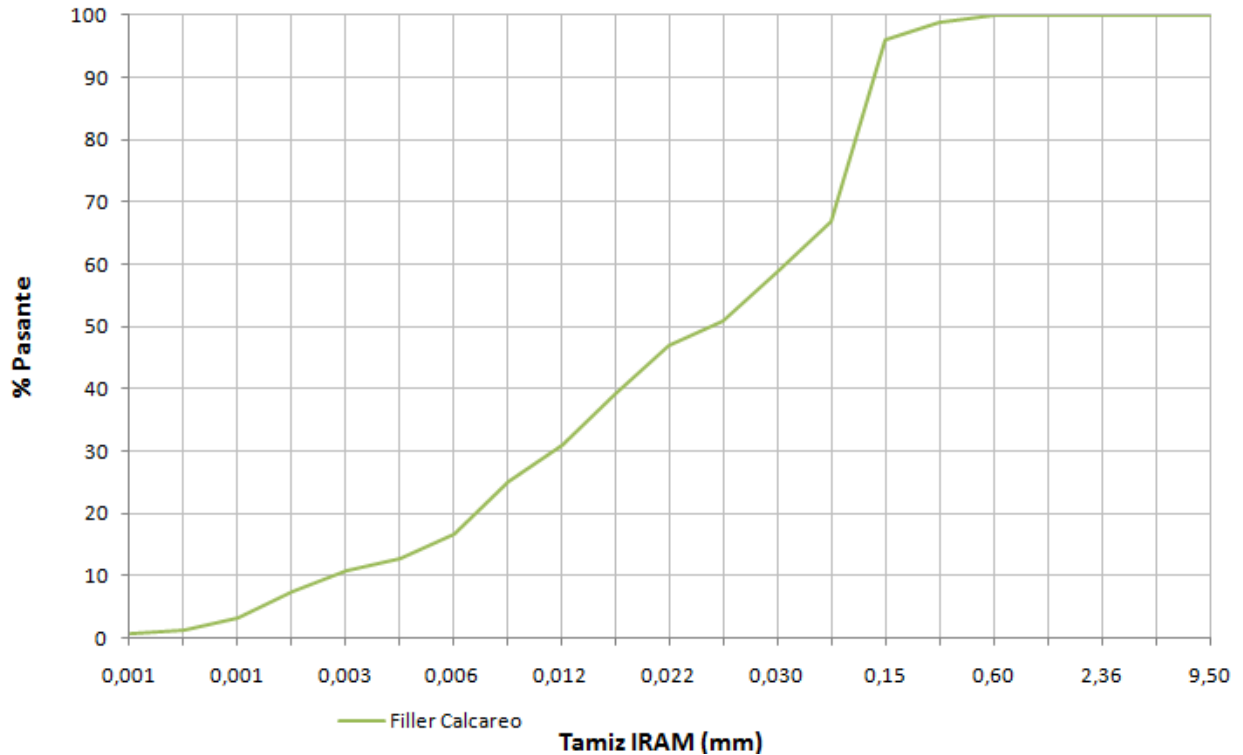
Tabla 3.6 - Resultados hidrómetro N°2

ANALISIS GRANULOMETRICO - METODO DEL HIDROMETRO			
Hidrómetro N°	Izq - ASTM D422 (152 - H)		
Gs de los sólidos	2,70	a	0,99
Agente dispersante	NaPO3	Cantidad (%)	4
Peso de suelo seco (Wd)gr	50		
Corrección de cero	5		
Corrección del menisco	1		

t (min) transcurrido	Temp °C	Lect. Real Rreal	Ct	Lectura Corregida Rc	%más fino (Rc.a/Wd)	Corregido por menisco R	L tabla 7-5	L/t	K tabla 7-4	Diam.(mm) Kv(L/t)
1	23	38	0,70	33,70	67%	39	9,9	9,9000	0,0130	0,040904
2	23	34	0,70	29,70	59%	35	10,5	5,2500	0,0130	0,029787
3	23	30	0,70	25,70	51%	31	11,2	3,7333	0,0130	0,025118
4	23	28	0,70	23,70	47%	29	11,5	2,8750	0,0130	0,022043
8	23	24	0,70	19,70	39%	25	12,2	1,5250	0,0130	0,016054
16	23	20	0,70	15,70	31%	21	12,9	0,8063	0,0130	0,011673
30	23	17	0,70	12,70	25%	18	13,3	0,4433	0,0130	0,008656
60	22	13	0,40	8,40	17%	14	14	0,2333	0,0131	0,006328
120	22	11	0,40	6,40	13%	12	14,3	0,1192	0,0131	0,004522
240	22	10	0,40	5,40	11%	11	14,5	0,0604	0,0131	0,003220
414	23	8	0,70	3,70	7%	9	14,8	0,0357	0,0130	0,002458
1375	23	6	0,70	1,70	3%	7	15,2	0,0111	0,0130	0,001367
1780	23	5	0,70	0,70	1%	6	15,3	0,0086	0,0130	0,001205
2920	22	5	0,40	0,40	1%	6	15,3	0,0052	0,0131	0,000948

A continuación se muestra la curva granulométrica completa del filler obtenida de unificar todos los ensayos descritos anteriormente.

Figura 3.7 - granulometría completa del filler



Se prosiguió con la caracterización de las arenas realizándoles el ensayo descrito por la norma IRAM 1533-02: Densidad y absorción en agregados finos, y el descrito por la norma IRAM 1548-10: Densidad a granel y espacios vacíos, con el fin de escoger la más adecuada para realizar las dosificaciones del mortero de impresión.

3.4. DENSIDAD Y ABSORCIÓN

Resulta necesario conocer el estado de humedad y la absorción de los agregados ya que los mismos cobran importancia en la elaboración de los hormigones según el grado de saturación que presenten sus partículas. Existirá una tendencia del agregado a absorber parte del agua de mezclado cuando está seco o parcialmente saturado o de entregar agua cuando presenta humedad superficial, disminuyendo la relación agua/cemento y la trabajabilidad del hormigón en el primer caso, mientras que en el segundo ocurrirá lo contrario.

3.4.1. Procedimiento

Se sumerge en agua aproximadamente 1Kg del material durante 24hs. Luego se retira la muestra del agua y se seca bajo acción de aire caliente sobre una superficie plana

revolviendo continuamente para asegurar un secado uniforme. Se realiza lo anterior hasta lograr la condición de saturado superficie seca, lo cual se comprueba colocando el agregado fino en un molde troncocónico y apisonándolo 25 veces con el pisón metálico, al levantar el molde el material debe apenas desmoronarse hasta lograr la siguiente forma:

Figura 3.8 - Ilustración de la condición saturado superficie seca de un árido



Si el material todavía contiene humedad superficial, conservara por completo la forma del molde y se debe continuar con el proceso de secado, repitiendo luego la prueba.

Una vez conseguida la condición de saturado superficie seca, se introduce aproximadamente 500gr del material en ese estado en un matraz aforado y se toma la masa del conjunto, se llena con agua hasta cerca de la marca de 500cm³, se lo agita para eliminar las burbujas de aire y se agrega agua hasta enrazar. Se determina la masa del conjunto. Se retira la muestra y se seca en estufa hasta peso constante.

3.4.2. Instrumental

- Balanza (precisión de 0,1g)
- Matraz aforado de 500 cm³
- Molde troncocónico
- Pisón metálico
- Pistola de calor

3.4.3. Resultados

Se muestran los resultados obtenidos para cada arena en las siguientes tablas.

Tabla 3.7 - Densidad y absorción de Arena del Paraná

TIPO DE ARIDO		Arena Paraná
ms: Masa Sat. Sup. Seca [grs]		500,6
Vol: Volumen [cm3] [lectura - 200]		190
m: Masa Seca [grs]		499,8
Densidad relativa seca d2 [m/vol] [grs/cm3]		2,631
Densidad relativa SSS [ms/vol] [grs/cm3]		2,635
Densidad relativa real [m/(vol-ms+m)] [grs/cm3]		2,642
Absorción	[grs] [ms - m]	0,80
	% [(ms - m) / m] * 100]	0,2%

Tabla 3.8 - Densidad y absorción de Arena de cantera Cercana

TIPO DE ARIDO		Arena de cant. Cercana
ms Masa Sat. Sup. Seca [grs]		500,4
Vol Volumen [cm3] [lectura - 200]		199
m Masa Seca [grs]		484,8
Densidad relativa seca d2 [m/vol] [grs/cm3]		2,436
Densidad relativa SSS [ms/vol] [grs/cm3]		2,515
Densidad relativa real [m/(vol-ms+m)] [grs/cm3]		2,643
Absorción	[grs] [ms - m]	15,60
	% [(ms - m) / m] * 100]	3,2%

De los resultados anteriores podemos ver que la arena de la cantera cercana posee un valor de absorción (3,2%) mayor que la arena del Paraná (0,2%).

