



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**Departamento de Física Aplicada II**  
**Escuela de Ingenierías Industriales**

## **TESIS DOCTORAL**

***Diseño de hormigones autocompactantes  
volcánicos andinos***

**Luis Fernando Naranjo Herrera**

**Programa de Doctorado en Ingeniería Mecatrónica**

Director:

**Dr. Francisco José Rubio-Hernández**

Departamento de Física Aplicada II

UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA




Tesis presentada para la obtención del título de Doctor por la Universidad de Málaga,  
2024

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: Luis Fernando Naranjo Herrera

 <https://orcid.org/0009-0004-1603-1933>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)

UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D./Dña LUIS FERNANDO NARANJO HERRERA

Estudiante del programa de doctorado INGENIERÍA MECATRÓNICA de la Universidad de Málaga, autor/a de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: DISEÑO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES VOLCÁNICOS ANDINOS

Realizada bajo la tutorización de DR. FRANCISCO JOSÉ RUBIO HERNÁNDEZ y dirección de DR. FRANCISCO JOSÉ RUBIO HERNÁNDEZ (si tuviera varios directores deberá hacer constar el nombre de todos)

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 8 de OCTUBRE de 2024

|  |   |
|--|---|
| Fdo.: LUIS FERNANDO NARANJO HERRERA<br>Doctorando/a          | Fdo.: FRANCISCO JOSÉ RUBIO HERNÁNDEZ<br>Tutor/a |
| Fdo.: FRANCISCO JOSÉ RUBIO HERNÁNDEZ<br>Director/es de tesis |   |



---

FRANCISCO JOSÉ RUBIO HERNÁNDEZ, Catedrático de Física Aplicada, del Departamento de Física Aplicada II de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga.

**INFORMA:**

Que el trabajo de investigación titulado **“Diseño de hormigones autocompactantes volcánicos andinos”** constituye la Memoria de Tesis Doctoral de D. LUIS FERNANDO NARANJO HERRERA, que ha sido realizada en los laboratorios de Reología de la Universidad de Málaga (España) y de la Universidad de las Fuerzas Armadas (Ecuador), bajo mi dirección, y cuya presentación autorizo.

Las publicaciones en coautoría que avalan esta tesis no han sido utilizadas en tesis anteriores.

En Málaga, a 8 de octubre de 2024.

Fdo. Francisco José Rubio Hernández

# AGRADECIMIENTOS

Me gustaría extender un sincero y profundo agradecimiento a quienes han sido actores esenciales en el desarrollo de esta tesis doctoral.

En primer lugar, expreso mi gratitud a **Paco** mi tutor y director, cuya guía y apoyo incondicional fueron fundamentales para llevar a buen término este proyecto. Su paciencia, consejos y empuje han sido una fuente de motivación a lo largo de todo el proceso. Sin su dedicación y compromiso, no habría sido posible alcanzar este logro.

A **Reinaldo**, un profesional a cabalidad, cuya guía y motivación fueron determinantes para iniciar este viaje para alcanzar un nivel académico que siempre estuvo en mi mente. Desde los primeros pasos de este trabajo hasta los momentos más complejos, su sabiduría, paciencia y palabras de aliento han sido una fuente constante de inspiración. Reinaldo no solo me ayudó a superar los desafíos inherentes a la investigación, sino que también me recordó la importancia de no perder de vista los sueños, incluso cuando el camino parecía difícil.

Asimismo, quiero rendir un especial homenaje a **Nicolás**, quien no solo fue parte de la idea inicial de este trabajo de investigación, sino que también me brindó su respaldo durante su desarrollo. Su espíritu creativo, profesionalismo y entusiasmo fueron inspiradores. Lamentablemente, su fallecimiento durante el transcurso de esta tesis dejó un vacío irreparable, pero su legado perdura en los resultados alcanzados. A él le dedico este trabajo, con la esperanza de que su visión y pasión por la investigación sigan siendo una fuente de inspiración para futuras generaciones.

Gracias a sus consejos precisos y su apoyo inquebrantable, logré mantenerme enfocado en la meta de alcanzar el grado de doctor. Su pasión por el conocimiento y su generosidad al compartirlo fueron pilares en este proceso, y me siento profundamente afortunado de haber contado con su presencia en este viaje académico. Este logro es también un testimonio de su impacto, y no puedo más que sentirme agradecido por haber tenido la oportunidad de trabajar bajo su orientación.

A **Deivi**, a quien tuve el privilegio de conocer durante el desarrollo de este proyecto, su compromiso con la investigación, especialmente en el campo de la Reología, fue admirable. Su apoyo fue decisivo para alcanzar los objetivos propuestos, y su profesionalismo e inagotable dedicación fueron clave en cada etapa del proceso.

A **mi familia**, quienes han sido mi pilar fundamental durante todo el proceso de este doctorado. Agradezco su amor, comprensión y apoyo incondicional en los momentos más desafiantes. Han estado a mi lado cuando las dificultades parecían insuperables, dándome la fuerza para seguir adelante.

Cada palabra de aliento, cada gesto de motivación y su presencia constante me recordaron que no estaba solo en este viaje. Este logro no solo es mío, sino también de ustedes, por haber sido el motor que me impulsó a alcanzar esta meta. No habría sido posible sin su paciencia y fe en mí, por lo que estaré eternamente agradecido.

Finalmente, quiero hacer extensivo mi agradecimiento a todos aquellos que, de una forma u otra, contribuyeron al éxito de este proyecto, ya sea a través de su apoyo emocional, su conocimiento o su aliento en los momentos difíciles. Gracias a todos por formar parte de este camino.