Respecto de las densidades se puede decir que no se aprecian diferencias significativas entre ambas.

3.5. DENSIDAD A GRANEL O PESO UNITARIO VOLUMETRICO (PUV)

Se define la densidad a granel como el peso de un volumen unitario de agregado, en este caso en el volumen se consideran las partículas de los granos sólidos y el volumen de vacíos entre partículas. El valor del PUV dependerá del grado de compactación como así también de la humedad que presente el agregado, los que hacen variar su valor al modificar el volumen de vacíos entre las partículas y el peso, respectivamente. También la forma y textura del material granular influyen en los resultados. El PUV se utiliza en el pasaje de una dosificación en peso a volumen, y en algunos métodos de dosificación racional.

3.5.1. Procedimiento

Se determina el peso vacío del recipiente de volumen conocido, especificado en la norma. Se llena el mismo con la muestra de material hasta un tercio de su capacidad, nivelando la superficie con los dedos y se procede a compactarla con 25 golpes de varilla. Se repite lo anterior llenando el recipiente hasta 2/3 de su capacidad, cuidando de no penetrar en la capa previa durante la compactación, y nuevamente hasta que desborde el recipiente. Se enrasa utilizando la varilla y se determina la masa del recipiente más su contenido.

3.5.2. Instrumental

- Balanza con una capacidad de 100Kg
- Varilla de compactación de acero, de características especificadas en la norma.
- Recipiente cilíndrico, rígido e indeformable, especificado en la norma.

3.5.3. Resultados

Tabla 3.9 - PUVC Arena de cantera cercana

PESO DE RECIPIENTE VACIO m_r [Kg]	3,488
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA SUELTA m_{rs} [kg]	7,509
PESO DE AGUA + RECIPIENTE m_{ra} [kg]	6,275
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA COMPACT. m_{rc} [kg]	7,983
VOLUMEN DE RECIPIENTE V [m^3]	0,00279

PESO DE AGUA $m_a = m_{ra} - m_r$	2,787
PESO DE MUESTRA SUELTA $m_s = m_{rs} - m_r$ [Kg]	4,021
FACTOR DE CALIBRACION $f = 1000 (kg/m^3) / m_a$	358,809
PESO DE MUESTRA COMPACTADA $m_c = m_{rc} - m_r$	4,495
PESO UNITARIO SUELTO = $f \cdot m_s$ [Kg/m^3]	1442,770
PESO UNITARIO COMPACTADO = $f \cdot m_c$ [kg/m^3]	1612,845

Tabla 3.10 - PUVC Arena del Paraná

PESO DE RECIPIENTE VACIO m_r [Kg]	3,488
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA SUELTA m_{rs} [kg]	7,928
PESO DE AGUA + RECIPIENTE m_{ra} [kg]	6,275
PESO DE RECIPIENTE + MUESTRA COMPACT. m_{rc} [kg]	8,178
VOLUMEN DE RECIPIENTE V [m^3]	0,00279

PESO DE AGUA $m_a = m_{ra} - m_r$	2,787
PESO DE MUESTRA SUELTA $m_s = m_{rs} - m_r$ [Kg]	4,440
FACTOR DE CALIBRACION $f = 1000 (kg/m^3) / m_a$	358,809
PESO DE MUESTRA COMPACTADA $m_c = m_{rc} - m_r$	4,690
PESO UNITARIO SUELTO = $f \cdot m_s$ [Kg/m^3]	1593,111
PESO UNITARIO COMPACTADO = $f \cdot m_c$ [kg/m^3]	1682,813

Teniendo en cuenta que para definir las dosificaciones a evaluar se iba a partir de las utilizadas en la investigación *“Dosificación y caracterización de mortero de base cementicia para la impresión 3D”* en la cual se empleó como árido arena del Paraná obteniendo resultados muy favorables, y que en los resultados expuestos hasta aquí no se aprecia que la arena de la cantera cercana presente mejores características en cuanto a granulometría, densidad y absorción, además de que la misma se obtiene por medio de lavado, lo que hace que por lo general contenga restos de materia orgánica y su composición sea variable dependiendo de la zona de extracción, concluimos que no se justificaría su utilización en reemplazo de la arena del Paraná para el diseño la mezcla.

4. DOSIFICACION Y EVALUACION DE MEZCLAS

4.1. GRANULOMETRIA

Como se dijo anteriormente se tomó como referencia la dosificación final obtenida por Luperi F.J., Soffietti F.P en “*Dosificación y caracterización de mortero de base cementicia para la impresión 3D*” la cual consistía en un 60% de arena del Paraná, 16% de toba zeolítica y 24% de cemento. En el presente trabajo en principio se decidió reducir un 10% el contenido de arena y un 4% el contenido de cemento, sumando estos porcentajes en filler. Partimos entonces de una dosificación de 50% de arena, 20% de cemento y 30% de filler. Las composiciones granulométricas correspondientes se pueden apreciar en las siguientes tablas y grafico.

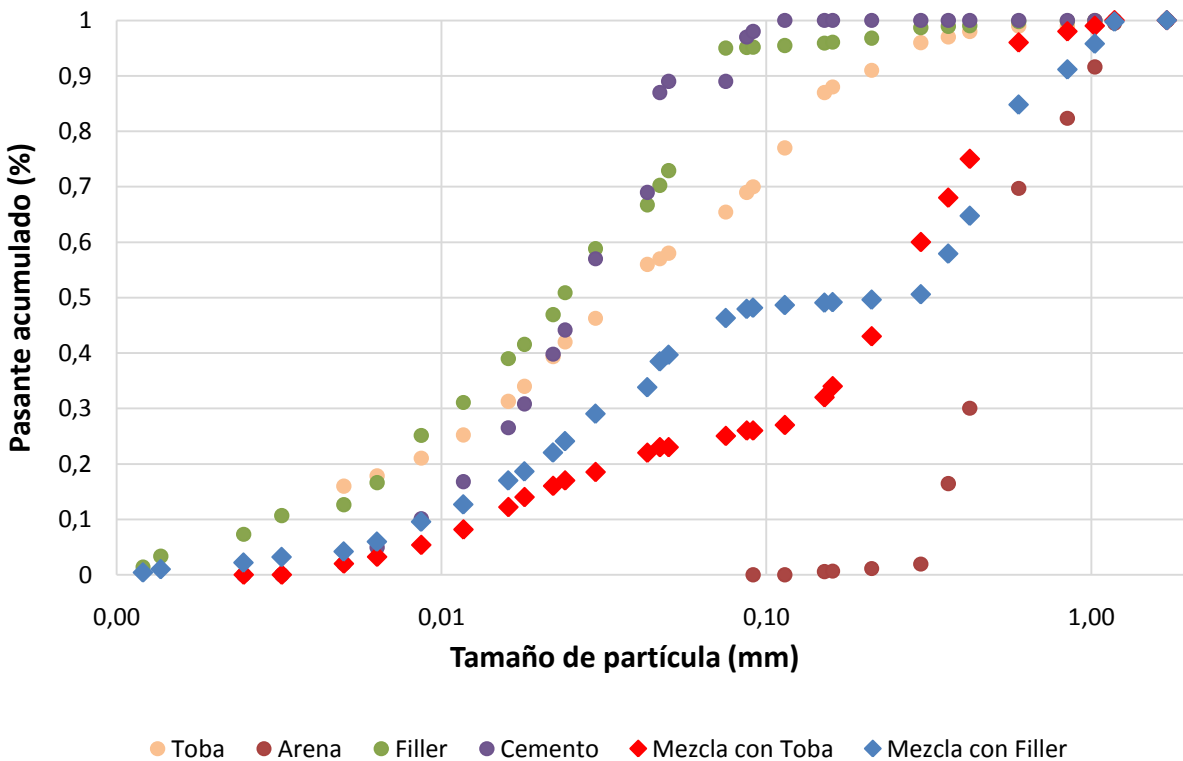
Tabla 4.1 - Dosificación de referencia y dosificación de partida

Material	Mezcla de referencia	Mezcla con Filler
Arena	60%	50%
Cemento	24%	20%
Toba	16%	-
Filler	-	30%

TAMAÑO [mm]	% DE PARTICULAS PASANTES					
	MATERIAL				MEZCLA	
	Toba	Arena	Filler	Cemento	Con Toba	Con Filler
0,0012	0%	0%	1%	0%	0%	0%
0,0014	0%	0%	3%	0%	0%	1%
0,0025	0%	0%	7%	0%	0%	2%
0,0032	0%	0%	11%	0%	0%	3%
0,0050	16%	0%	13%	2%	2%	4%
0,0063	18%	0%	17%	5%	3%	6%
0,0087	21%	0%	25%	10%	5%	10%
0,0117	25%	0%	31%	17%	8%	13%
0,0161	31%	0%	39%	27%	12%	17%
0,0180	34%	0%	42%	31%	14%	19%
0,0220	39%	0%	47%	40%	16%	22%
0,0240	42%	0%	51%	44%	17%	24%
0,0298	46%	0%	59%	57%	19%	29%
0,0430	56%	0%	67%	69%	22%	34%
0,0470	57%	0%	70%	87%	23%	38%
0,0500	58%	0%	73%	89%	23%	40%
0,0750	65%	0%	95%	89%	25%	46%

0,0870	69%	0%	95%	97%	26%	48%
0,0910	70%	0%	95%	98%	26%	48%
0,1140	77%	0%	95%	100%	27%	49%
0,1510	87%	1%	96%	100%	32%	49%
0,1600	88%	1%	96%	100%	34%	49%
0,2110	91%	1%	97%	100%	43%	50%
0,2990	96%	2%	99%	100%	60%	51%
0,3630	97%	16%	99%	100%	68%	58%
0,4230	98%	30%	99%	100%	75%	65%
0,5980	99%	70%	100%	100%	96%	85%
0,8450	99%	82%	100%	100%	98%	91%
1,0260	100%	92%	100%	100%	99%	96%
1,1800	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1,7100	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Figura 4.1 - Granulometrías de materiales, mezcla de referencia y mezcla de partida



Con esta mezcla se realizó un primer pastón con el fin de poder ajustar el contenido de agua necesario para obtener una resistencia al corte adecuada. En este trabajo se decidió partir de una relación agua/(cemento+filler) estimada de 38%, menor al 45% utilizado en la mezcla de referencia, e ir agregando agua de manera controlada mientras se medía la

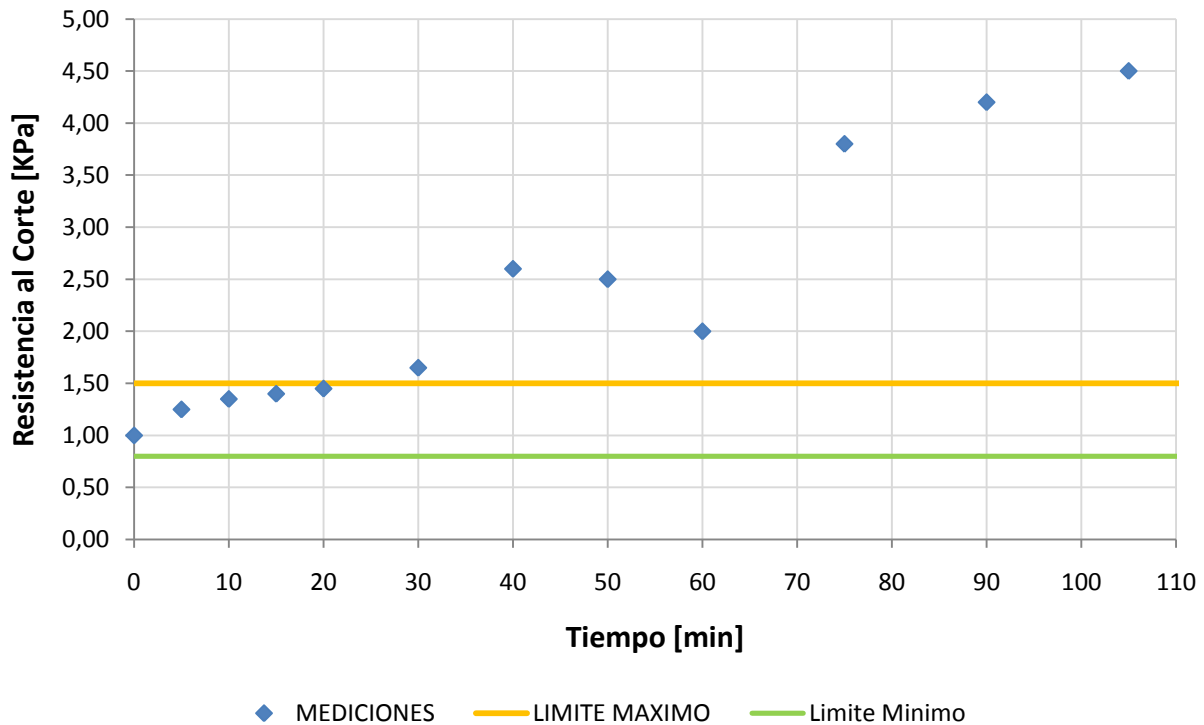
resistencia al corte con la veleta con el fin de obtener un valor de aproximadamente 1Kpa el cual permitiría el bombeo y la extrusión de manera óptima. Aproximadamente a los 20 minutos de mezclado y con una relación agua/(cemento+filler) de 40% se logró dicho valor, y se procedió a medir su variación con respecto al tiempo.

Cabe aclarar que el valor final de 40% se obtuvo luego ciertas correcciones efectuadas agregando agua o material en pequeñas proporciones y en reiteradas ocasiones, demostrando una gran sensibilidad de la mezcla con respecto al contenido de agua ya que se pasaba muy fácilmente de una consistencia muy seca y una alta resistencia al corte a una mezcla con excesiva fluidez. Estas correcciones se hicieron sin tener tan en cuenta que al ser una mezcla con gran cantidad de material fino, para lograr una hidratación uniforme y por ende una resistencia al corte estable, se necesitaría de un tiempo de mezclado más prolongado que el necesario para la elaboración de un mortero convencional. Debido a esto se supuso que el valor inicial de la relación agua/(cemento + filler) de 38%, sería el adecuado para realizar los ensayos posteriores.

Figura 4.2 - Ensayo de corte sobre mezcla de partida



Figura 4.3 - Resistencia al Corte Vs Tiempo



Teniendo en cuenta que el rango de resistencia al corte que permite el bombeo y la extrusión de material va de 0,8Kpa a 1,5Kpa, se puede apreciar en el gráfico anterior que a los 30 minutos de finalizado el mezclado se supera dicho rango, pudiendo estimar entonces que el intervalo de trabajo se encontraría en torno a ese tiempo.

A partir de aquí se plantearon 2 dosificaciones a evaluar. Una mezcla A con las mismas características que la descrita anteriormente, y una mezcla B que contenía un 50% de Arena, 27% de filler y 23% de cemento. Utilizando en ambas una relación agua/(cemento+filler) de 38%.

A estas mezclas se les realizó los ensayos de compresión simple y de tracción por flexión descritos por la norma IRAM 1622. Esto se hizo con el fin de comparar sus resistencias mecánicas entre sí y apreciar su variación con respecto a los valores obtenidos con la mezcla dada por norma, permitiendo escoger la que mejores resultados obtenga para someterla posteriormente a ensayos en estado fresco, de deflexión con incrementos graduales de carga y medir la variación de su resistencia al corte con respecto al tiempo.

4.2. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO

Se determinaron las resistencias de las mezclas en estado endurecido mediante la aplicación de la norma IRAM 1622. Esta indica el método a utilizar para la determinación de las resistencias mecánicas a compresión y a tracción por flexión de morteros de cemento, para lo cual se confeccionan probetas prismáticas de 40mm x 40mm x 160mm.