Fernando

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis, con la cual alcanzo el grado académico de Doctor, a mi querida familia, quienes han sido el pilar fundamental en cada etapa de este proceso.

A mi querida madre, que ya no me acompaña físicamente en este mundo pero que siempre está en mi mente y corazón, mi más profunda gratitud por su amor incondicional, por enseñarme a perseverar con paciencia y sabiduría, y por ser un ejemplo de fortaleza en los momentos más difíciles.

A mis queridos hijos: Fernanda, María Fernanda, María Elizabeth y Luis Fernando, por ser mi fuente inagotable de inspiración, por su comprensión y apoyo durante los momentos difíciles y de ausencia, y por recordarme siempre la importancia de soñar y luchar por alcanzar las metas, con especial atención a la expresión que aprendieron de mí, *“lo que se inicia se termina”*. Este logro también es de ustedes, quienes me han acompañado en cada paso del camino, siempre les tengo en mi corazón.

Fernando

## ÍNDICE

|                    |    |
|--------------------|----|
| AGRADECIMIENTOS.   | 1  |
| DEDICATORIA.       | 3  |
| LISTA DE TABLAS.   | 8  |
| LISTA DE FIGURAS.  | 10 |
| LISTA DE SÍMBOLOS. | 13 |
| ABREVIATURAS.      | 15 |
| RESUMEN.           | 17 |

### CAPÍTULOS.

#### I. INTRODUCCIÓN.

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | JUSTIFICACIÓN.                                    | 21 |
| 1.2 | MÉTODO DEL MORTERO EQUIVALENTE AL HORMIGÓN (MEH). | 23 |
| 1.3 | INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS INERTES.              | 25 |
| 1.4 | INFLUENCIA DE LOS SUPERPLASTIFICANTES.            | 27 |
| 1.5 | ENSAYOS MECÁNICOS. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN.       | 28 |
| 1.6 | OBJETIVO.   | 29 |
| 1.7 | REFERENCIAS.                                      | 30 |

#### II. MARCO TEÓRICO.

|     |                                 |    |
|-----|---------------------------------|----|
| 2.1 | INTRODUCCIÓN.                   | 37 |
| 2.2 | REOGRAMAS Y MODELOS REOLÓGICOS. | 38 |
| 2.3 | TEORÍA MULTIESCALA.             | 43 |
| 2.4 | REFERENCIAS.                    | 44 |

**III. EQUIPOS, MATERIALES Y MÉTODOS DE MEDIDA.**

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.1   | INTRODUCCIÓN.   | 47 |
| 3.2   | EQUIPOS Y MÉTODOS DE MEDIDA.                                    | 47 |
| 3.3   | CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.                               | 51 |
| 3.4   | REÓMETRO.   | 52 |
| 3.5   | DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MATERIALES.                       | 57 |
| 3.5.1 | Cementos.   | 57 |
| 3.5.2 | Aditivos.   | 60 |
| 3.5.3 | Agregados.  | 61 |
| 3.5.4 | Descripción del ensayo de la curva de flujo estacionario.       | 65 |
| 3.6   | ENSAYO DE CONO Y MINI-CONO DE ABRAMS.                           | 67 |
| 3.7   | ENSAYOS MECÁNICO EN PROBETAS DE MEH Y HAC EN ESTADO ENDURECIDO. | 68 |
| 3.6   | REFERENCIAS.  | 70 |

**IV. COMPORTAMIENTO VISCOSO DEPENDIENTE DEL TIEMPO DE PASTAS DE CEMENTO.**

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.1 | INTRODUCCIÓN.  | 73 |
| 4.2 | ESTUDIO CON PASTAS DE CEMENTOS VOLCÁNICOS.   | 74 |
| 4.3 | ESTUDIO DEL CVDT DE CP ADELGAZAMIENTO POR CIZALLA/ESPESAMIENTO POR CIZALLA.  | 78 |
| 4.4 | COMPORTAMIENTO DE FLUJO EN ESTADO ESTACIONARIO.  | 80 |
| 4.5 | ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO VISCOSO DEPENDIENTE DEL TIEMPO (CVDT) DE LAS PASTAS DE CEMENTO.                           | 84 |
| 4.6 | ESTUDIO DEL EFECTO DE ADITIVOS PLASTIFICANTES COMERCIALES EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS PASTAS DE CEMENTO VOLCÁNICO. | 91 |
| 4.7 | EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ADITIVO EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS MEZCLAS CON CPV-AM.                       | 92 |
| 4.8 | REFERENCIAS.   | 95 |