4.2.1. Instrumental

- Balanza (precisión de 0,1g)
- Mezcladora mecánica especificada en norma
- Compactadora mecánica especificada en norma
- Molde con 3 compartimentos horizontales y con las dimensiones especificadas para las probetas prismáticas.
- Prensa mecánica e implementos para realizar los ensayos de flexión y compresión.

4.2.2. Procedimiento

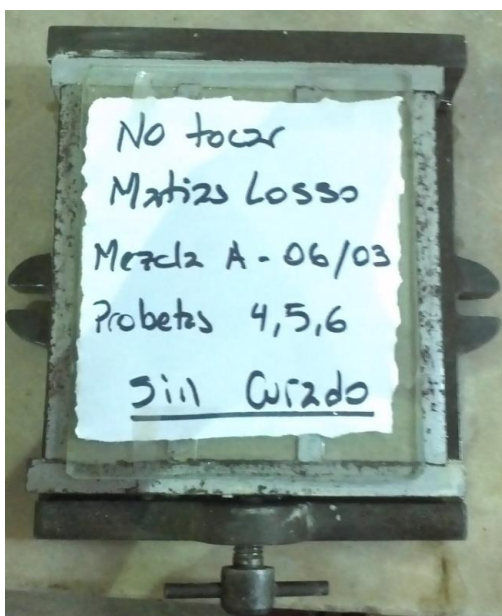
Se prepararon 3 morteros siguiendo el procedimiento de mezclado descrito en la norma. Un primer mortero con las características especificadas por la misma, el cual constaba de la siguiente composición en masa: Una parte de cemento (450 ± 2 gr), tres partes de arena normalizada (1350 ± 5 gr) y media parte de agua (225 ± 1 gr; relación agua/cemento de 0,5). Estas cantidades permitieron confeccionar 3 probetas. El segundo y tercer mortero correspondieron a las mezclas A y B a evaluar en este trabajo, con las que se confeccionaron 6 probetas prismáticas para cada una, con el fin de que 3 sean sometidas a curado como lo especifica la norma y que las otras 3 no reciban ningún tratamiento luego de confeccionadas. Además las 9 probetas que iban a ser curadas (3 por Norma, 3 de la Mezcla A, 3 de la Mezcla B) fueron compactadas siguiendo el procedimiento correspondiente descrito en la norma, y las otras 6 probetas (3 de la Mezcla A y 3 de la Mezcla B) fueron confeccionadas sin compactación, procurando solo que el mortero llene completamente el volumen del molde, sin dejar concavidades. Esto se hizo con la idea de poder evaluar el material en condiciones similares a las que se tendrían cuando se realice una impresión, ya que el mismo no recibirá ningún tipo de compactación y en principio ningún tratamiento de curado luego de depositado.

Tabla 4.2 - Mezclas para ensayo de resistencias mecánicas, Norma IRAM 1622

	MEZCLA NORMALIZADA	MEZCLA A	MEZCLA B
ARENA NORM.	75%	-	-
ARENA PARANA	-	50%	50%
CEMENTO	25%	20%	23%
FILLER	-	30%	27%
R. AGUA/ CEM.	50%	38%	38%

Una vez confeccionadas y compactadas las probetas correspondientes se cubrieron en su totalidad con una lámina de vidrio, y se les colocó una identificación. Las que iban a ser curadas se llevaron a una atmosfera húmeda durante 24 hs, pasado ese tiempo se desmoldaron y se las colocó en agua para su curado. Las probetas que no iban recibir curado también se desmoldaron al mismo tiempo y se las dejó expuestas al aire en un rincón del laboratorio.

Figura 4.4 - Izquierda: Probetas en molde luego de la preparación. Derecha: probetas en recipiente para curado.



4.2.3. Resistencia a tracción por flexión

A la edad requerida (28 días) las probetas se retiraron del recipiente de curado, envolviéndolas en trapos húmedos con el fin de conservar su humedad hasta el momento de ser ensayadas.

Se utilizó el método de carga de los 3 puntos; en el que se coloca la probeta en la prensa con una cara lateral sobre los rodillos de soporte y con su eje longitudinal normal a estos. Se aplica carga verticalmente sobre la cara opuesta incrementándose uniformemente a una velocidad de 50 ± 10 N/s hasta la rotura. Las mitades obtenidas se mantuvieron cubiertas con un paño húmedo hasta el momento del ensayo de compresión.

Figura 4.5 - Probeta prismática Lista para ensayo de tracción por flexión, Norma IRAM 1622



Figura 4.6 - Rotura de probeta prismática en ensayo de tracción por flexión, Norma IRAM 1622



Se puede calcular así la resistencia a flexión en megapascales mediante la siguiente fórmula:

$$R_f = \frac{1,5 F_f l}{b^3}$$

Donde R_f es la resistencia a la flexión en megapascales, b es el lado de la sección cuadrada del prisma en milímetros, F_f es la carga aplicada en la mitad del prisma en la rotura en newton y L es la distancia entre soportes en milímetros.

4.2.4. Resistencia a la compresión

Se ensayaron las mitades de las probetas obtenida del ensayo de flexión utilizando la prensa, cargando sus caras laterales de manera uniforme a una velocidad de 2400 ± 200 N/s hasta la rotura.

Figura 4.7 - Mitad de probeta prismática lista para ensayo de compresión



Figura 4.8 - Rotura a compresión de probeta prismática



Se calcula la resistencia a la compresión mediante la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Donde R_c es la resistencia a compresión en Megapascuales, F_c es la carga máxima de rotura en Newton y 1600 es la superficie de los platos con los que se aplica la carga en mm^2 .

A continuación se presentan los resultados obtenidos de ambos ensayos.

Tabla 4.3 - Resultados de ensayos de compresión y tracción por flexión en probetas prismáticas que recibieron tratamiento de curado

PROBETAS CON CURADO											
PROBETA	Observaciones	Tamaño [mm]	Edad de ensayo	Carga de rotura a flexión F_f [Kg]	Resist. a flexión R_f [MPa]	R_f Prom. [MPa]	Carga de rotura a compresión F_c [Kg]			Resist. a compresión R_c [MPa]	R_c prom. [MPa]
							1°	2°	Prom.		
NORMAL. - 1	Curado según norma	40 x 40 x 160	28 días	334,31	7,84	7,53	5669,60	5474,10	5571,85	34,82	34,71
NORMAL. - 2	Curado según norma	40 x 40 x 160	28 días	312,81	7,33		5689,15	5552,30	5620,73	35,13	
NORMAL. - 3	Curado según norma	40 x 40 x 160	28 días	316,72	7,42		5474,10	5464,32	5469,21	34,18	
MEZCLA A - 1	Curado según norma	40 x 40 x 160	29 días	101,66	2,38	2,63	1720,43	1642,23	1681,33	10,51	10,55
MEZCLA A - 2	Curado según norma	40 x 40 x 160	29 días	117,30	2,75		1593,35	1720,43	1656,89	10,36	
MEZCLA A - 3	Curado según norma	40 x 40 x 160	29 días	117,30	2,75		1788,86	1661,78	1725,32	10,78	
MEZCLA B - 1	Curado según norma	40 x 40 x 160	28 días	160,31	3,76	3,91	2365,59	2443,79	2404,69	15,03	14,84
MEZCLA B - 2	Curado según norma	40 x 40 x 160	28 días	162,27	3,80		2346,04	2404,69	2375,37	14,85	
MEZCLA B - 3	Curado según norma	40 x 40 x 160	28 días	177,91	4,17		2434,02	2248,29	2341,16	14,63	

Tabla 4.4 - Resultados de ensayos de compresión y tracción por flexión en probetas prismáticas que no recibieron tratamiento de curado

PROBETAS SIN CURADO											
PROBETA	Observaciones	Tamaño [mm]	Edad de ensayo	Carga de rotura a flexión F_f [Kg]	Resist. a flexión R_f [MPa]	R_f Prom. [MPa]	Carga de rotura a compresión F_c [Kg]			Resist. a compresión R_c [MPa]	R_c Prom. [MPa]
							1°	2°	Prom.		
MEZCLA A - 4	Sin curado	40 x 40 x 160	29 días	-	-	1,67	-	-	-	-	10,52
MEZCLA A - 5	Sin curado	40 x 40 x 160	29 días	93,84	2,20		1759,5	1661,78	1710,66	10,69	
MEZCLA A - 6	Sin curado	40 x 40 x 160	29 días	48,83	1,14		1603,13	1710,65	1656,89	10,36	
MEZCLA B - 4	Sin curado	40 x 40 x 160	28 días	74,29	1,74	1,65	1642,23	1642,23	1642,23	10,26	10,26
MEZCLA B - 5	Sin curado	40 x 40 x 160	28 días	66,47	1,56		1681,33	1603,13	1642,23	10,26	
MEZCLA B - 6	Sin curado	40 x 40 x 160	28 días	-	-		-	-	-	-	

En principio en el caso de las probetas sin curado, no se aprecian diferencias en los valores de resistencias obtenidos para ambas mezclas.