## **V. DISEÑO Y REOLOGÍA DE LOS MORTEROS EQUIVALENTES AL HORMIGÓN.**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.1   | INTRODUCCIÓN.  | 98  |
| 5.2   | DEFINICIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS Y SUS FRACCIONES PARA PREPARAR LOS MEH.                                  | 100 |
| 5.3   | DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE LOS AGREGADOS.   | 102 |
| 5.3.1 | Forma de las partículas de los agregados BS, BP y FS.  | 105 |
| 5.3.2 | Efecto del volumen de las partículas de los agregados.   | 106 |
| 5.4   | DISEÑO DE LOS MEHs CON LOS CPVs Y AGREGADOS MINERALES DE CANTERAS DEL ECUADOR.                             | 107 |
| 5.4.1 | Cálculos para preparar los MEH con la Fase 1.  | 108 |
| 5.4.2 | Cálculos para preparar los MEH para las Fases 2 y 3.   | 111 |
| 5.4.3 | Preparación de las mezclas de los MEH.   | 114 |
| 5.4.4 | Parámetros para los ensayos reológicos de cizalla continua.  | 116 |
| 5.4.5 | Ajustes iniciales de la concentración de aditivo y la relación agua/cemento (a/c) para las mezclas de MEH. | 116 |
| 5.4.6 | Resultados del estudio de la concentración del aditivo Viscocrete en la formulación de los MEH.            | 117 |
| 5.5   | COMPOSICIÓN DE LOS MEHs.   | 122 |
| 5.5.1 | Comportamiento reológico de los MEHs-F1.   | 124 |
| 5.5.2 | Comportamiento reológico de los MEHs-F2 y MEHs-F3.   | 126 |
| 5.5.3 | Formulación de los HAC-CPV.  | 129 |
| 5.6   | REFERENCIAS.   | 132 |

## **VI. DISEÑO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES.**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.1   | INTRODUCCIÓN.  | 134 |
| 6.2   | DISEÑO TEÓRICO DE LOS HAC POR MEDIO DEL MÉTODO DEL MEH.  | 134 |
| 6.3   | DISEÑO PRÁCTICO DE LOS MEH Y LOS HAC PARA LOS ENSAYOS DE CONO DE ABRAMS Y/O ENSAYOS MECÁNICOS. | 135 |
| 6.3.1 | Escalamiento del MEH y el HAC a casos prácticos.   | 136 |



|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.3.2 | Selección del tamaño de grava para el HAC.   | 137 |
| 6.4   | RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONO Y MINI-CONO DE ABRAMS.                           | 139 |
| 6.5   | RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS EN PROBETAS DE MEH Y HAC EN ESTADO ENDURECIDO. | 140 |
| 6.6   | REFERENCIAS.   | 146 |

## VII. CONCLUSIONES.

|     |                                  |     |
|-----|----------------------------------|-----|
| 7.1 | CONCLUSIONES.                    | 148 |
| 7.2 | FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN. | 150 |

## LISTA DE TABLAS

| Tabla | Descripción  |
|-------|--|
| 2.1   | Clasificación de los comportamientos no-Newtonianos [2].   |
| 3.1   | Plantilla modelo del procedimiento para realizar las medidas empleando la consola de control del software Tríos 5.1. |
| 3.2   | Mineralogía y composición química de los cementos puzolánicos.   |
| 3.3   | Propiedades físicas de los cementos.   |
| 3.4   | Datos técnicos de aditivos comerciales plastificantes.   |
| 3.5   | Datos técnicos del aditivo Viscocrete 4100 (Sika, Ecuador).  |
| 3.6   | Resumen del análisis granulométrico de los agregados finos.  |
| 3.7   | Granulometría del agregado grueso.   |
| 4.1   | Composición mineralógica y propiedades físicas de la PV y el CP.   |
| 4.2   | Composición de las pastas de cemento $a/b = 0.45$ .  |
| 4.3   | Resultados del ajuste de la viscosidad vs. esfuerzo de corte.  |
| 4.4   | Parámetros reológicos interpretados partiendo de A, B y C.   |
| 4.5   | Tiempo de relajación para la respuesta viscoelástica de CP y PV.   |
| 4.6   | Parámetros del MBM obtenidos a partir de los datos en extraídos de la Figura 4.5.                                    |
| 5.1   | Proporciones de los materiales para el hormigón de referencia.   |
| 5.2   | Densidad específica y coeficiente de absorción de los agregados.   |
| 5.3   | Parámetro para el diseño de los MEH con las Fases 1, 2 y 3 de los agregados finos BS, BP y FS.                       |
| 5.4   | Parámetro para el diseño de los MEH con las Fases 1, 2 y 3 de los agregados finos BS, BP y FS.                       |

- 5.5 Parámetros de la ecuación de Bingham Modificado. MEH-F1.
- 5.6 Parámetros de la ecuación de Bingham Modificado. MEH-F2.
- 5.7 Parámetros de la ecuación de Bingham Modificado. MEH-F3.
- 5.8 Se seleccionaron los ensayos utilizando el mini cono Abrams de mortero equivalente detallado en las Tablas 5.5 – 5.7 con concreto normalizado según recomendación del Colegio Oficial de Ingenieros Civiles (Quito, Ecuador) (Tabla 5.1).
- 5.9 Formulaciones de hormigón inferidas a partir de los MEH-F3 (Tabla 5.8) y las recomendaciones del Colegio Oficial de Ingenieros Civiles (Quito, Ecuador) (Tabla 5.1).
  
- 6.1 Escalamiento de las formulaciones MEH y HAC. Caso práctico.
- 6.2 Selección de tamices y tamaño de partícula de la grava para preparar el hormigón autocompactante.
- 6.3 Ensayo mecánico en estado endurecido de los MEHs seleccionados.
- 6.4 Ensayo mecánico en estado endurecido de los HACs seleccionados.

## LISTA DE FIGURAS

| <b>Figura</b> | <b>Descripción</b>  |
|---------------|---|
| 2.1           | Reogramas (curva de flujo estacionario) correspondientes al comportamiento newtoniano y a los tres comportamientos no-newtonianos puramente viscosos independientes del tiempo. |
| 3.1           | Balanzas a) UW2200H y b) BW32KH de (Shimadzu Corporation, Japón).   |
| 3.2           | Batidora Hamilton Beach-64650 utilizada para preparar los MEHs.   |
| 3.3           | a) Mezcladora Hobart y b) Mezcladora Tipo Trompo.   |
| 3.4           | Materiales para preparar HAC a gran escala: aditivo Sika, agregados finos, cemento, contenedor para las mezclas y báscula de pedestal.  |
| 3.5           | Aparato de Blaine y matraces de Le Chatelier.   |
| 3.6           | a) Agregado Grueso (Grava) y Agregados Finos b) BS, c) FS d) BP.  |
| 3.7           | Tamices de malla cuadrada para los ensayos de granulometría.  |
| 3.8           | Reómetro Discovery DHR2.  |
| 3.9           | Geometría para los ensayos reológicos: a) Vanos y b) Copa.  |
| 3.10          | Pantalla para descripción de la muestra y procedimiento.  |
| 3.11          | Descripción de los parámetros de la geometría de Vanos.   |
| 3.12          | Descripción del Paso 1 de la Etapa 1 de medición (Flow Peak Hold).  |
| 3.13          | Descripción del Paso 2 de la Etapa 1 de medición (Flow Sweep).  |
| 3.14          | Composición básica de pasta de cemento, mortero y hormigón.   |
| 3.15          | Microscopía electrónica de barrido realizada en los cementos.   |
| 3.16          | Paso acumulativo de las tres arenas y del agregado grueso.  |
| 3.17          | Protocolo de curva de flujo constante.  |
| 3.18          | Elementos para los ensayos de mini-cono de Abrams.  |
| 3.19          | Equipo utilizado para ensayo mecánico (esfuerzo de compresión).   |

- 4.1 Comparación entre los resultados de estudios transitorios correspondientes a una pasta de CP obtenida con un reómetro de tensión controlada que trabaja en modo de control de velocidad (fila superior) y en modo de control de tensión (fila inferior).
- 4.2 Se presentan las curvas de viscosidad para las pastas de cemento fresco CPA, CVA, CPAAd y CVAAd.
- 4.3 Se presentan predicciones sobre la respuesta a una prueba de aumento gradual, como se muestra en (a), (b) Si el fluido se comporta como adelgazamiento por cizalla y (c), si el fluido se convierte en espesamiento por cizalla.
- 4.4 Resultados de los ensayos de esfuerzo cortante por pasos aplicados a suspensiones de espesamiento por cizalla y de adelgazamiento por cizalla (CPAAd y CVAAd) y de adelgazamiento por cizalla (CPA y CVA).
- 4.5 CFE para las pastas de CPV-AM con aditivos al 1, 2 y 3% de la masa de cemento.
- 5.1 Diseño de Fases (F1, F2, F3) para los agregados finos (BS, BP, FS).
- 5.2 Acumulado Pasante para los agregados finos BS, BP y FS.
- 5.3 Distribución de tamaño de partículas para BS, BP y FS.
- 5.4 Representación gráfica y DTP de los tipos de gradación.
- 5.5 Efecto de la forma del agregado y el contenido de arena.
- 5.6 Imágenes ópticas obtenidas para las arenas BS, BP y FS.
- 5.7 CFE para los MEH de SA y AM con BS y BP al 2.0 % mc de aditivo.
- 5.8 CFE para los MEH de SA y AM con BS y BP al 2,5 % mc de aditivo.
- 5.9 Cajas de trabajabilidad para los MEH de SA y AM con BS y BP.
- 5.10 Resultados mini cono de Abrams MEH-F1. Arena BS.  $a/c = 0.30$ . 2%ca Viscocrete.
- 5.11 Ensayos de minicono de MEH F3 seleccionados. Arena BS.  $aa/cc = 0,30$ . 2,0 % ca Viscocrete.
- 5.12 Resultados del cono de Abrams correspondiente a los tres HAC-CPV inferidos a partir de los MEH-F3 correspondientes (arena BS,  $a/c = 0.30$ , 2.0 % ca aditivo Viscocrete).

- 6.1 Selección de tamices para obtener una grava apropiada para la preparación de los HAC según la Norma EN12620.
- 6.2 Probetas de los MEHs conformadas para los ensayos de esfuerzo de compresión.
- 6.3 Probetas de los HACs conformadas para los ensayos de esfuerzo de compresión.
- 6.4 Valores máximos de esfuerzo de compresión aplicados a los diferentes MEHs.
- 6.5 Valores máximos de esfuerzo de compresión aplicados a los diferentes HAC.
- 6.6 Comparación de los valores máximos de esfuerzo de compresión aplicados a los MEH y HAC conformados con F3 de árido fino.

## LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo          | Descripción  |
|------------------|--|
| $\tilde{\tau}$   | Tensor de esfuerzos viscosos   |
| $\tilde{\gamma}$ | Tensor velocidad de deformación  |
| $\eta$           | Viscosidad dinámica  |
| $\eta_p$         | Viscosidad plástica  |
| $K$              | Consistencia del material  |
| $n$              | Índice de comportamiento de flujo  |
| $c$              | Coefficiente de segundo orden  |
| $\tau_y$         | Límite de fluencia   |
| $G'$             | Módulo elástico  |
| $G''$            | Módulo viscoso   |
| $g_i$            | Módulo de relajación del i-ésimo elemento                                |
| $\lambda_i$      | Tiempo de relajación del i-ésimo elemento de Maxwell                     |
| $\mathcal{O}$    | Valor de la función objetivo   |
| $M$              | Número de valores de frecuencia impuestos a la microestructura en reposo |
| $ssd$            | Superficie saturada seca   |
| $\rho_{ssd}$     | Densidad relativa de una superficie saturada seca                        |
| $\%Abs.$         | Coefficiente de absorción  |
| $D_n$            | Diámetro equivalente de partícula  |
| $d_{tn}$         | Diámetro de apertura de los tamices                                      |
| $N_n$            | Número de partículas   |
| $V_{ssd}$        | Volumen de una Superficie seca saturada                                  |
| $V_n$            | Volumen de una partícula   |
| $\bar{S}_T$      | Superficie total ponderada de toda la muestra                            |
| $\bar{S}_n$      | Superficie total ponderada de cada partícula                             |
| $\bar{S}_F$      | Superficie total ponderada de la fase                                    |
| $S_n$            | Superficie específica  |
| $m_{Dn}$         | Masa retenida acumulada de partículas                                    |