En los casos de las probetas que fueron sometidas al proceso de curado, se puede apreciar una gran diferencia en los valores finales de las resistencias a compresión de ambas mezclas con respecto al mortero normalizado. Obteniéndose una pérdida de resistencia de un 70% en el caso de la mezcla A y de un 57% en la mezcla B. Estos resultados son lógicos al tener en cuenta la presencia del filler como material de adición en reemplazo de cierto porcentaje de cemento y arena, sumado a la mayor relación agua/cemento utilizada. A su vez comparando entre si las mezclas de interés para este trabajo, se aprecia que la mezcla B obtuvo una resistencia a la compresión un 40% mayor que la obtenida para la mezcla A. En cuanto a las resistencias a la tracción se puede ver que para la mezcla B se obtuvieron valores mayores a los de la mezcla A.

También es muy importante resaltar que en el caso de la mezcla A prácticamente no se obtuvieron diferencias en los valores de resistencia a la compresión de las probetas que recibieron curado respecto de las que no. Caso contrario en la mezcla B donde las probetas que fueron curadas presentaron una resistencia 44% mayor que las que no fueron curadas.

Basándonos en estos resultados se *decidió escoger la Mezcla B para continuar con los ensayos* desde aquí en adelante, planteando para una futura investigación la posibilidad de evaluar procesos de curado insitu una vez que el material ha sido impreso, con el fin de permitir al mortero de impresión desarrollar al máximo su resistencias. También sería muy importante evaluar la incorporación de algún aditivo superfluidificante con el objetivo de reducir la cantidad de agua utilizada, disminuyendo la relación agua/cemento (sin afectar la fluidez del material) y de esta forma también mejorar esta característica del mortero de impresión.

4.3. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

4.3.1. Procedimiento

Se implementó un ensayo de compresión en estado fresco con la intención de evaluar el comportamiento del mortero de impresión al proceso de carga gradual propio de la construcción capa a capa, midiendo de manera continua su deformación con el fin de determinar valores aproximados de deformación específica e identificar el modo de falla, si es que se producía ésta de manera evidente

Para establecer la magnitud de los incrementos de carga y el intervalo de tiempo entre ellos que permitan simular el proceso de impresión, se propusieron velocidades de construcción en función del tiempo que se estima sería necesario para realizar la impresión de una cierta altura de muro. Con un peso específico del mortero de impresión final estimado en 21 KN/m^3 , se determinó el aumento de carga en gramos/minutos correspondientes a cada velocidad de impresión. Y sabiendo que los incrementos de carga se iban a realizar con monedas de acero de 84,2 grs cada una, se obtuvo el intervalo de tiempo correspondiente en minutos para la adición de cada moneda.

Se plantearon 3 velocidades de construcción, expresadas en altura de muro impreso/hora.

Tabla 4.5 - Velocidades de construcción

	TIEMPO DE ELEVACION DE MUROS [h]	VELOCIDAD DE CONSTRUCCION [m/h]	TIEMPO ENTRE MONEDAS [min/un]
BAJA	10	0,23	3,36
MEDIA	8	0,30	2,57
ALTA	5	0,50	1,54

Para realizar el ensayo se utilizó un molde cilíndrico de 5,4 cm de altura y 6,3 cm de diámetro para conformar una probeta de mortero en estado fresco, que se sometería a los incrementos de carga correspondientes en un dispositivo fabricado para tal fin el cual permite el movimiento de una plataforma, donde se colocan las monedas, pero no su giro a través de varillas trefiladas y rodamientos lineales. A su vez con un flexímetro digital se iba midiendo su deformación, a los efectos de control. Y en forma paralela se iba evaluando la evolución de la resistencia al corte utilizando la veleta, a los fines de disponer del parámetro de resistencia del material y poder compararlo con la tensión de corte teórica que se describe a continuación.

De “*Structural built-up of cement-based material used for 3D-printing extrusión techniques*”, la tensión vertical actuante en la primera capa depositada en el proceso de impresión, se puede describir a través de la ecuación:

$$\sigma_v = \rho gh(t) = \rho gRt$$

Donde ρ es el peso específico del mortero, R es la tasa o velocidad de construcción y t el tiempo luego de depositada la primera capa. Se puede evaluar entonces la estabilidad del material impreso comparando esta tensión vertical con la tensión de corte crítica a través de la teoría de flujo plástico (Roussel N., Lanos C.; “*Plastic fluid flow parameters identification using a simple squeezing test*”. (2003) Appl. Rheol. 13:132–141. Engmann J., Servais C., Burbidge A.S.; “*Squeeze flow theory and applications to rheometry: a review*”. J Non-Newton Fluid Mech 132:1–27) mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_0 = \frac{\sigma_v}{\alpha_{geom}}$$

Donde τ_0 es la tensión de corte y α_{geom} es un parámetro geométrico que depende de la forma de la estructura. En el caso de nuestra probeta cilíndrica, α_{geom} dependerá del diámetro D y la altura h de la misma y puede expresarse a través de la ecuación:

$$\alpha_{geom} = 2 \left(1 + \frac{D}{2\sqrt{3}h} \right)$$

De lo anterior, para una determinada tasa o velocidad de construcción, no se produciría la falla del material siempre que el mismo desarrolle valores de resistencia al corte que se

mantengan en todo momento superiores al valor de la tensión de corte τ_0 producida por la carga actuante debida al propio proceso constructivo.

Figura 4.9 - Probeta de mortero en estado fresco



Primero se realizó el ensayo para la velocidad de construcción alta. En base a la experiencia obtenida de este se decidió optimizar el proceso de mezclado, ya que al realizarlo a mano se demoraba un tiempo considerable en preparar un mortero homogéneo para ensayar, y a que al ser chico el volumen necesario de mortero (menor a 3 dm^3) no se podía utilizar las mezcladoras mecánicas disponibles en el laboratorio. Entonces se utilizó un taladro con una paleta mezcladora, originalmente usada para mezclar pinturas y pegamentos, y al implementar este sistema en el siguiente ensayo se dio la situación de obtener un mortero homogéneo muy rápidamente pero con una consistencia muy líquida y una resistencia al corte inferior a $0,8 \text{ KPa}$, dando como resultado la imposibilidad de moldear la probeta de mortero ya que el mismo no soportaba su propio peso, deformándose considerablemente. Se decidió entonces corregir nuevamente el contenido de agua disminuyéndolo en un 1% para realizar los ensayos restantes, pudiendo implementar así el mezclado mecánico.

Figura 4.10 -Ensayo de compresión en estado fresco

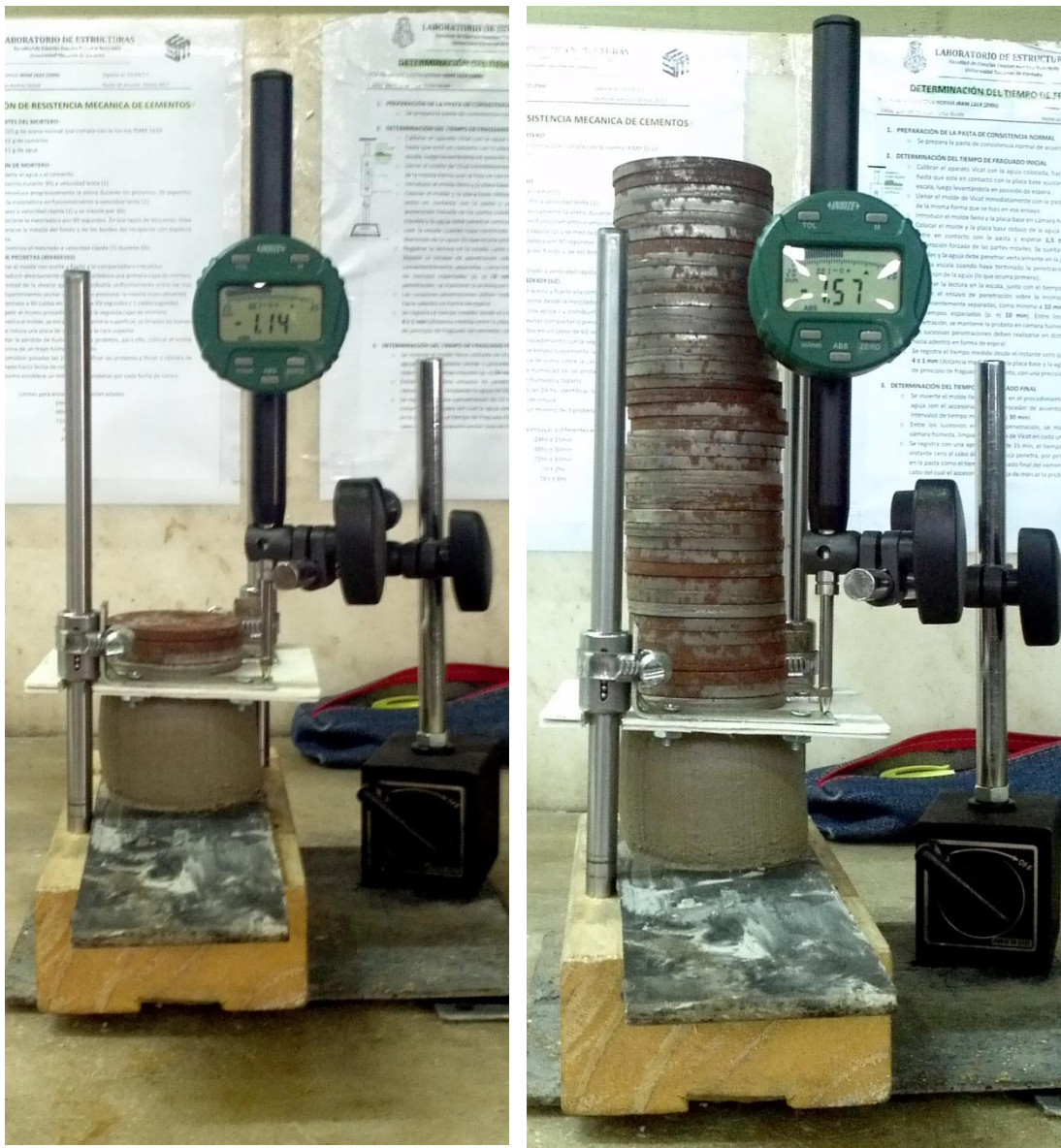


Figura 4.11 -Probeta de mortero fresco bajo carga en ensayo de compresión



4.3.2. Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados correspondientes a las 3 velocidades de construcción antes dadas.

Tabla 4.6 – Tensión de corte actuante según velocidad de construcción (1h)

TENSION DE CORTE CRITICA				
Peso Esp. (ρ)		21	[KN/m ³]	
Diámetro (D)		0,063	[m]	
Altura (h)		0,054	[m]	
α_{geom}		2,674		
VELOCIDAD [m/h]		TIEMPO [h]	σ_v [Kpa/h]	τ_0 [Kpa/h]
Baja	0,23	10,40	4,83	1,81
Media	0,30	8,00	6,30	2,36
Alta	0,50	4,80	10,50	3,93

Figura 4.12 - Resistencia al corte medida Vs Tiempo

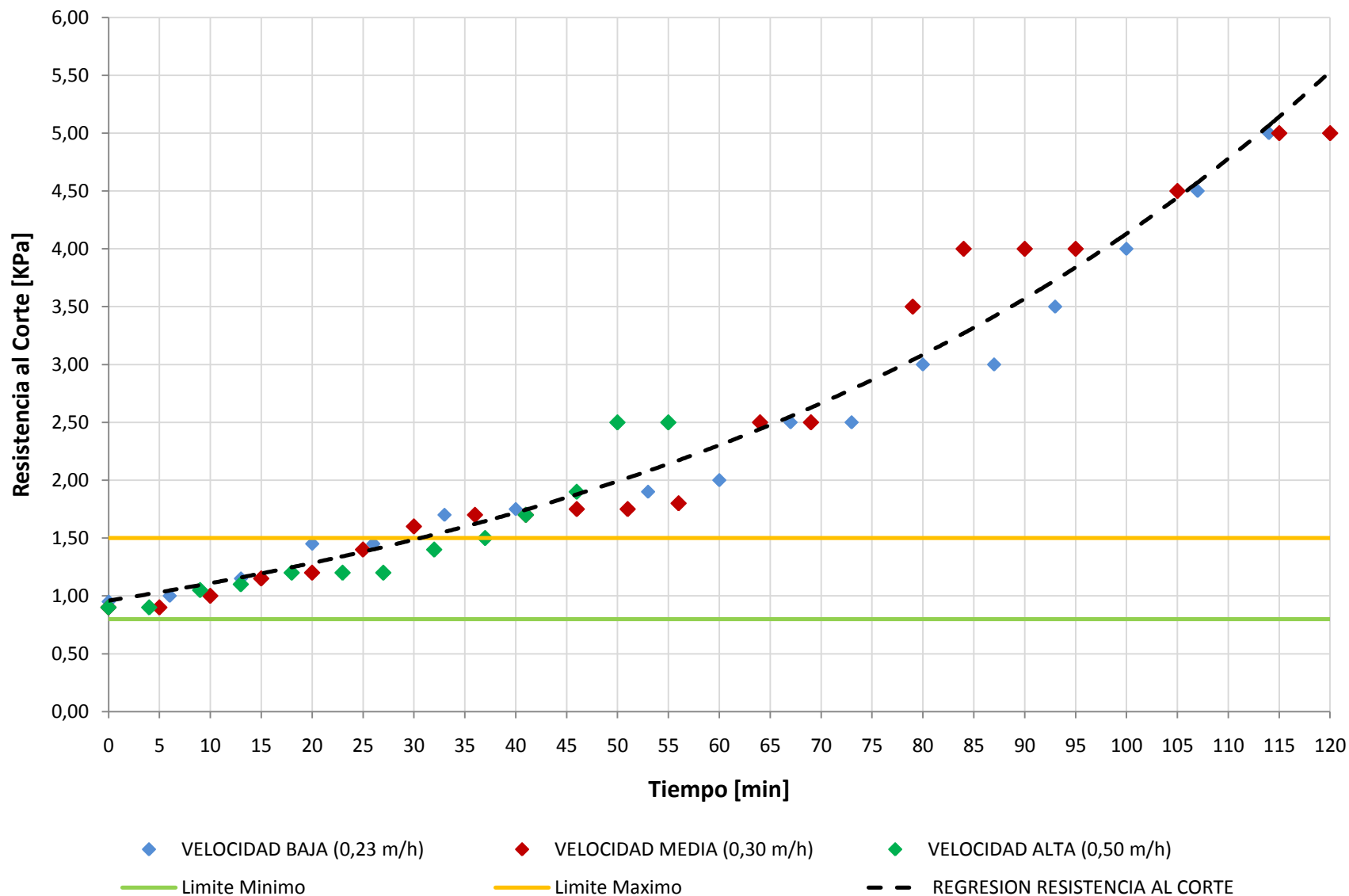
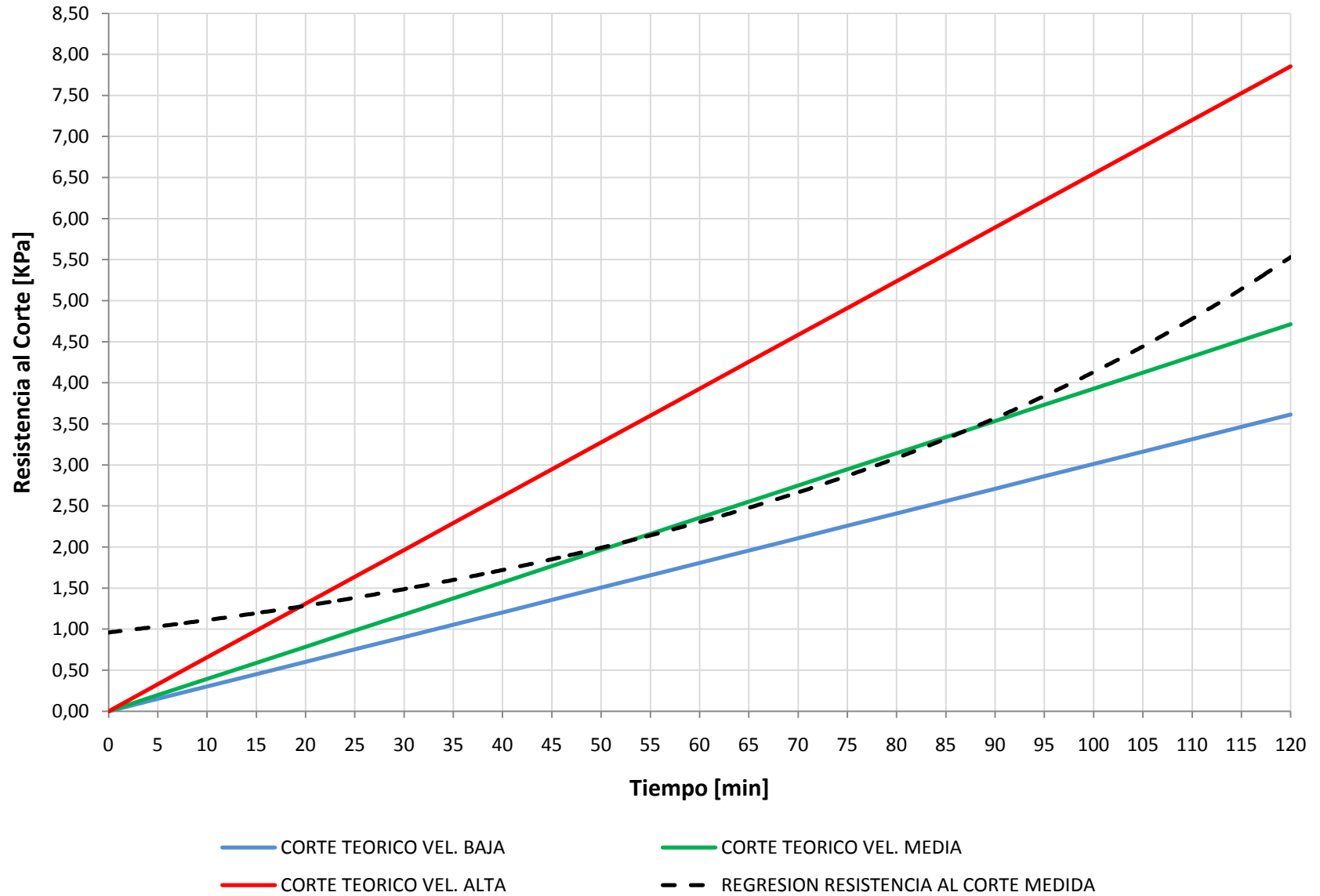