|                |  |
|----------------|--|
| $m_T$          | Masa retenida acumulada                                |
| $m_G$          | Masa de la grava                                       |
| $m_F$          | Masa de la fase  |
| $\bar{S}_G$    | Superficie total ponderada de la grava                 |
| $\bar{S}_F$    | Superficie total ponderada de la fase de agregado fino |
| $m_{FT}$       | Masa total de agregado fino                            |
| $m_{F1}^\circ$ | Masa inicial de referencia del agregado fino           |
| $m_{AT}$       | Masa de agua total                                     |
| $m_A^\circ$    | Masa de agua inicial de la relación agua/cemento       |
| $m_{AF}$       | Masa de agua absorbida de la fase                      |
| $m_C^\circ$    | Masa de cemento inicial                                |
| $\%Abs(F)$     | Coefficiente de absorción de agua de la fase           |
| $R_{(s/c)}$    | Relación arena/cemento                                 |
| $R_{(a/c)}$    | Relación agua/cemento                                  |
| $m_{AAd}$      | Masa de agua del aditivo                               |
| $\%Ad$         | Coefficiente de aditivo                                |

## ABREVIATURAS

| <b>Abreviatura</b> | <b>Descripción</b>                                      |
|--------------------|---|
| CP                 | Cemento Portland  |
| PC                 | Pasta de Cemento  |
| PP                 | Piedra Pómez  |
| CV                 | Ceniza Volcánica  |
| PV                 | Puzolana Volcánica                                      |
| RV                 | Residuos Volcánicos                                     |
| CPV                | Cemento Portland Volcánico                              |
| PCV                | Pastas de Cemento Volcánico                             |
| C-S-H              | Silicato de Calcio Hidratado                            |
| MEH                | Mortero Equivalente al Hormigón                         |
| HAC                | Hormigón Autocompactante                                |
| HAC-CPV            | Hormigón Autocompactante con Cemento Portland Volcánico |
| PCE                | Éteres de Policarboxilato                               |
| SMF                | Formaldehído de Melamina Sulfonado                      |
| LGS                | Lignosulfanatos   |
| SA                 | Cemento Selvalegre                                      |
| CO                 | Cemento Campeón   |
| AM                 | Cemento Armaduro  |
| BS                 | Arena Beige   |
| BP                 | Piedra Azul Triturada                                   |
| FS                 | Arena Roja Lavada                                       |

|        |   |
|--------|---|
| G      | Grava   |
| CFE    | Curvas de Flujo Estacionario                                    |
| CVDT   | Comportamiento Viscoso Dependiente del Tiempo                   |
| CVIT   | Comportamiento Viscoso Independiente del Tiempo                 |
| A      | Agua  |
| B      | Binder (aglutinante)  |
| Ad     | Aditivo   |
| CPA    | Cemento Portland más Agua                                       |
| CVA    | Ceniza Volcánica más Agua                                       |
| CPAAd  | Cemento Portland más Agua más Aditivo                           |
| CVAAd  | Ceniza Volcánica más Agua más Aditivo                           |
| LVL    | Límite Viscoelástico Lineal                                     |
| COPA   | Cizallamiento Oscilatorio de Pequeña Amplitud                   |
| F      | Fase  |
| F1     | Fase 1  |
| F2     | Fase 2  |
| F3     | Fase 3  |
| ASP    | Aditivo Super Plastificante                                     |
| DTP    | Distribución de Tamaño de Partículas                            |
| MEH-F1 | Mortero Equivalente al Hormigón conformado con F1 de árido fino |
| MEH-F2 | Mortero Equivalente al Hormigón conformado con F2 de árido fino |
| MEH-F3 | Mortero Equivalente al Hormigón conformado con F3 de árido fino |

## RESUMEN

El hormigón autocompactante (HAC) es un material innovador que fluye bajo su propio peso, permitiendo una compactación uniforme sin necesidad de vibración, lo que lo hace ideal para estructuras complejas y congestionadas. Desde el ámbito de la reología, el HAC se caracteriza por su alta deformabilidad, resistencia a la segregación y capacidad para pasar a través de refuerzos densos, logradas mediante el uso de aditivos superplastificantes y una adecuada selección de áridos. Estos superplastificantes mejoran la fluidez y cohesión del hormigón, mientras que la inclusión de áridos volcánicos, como cenizas y piedra pómez, no solo optimiza su rendimiento, sino que también reduce la huella de carbono de la industria cementera.

El método del mortero equivalente al hormigón (MEH) permite realizar estudios reológicos más precisos, facilitando el diseño de mezclas que aseguren una trabajabilidad óptima. Además, la interacción entre los áridos y los aditivos influye en el comportamiento reológico, afectando la estabilidad y resistencia del HAC. Por lo tanto, el estudio del HAC y su formulación con cemento Portland volcánico busca mejorar la durabilidad y resistencia de las estructuras en zonas sísmicas, contribuyendo a prácticas de construcción más sostenibles y eficientes. El objetivo de esta investigación es desarrollar formulaciones de HAC-CPV adecuadas para la construcción en zonas sísmicas, utilizando materiales volcánicos disponibles en Ecuador y analizando la correlación entre sus propiedades en estado fresco y endurecido.

Así mismo, este trabajo de investigación analiza los modelos teóricos que describen el comportamiento viscoso de los fluidos, enfocándose en la trabajabilidad de las mezclas cementosas, que depende de su límite de fluencia y viscosidad plástica. Se destacan tres características clave del hormigón autocompactante (HAC): capacidad de llenado, capacidad de paso y estabilidad. La estabilidad se divide en dinámica, que evita la separación de componentes durante el llenado, y estática, que previene la segregación. Para lograr un buen control reológico del HAC, se deben seguir ciertos requisitos en su diseño, como un bajo volumen de agregados, la inclusión de componentes minerales, un mayor contenido de material cementante, el uso de superplastificantes y una adecuada

relación agua/cemento. Estos factores influyen en la viscosidad plástica y el límite de fluencia del material.

Se explora modelos teóricos que describen el comportamiento viscoso de los materiales cementosos, destacando cómo la reología, el estudio del flujo y deformación de materiales, es clave en la trabajabilidad del hormigón. La reología del hormigón no sigue el modelo newtoniano, sino que presenta comportamientos no lineales, como el adelgazamiento y espesamiento por cizalla, o viscoplasticidad, donde la viscosidad varía con el esfuerzo aplicado. El modelo de Bingham es útil para describir la viscosidad plástica y el límite de fluencia, determinando la facilidad de flujo y la resistencia a la segregación del hormigón. Sin embargo, modelos como el de Herschel-Bulkley o el de Bingham modificado ofrecen una mejor descripción al incluir comportamientos no lineales y corregir ciertos inconvenientes. Además, los parámetros reológicos son esenciales para diseñar hormigones con propiedades adecuadas, influyendo en la estabilidad y capacidad de bombeo del material. La teoría multiescala también se menciona para predecir el comportamiento del hormigón desde sus componentes, pero señala que la reología del hormigón está dominada por fricciones más que por fuerzas coloidales, lo que requiere un enfoque específico para cada fase del material.

Se describe los equipos y métodos de medida utilizados en el trabajo experimental, con un enfoque en el diseño de experimentos para MEH y hormigones autocompactantes con cemento Portland volcánico (HAC-CPV). Adicional, se refieren las propiedades fisicoquímicas de los componentes utilizados y se presentan los resultados de laboratorio, incluyendo características proporcionadas por el fabricante sobre la aplicación y operabilidad de los cementos y aditivos en la construcción. La investigación examinará brevemente la dosificación de aditivos en los MEHs y HACs, considerando la inclusión de agregados gruesos y finos, los cuales podrían interactuar con el aditivo y generar comportamientos reológicos o mecánicos no deseados.

En el diseño del protocolo para la experimentación reológica con materiales cementantes frescos, se buscó minimizar la influencia del proceso de hidratación del cemento y se definió un estado mecánico de referencia para garantizar la repetibilidad de los resultados experimentales.

Se esperaba, de manera lógica y generalizada, que las pastas de cemento que se espesan por cizallamiento mostraran un comportamiento más antitixotrópico que tixotrópico. Sin embargo, las pastas de cemento Portland volcánico (CPV) evaluadas en este estudio mostraron un comportamiento tixotrópico aparente durante ensayos de incremento gradual. Este resultado inesperado se explicó provisionalmente asumiendo que, al inicio de la aplicación de la tensión escalonada, ocurre una agregación rápida de partículas (en los ensayos de incremento) y una desagregación (en los ensayos de reducción). En otras palabras, se planteó la hipótesis de la existencia de mecanismos rápidos de bloqueo o desbloqueo en las pastas de cemento que se espesan por cizallamiento. Posteriormente, se propuso que la reorganización inicial de las partículas de cemento fue seguida por una erosión progresiva del estado bloqueado (en el aumento gradual) o una agregación progresiva del estado desbloqueado (en la reducción gradual) debido a la constante acción de la tensión de cizallamiento. Estas ideas fueron empleadas para desarrollar una ecuación empírica que modela la dependencia de la viscosidad en función de la tensión cortante, aplicable en contextos cementicios.

La actividad volcánica es típica en zonas propensas a sismos, por lo que los materiales volcánicos son comunes en paisajes donde los terremotos son frecuentes. Dado que los residuos volcánicos (RV) poseen actividad puzolánica, sustituir el cemento Portland (CP) convencional por RV es una opción atractiva tanto por razones económicas como por la reducción de la huella de CO<sub>2</sub>. En consecuencia, el uso de cementos Portland volcánicos (CPV) en el diseño de hormigones contribuye a una producción de cemento más sostenible. En zonas sísmicas, las actividades de construcción requieren el uso de hormigón autocompactante, que presenta un comportamiento de flujo caracterizado por baja tensión de fluencia, alta viscosidad plástica y espesamiento por cizallamiento a altos niveles de cizallamiento. Sin embargo, lograr estas propiedades en el hormigón no es sencillo con los métodos tradicionales de prueba de flujo (como el cono de Abrams), ya que son costosos en tiempo y materiales. Una alternativa poco explorada es el uso de reometría absoluta mediante la sustitución del hormigón por mortero equivalente. En este estudio, se empleó el método del mortero equivalente de hormigón para desarrollar formulaciones de HAC con CPV. Las pruebas con mini cono mostraron la falta de mezcla en algunas formulaciones de MEH seleccionadas según los criterios del HAC. A partir de

estas formulaciones, se propusieron tres tipos de hormigón, adaptados a la normativa europea de HAC mediante la prueba de expansión del cono de Abrams.