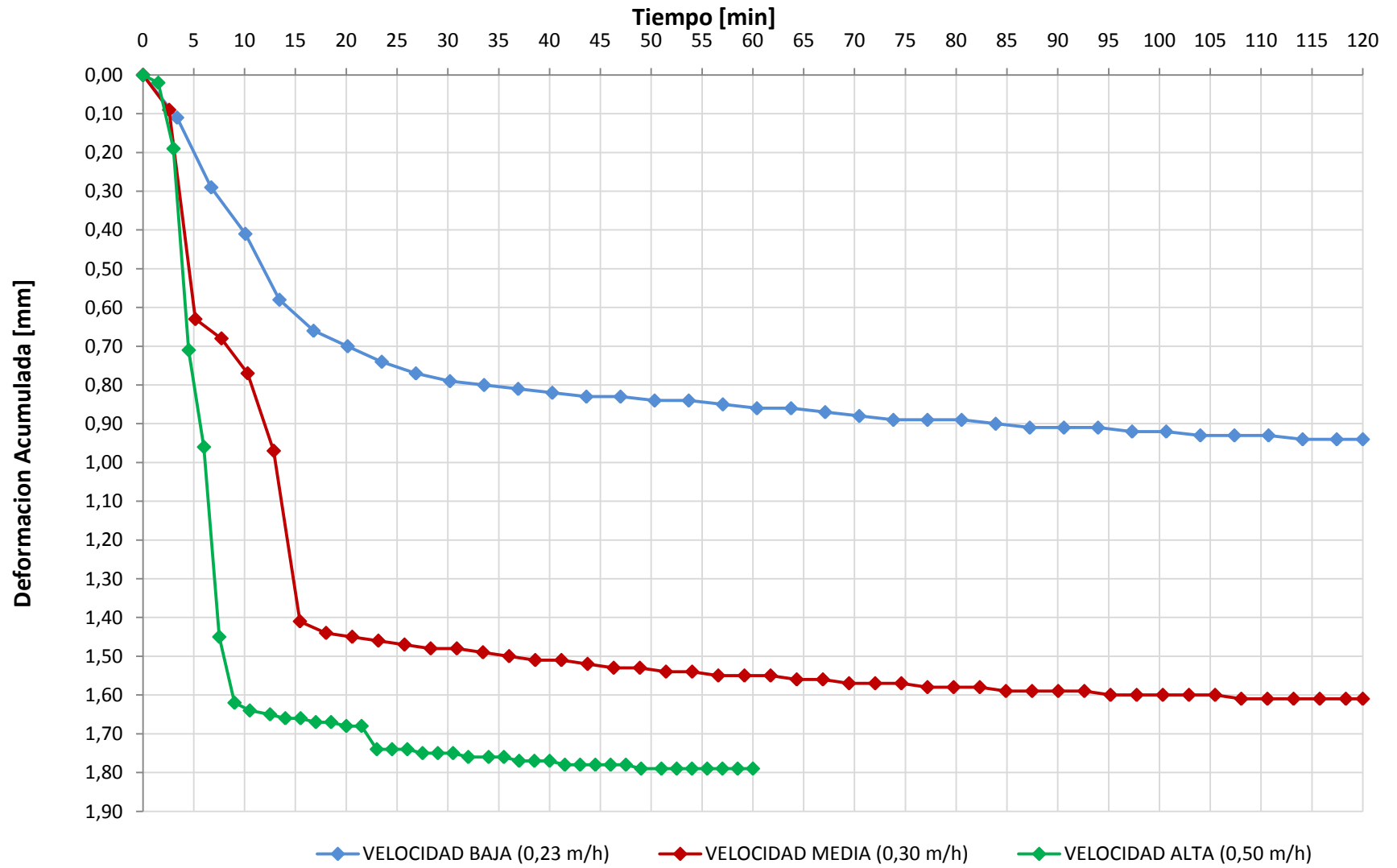
Figura 4.13 - Tension de corte teórica Vs Tiempo



En la figura 4.12 se graficaron las mediciones de la resistencia al corte del material tomada durante los ensayos de deflexión, junto con los límites entre los cuales el material se encontraría apto para la impresión. En ella se puede apreciar que la curva de regresión que mejor ajusta a las mediciones realizadas tiene forma exponencial, coincidiendo con lo enunciado en Perrot A., Rangeard D., Pierre A.; “*Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques*”. También se puede ver que dicha curva aproximadamente a los 30 minutos supera el valor de 1,5 KPa, que como se explico anteriormente es el adoptado como límite máximo de resistencia al corte que permitiría el bombeo y la extrusión del material de manera adecuada. Siendo entonces este tiempo obtenido el correspondiente al intervalo de trabajo para el material.