Se desarrollaron las ecuaciones necesarias para los cálculos de la formulación de los MEH, y a partir de estas ecuaciones, se aborda el cálculo inverso para determinar la masa de grava requerida en el HAC, asegurando la consistencia en el cálculo del área superficial total y la aplicación adecuada de la técnica del mortero equivalente. El diseño teórico de los MEH se usa directamente en los ensayos reológicos, separando la mezcla por tamaños de grano y secándola, lo cual no sería práctico en aplicaciones de campo. Además, el cálculo realizado para los HACs tiene el inconveniente del secado de la arena y presenta una limitación en la selección de la grava, especialmente en construcciones de hormigón a gran escala que requieran propiedades autocompactantes.

Finalmente, se realizaron ensayos mecánicos (esfuerzo de compresión) sobre las probetas de MEHs y HACs diseñados y se obtuvieron algunas conclusiones de los resultados obtenidos.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 JUSTIFICACIÓN.

El hormigón autocompactante (HAC) es un material de construcción y edificación altamente innovador, caracterizado macroscópicamente porque fluye bajo su propio peso y es capaz de llenar el encofrado sin necesidad de ser sometido a consolidación mecánica. Este tipo de hormigón se distingue por su excepcional fluidez y estabilidad, lo que le permite encapsular el refuerzo y lograr una compactación uniforme incluso en las estructuras más complejas y congestionadas, reduciendo el riesgo de formación de cavidades y vacíos, lo que conduce a estructuras de hormigón de mayor calidad y más duraderas. El HAC es especialmente ventajoso en aplicaciones donde los métodos de vibración convencionales no son prácticos, como en secciones fuertemente reforzadas, geometrías complejas y situaciones donde la reducción del ruido es esencial. Por lo tanto, podemos afirmar que el desarrollo de HACs ha revolucionado la industria de la construcción y edificación, ofreciendo claras ventajas cuando se compara con el hormigón convencional, especialmente cuando se trata de obtener estructuras resistentes a movimientos sísmicos. Adicionalmente, sus beneficios también incluyen la reducción de los costos de mano de obra, una mayor velocidad en el proceso de construcción, la consecución de mejores acabados superficiales y una mayor durabilidad de las estructuras finalmente obtenidas [1].

Desde un punto de vista reológico, las propiedades clave de los HACs incluyen alta deformabilidad, resistencia a la segregación y capacidad de pasar a través de refuerzos densos. Estas características se logran, principalmente, mediante el uso de aditivos químicos denominados genéricamente superplastificantes, elaborando diseños optimizados de mezclas de los componentes esenciales (agua, cemento, áridos) capaces de mejorar la fluidez y la cohesión del hormigón [2] y con la adición de una fase inerte

(áridos) con características geométricas apropiadas para llenar encofrados densos de manera eficiente [3,4].

Dado que las actividades sísmicas y volcánicas están estrechamente relacionadas [5–13] no es de extrañar que los residuos volcánicos naturales (piedra pómez (PP) y cenizas volcánicas (CV)) formen parte del paisaje en las zonas con actividad sísmica presente y pasada. PP y CV reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento Portland (CP) y forman un gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H). Aprovechando la actividad puzolánica de las CV, resulta apropiado formular cemento Portland volcánico (CPV). Este material se obtiene reemplazando parcialmente el CP con CV, lo que conlleva una doble implicación positiva. Desde un punto de vista económico es particularmente ventajoso en regiones con abundante actividad volcánica porque allí los residuos volcánicos (RV) son fácilmente accesibles, reduciéndose así los costos de extracción y uso de materias primas y del transporte, implicando beneficios para la economía local. Por otra parte, como la producción de CP es altamente demandante en energía debido a la necesidad de calcinar piedra caliza para producir Clinker Portland. Este método de fabricación de CP genera emisiones de CO<sub>2</sub> cuantificadas en aproximadamente un 8% de las emisiones globales. Es evidente que reemplazar una parte del CP con CV reduce la necesidad de fabricar Clinker Portland, lo que conlleva menores emisiones de CO<sub>2</sub> reduciendo la huella de carbono generada por la industria cementera. En otro orden de cosas podemos decir que el uso de CPV está en línea con la filosofía del reciclado al poner en valor materiales puzolánicos naturales, contribuyendo así a la implantación de una industria de la construcción más sostenible [14–16].