En la figura 4.13 se visualiza la evolución en el tiempo de la resistencia al corte desarrollada por el material (curva de regresión), con la evolución en el tiempo, para cada velocidad de construcción planteada, de la tensión de corte teórica producida por los incrementos de carga del propio proceso constructivo. En ella se puede ver que para la velocidad baja la tensión de corte crítica desarrollada por el material se encuentra siempre por encima del la tensión de corte teórica actuante, lo que equivaldría a que nunca se produzca la falla del mismo si se utilizara esta tasa de construcción. En contra posición se ve el caso de la velocidad alta para la cual la tensión de corte teórica evoluciona mucho más rápido que la resistencia al corte superándola muy rápidamente, lo que equivaldría a la falla del material comprometiendo la estabilidad de la posible estructura impresa. Entre estas velocidades, se ve el caso de la velocidad media de construcción, para la cual el material se encontraría al límite de resistencia, siendo difícil predecir si se podría o no producir la falla del mismo.

Figura 4.14 - Ensayo de compresión: Deformación acumulada Vs Tiempo



En la figura 4.14 se graficó para cada velocidad de construcción la evolución de la deformación de las probetas de mortero en estado fresco debida a los incrementos de carga que simulaban el proceso constructivo. En ella se puede apreciar que se cumplió la lógica de que a medida que la velocidad de construcción simulada era más alta, la deformación acumulada crecía de manera más rápida. Se puede ver también que para todas las velocidades se produjo una gran deformación inicial la cual se mantuvo durante los primeros 15 a 20 minutos del ensayo, decreciendo luego hasta hacerse casi constante. Esto se dio entonces en correlación a la evolución de la resistencia al corte desarrollada por el material y la tensión de corte producida por las cargas actuantes que como se explico anteriormente (figura 4.13), la primera crecía de manera exponencial y la segunda de manera lineal. Cabe destacar que durante ninguno de los ensayos se produjo el colapso de las probetas ni tampoco la aparición de fisuras o grietas en su superficie debidas a una excesiva deformación, por lo que se considera que no ocurrió la falla del material. Los valores de deformación obtenidos equivaldrían entonces, en la construcción de una planta tipo con alturas de muro de 2,40mts, a una deformación acumulada final aproximada de 3,8 cm, 6,5 cm y 7,3 cm para la velocidad baja, media y alta respectivamente.

5. CONCLUSIONES

Durante la primera etapa del presente trabajo se realizó la caracterización de los materiales disponibles. Principalmente el análisis granulométrico completo del filler calcareo a utilizar como material de adición, y el de las dos arenas finas disponibles con el fin de escoger la más apta entre ellas para buscar una dosificación que presente una granulometría continua y con un alto contenido de finos, lo cual facilite el bombeo y dé una buena consistencia al material en estado fresco. Se determinó que al no haber grandes diferencias entre los resultados obtenidos para las arenas evaluadas, los antecedentes favorables en trabajos similares en los que se utilizó la arena del Paraná junto con la mayor homogeneidad de la misma, fueron los factores que definieron su utilización en lo que prosiguió.

Con el filler, la arena del Paraná y un cemento portland CPF40, se plantearon 2 dosificaciones buscando cumplir las premisas de granulometría continua y alto contenido de finos. Las mismas fueron evaluadas a la compresión y flexión mediante la conformación de probetas prismáticas, comparándose entre sí y también con una mezcla normalizada. Se pudo ver que la mezcla B obtuvo una resistencia a la compresión un 40% mayor que la obtenida para la mezcla A (14,84 Mpa vs 10,55 MPa respectivamente). Se dio también en el caso de la mezcla B, a diferencia de la A, que se obtuvieron valores significativamente mayores en las probetas que se sometieron al proceso de curado especificado en la norma, respecto de las que no. En la comparación con la mezcla normalizada se dieron grandes diferencias en resistencia a la compresión siendo considerablemente menor la obtenida en las mezclas propuestas, pero sin dejar de ser un resultado lógico y esperado debido a la mayor relación agua/cemento junto con la sustitución de cemento y arena por filler. En base a lo anterior es que se escogió a la mezcla B, compuesta por 50% de arena fina, 23% de cemento, 27% de filler y con una relación agua/(cemento+filler) de 37%, como la dosificación final para continuar con los ensayos en estado fresco.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del mortero ya dosificado al incremento de carga gradual propio de este proceso constructivo, es que se lo sometió a un ensayo de compresión en estado fresco a diferentes velocidades de construcción. Durante el ensayo se midió su deformación acumulada junto con la evolución de la resistencia al corte, siendo este último parámetro el más importante para caracterizar el material ya que permite evaluar su extrudabilidad y determinar la capacidad de construcción a través de conocer el intervalo de trabajo. En base a los resultados se puede concluir que la evolución de la resistencia al corte en el tiempo sigue una función exponencial, obteniendo un intervalo de trabajo (tiempo después del cual no se podría imprimir de manera adecuada el material) de aproximadamente 30 minutos. Para las velocidades de construcción simuladas (baja = 0,23 m/h, media = 0,30 m/h y alta = 0,50 m/h) se obtuvieron valores de deformación específicas de 0,016, 0,028 y 0,030 respectivamente, pudiendo considerar a estos resultados como muy positivos, ya que equivaldrían a 3,8 cm, 6,5 cm y 7,3 cm de deformación final acumulada en la construcción de un muro tipo de 2,40 metros de altura.

En términos generales y en base a todo lo expuesto es posible afirmar entonces que se han cumplido los objetivos generales y específicos planteados al inicio del trabajo, obteniendo una dosificación final de un mortero de impresión que cumple con las características exigidas por el

proceso constructivo. Se obtuvieron los parámetros característicos del mismo, como ser valores de resistencias a la compresión y flexión, la variación de la resistencia al corte con el tiempo y su intervalo de trabajo, como también posibles velocidades de construcción que el mismo permitiría.

Se ha logrado un mortero en condiciones de ser utilizado para la impresión y que sirve de base para futuras investigaciones, el cual posee un amplio margen para seguir desarrollándolo y mejorando aun más sus características. En cuanto a ello se puede decir que sería muy importante evaluar la utilización de aditivos superfluidificantes en el proceso de mezclado con el fin de reducir la relación agua/cemento utilizada aumentando los valores de resistencias, también aceleradores de fragüe justo antes de la extrusión desarrollando más rápidamente su resistencia al corte, dándole mayor estabilidad y permitiendo obtener así una tasa de construcción mayor. De igual manera sería muy importante plantear y evaluar procesos de curado insitu lo cual también permitiría desarrollar mucho mejor las resistencias características del material.

6. BIBLIOGRAFIA

- Autores varios. *Manual Básico FDM I3D*. INTI Diseño Industrial, Centro de Investigación y Desarrollo en Diseño Industrial.
- DI. Agustín Losso; *Técnicas de Modelos y Prototipos*. Modulo 6 Apunte de cátedra de técnicas de modelos y prototipos, Carrera de Diseño Industrial - Instituto de Ciencias Basicas y Aplicadas/ U.N.V.M.
- Arq. Marta Malé-Alemaný. *El potencial de la fabricación aditiva en la arquitectura: Hacia un nuevo paradigma para el diseño y la construcción*. Tesis doctoral, UPC.
- Autores varios. *Ese material llamado hormigón*. Publicación de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2012.
- Autores varios. *Notas de cátedra. Tecnología de los Materiales de Construcción*. Apunte de cátedra de Tecnología de los Materiales de Construcción, FCEFYN - UNC.
- Ing. Alejandro Jose Tanco. *Morteros para mampostería*. Revista VIVIENDA 319 (1989).
- Luperi F. J., Soffietti F. P.; “*Dosificación y caracterización de mortero de base cementicia para la impresión 3D*”, IDIT CONICET-UNC (2016)
- Le T. T., Austin S.A., Lim S., Buswell R. A., Gibb A. G. F., Thorpe T.; “*Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete*”, RILEM (2012)
- Perrot A., Rangeard D., Pierre A.; “*Structural built-up of cement-based materials used for 3D printing extrusion techniques*” (2015)
- Roussel N., Lanos C.; “*Plastic fluid flow parameters identification using a simple squeezing test*”. (2003) Appl. Rheol. 13:132–141.
- Engmann J., Servais C., Burbidge A.S.; “*Squeeze flow theory and applications to rheometry: a review*”. J Non-Newton Fluid Mech 132:1–27