Por lo tanto, el objetivo último de este estudio es obtener formulaciones de HAC con cemento Portland volcánico (HAC-CPV) que puedan ser utilizadas en el diseño de estructuras resistentes a terremotos [15]. El uso de HAC en regiones con alta actividad sísmica, como Japón e Italia, ha mejorado significativamente el rendimiento sísmico de las estructuras de hormigón. Los beneficios resultantes del uso de HAC se manifiestan por una mayor integridad estructural del hormigón a largo plazo, reducción del tiempo de construcción y mejora de la seguridad. Resultados previos indican que el uso de CPV en mezclas HAC mejora aún más estos beneficios, al proporcionar mayor resistencia y durabilidad, así como al reducir el impacto ambiental de las actividades de construcción [17]. Además, la reacción puzolánica del CPV mejora la microestructura del hormigón,

reduciendo su porosidad y aumentando la densidad de la matriz cementosa. Consecuentemente, resulta una mayor resistencia a la compresión, mejor resistencia a la penetración de sulfatos y cloruros, y un mejor rendimiento del hormigón a largo plazo [18], lo que, por otra parte, resulta especialmente útil en elementos prefabricados [19].

## **1.2 MÉTODO DEL MORTERO EQUIVALENTE AL HORMIGÓN (MEH).**

Las técnicas reométricas absolutas únicamente son aplicables si las partículas en suspensión tienen un tamaño inferior a diez veces el espaciado entre los dos elementos que definen la geometría utilizada. Más concretamente, considerando que, para que se cumpla la condición necesaria de cizalla simple, el espaciado entre los dos platos de la geometría plato-plato es del orden de 1-2 mm y que entre los dos cilindros concéntricos de esta geometría es del orden de 1-5 mm, es imposible utilizar esta técnica reométrica absoluta con hormigones, que contienen áridos hasta de 20 mm de diámetro medio. Para superar este serio inconveniente, se ha propuesto una nueva metodología [20] denominada del mortero equivalente al hormigón (MEH).

El método MEH es una innovación metodológica [20] que resulta especialmente útil para el diseño de HACs debido a la diversidad de componentes que están presentes en su formulación. Este método es apropiado considerando la necesidad de conseguir los comportamientos reológicos que específicamente definen a los HACs. Por otra parte, facilita el análisis de la posible correlación entre el comportamiento de un HAC en estado fresco y su respuesta en el estado endurecido. Con un MEH es posible realizar estudios reológicos con reómetros absolutos.

El método MEH consiste en reemplazar los agregados gruesos de un hormigón por agregados finos (arena). Las condiciones que se imponen son que el área específica y la composición del material inerte sean las mismas, que el tipo de cemento sea igual, que la relación agua/cemento sea idéntica y que el porcentaje de aditivo respecto de la cantidad de cemento se mantenga [19]. El diseño de un MEH está basado en dos hipótesis. Por un lado, se asume que los productos de hidratación aparecen en la interfase existente entre las partículas de cemento y los sólidos inertes. Por otro, los fenómenos de fricción que surgen cuando el material cementoso fluye aparecen en dicha interfase.

En definitiva, el área total de los agregados inertes es la variable fundamental que determina la trabajabilidad de los hormigones [10]. Fácilmente se pronostica que con un MEH podremos investigar con mayor facilidad y menor coste que si hemos de trabajar con el hormigón correspondiente, el efecto en las respuestas reológica y resistente de cada parámetro que interviene en el diseño de la mezcla, como pueden ser la relación agua/cemento, el tipo y dosificación de aditivos o el uso de materiales cementantes suplementarios. Al proporcionar una representación más precisa del comportamiento de flujo del hormigón, el método MEH facilita un diseño óptimo de hormigones en general y de HAC en particular, lo que conduce a un mejor rendimiento y una mayor calidad del producto final [20].

Más allá del interés académico, los beneficios resultantes del uso del método MEH han de permitir desarrollar mezclas de HACs que se ajusten a los requisitos específicos de cada proyecto, asegurando una fluidez, estabilidad y trabajabilidad óptimas en estado fresco. Esto es particularmente importante en proyectos de construcción complejos, donde el control preciso sobre las propiedades reológicas del hormigón es esencial para lograr el rendimiento deseado. El método MEH facilita el uso de materiales innovadores en nuevas formulaciones de hormigón, como es el caso del CPV, proporcionando así un marco fiable para poder evaluar sus efectos sobre el comportamiento reológico del HAC [21].

Los métodos reológicos empíricos tradicionales [22], como la prueba de flujo de asentamiento con el cono de Abrams (Slump Test) o la prueba de embudo en "V", proporcionan información muy limitada. A menudo están influenciados por factores externos como la temperatura y la humedad o, incluso, por la "habilidad" del operario que los ejecuta. Estos métodos tradicionales también requieren de tamaños de muestra grandes, lo que, evidentemente, los convierte en inadecuados para estudios de laboratorio [23,24]. Sin embargo, tal como hemos señalado, los ensayos reológicos absolutos solo son accesibles si se utiliza el método MEH, y ofrecen apreciables ventajas al comparar con los métodos tradicionales. Permiten caracterizar el hormigón con un mayor nivel de precisión e identificar los efectos en su comportamiento reológico de una variedad de parámetros relacionados con la composición de las mezclas, realizando las pruebas en un tiempo más breve y con cantidades de muestra más pequeñas [2], [25].

Los resultados de los estudios reológicos realizados con reómetros absolutos sirven para desarrollar modelos predictivos del comportamiento de los hormigones [25]. Por ejemplo, en zonas sísmicas donde se necesitan estructuras robustas y resistentes, la optimización de las propiedades reológicas de los HACs puede asegurar un mejor rendimiento bajo condiciones de carga dinámica [26].

### **1.3 INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS INERTES.**

Los agregados inertes (arena y grava), también desempeñan un papel significativo en las propiedades reológicas y mecánicas del hormigón. El tamaño, la forma y la gradación de estos agregados influyen en el comportamiento de flujo, la estabilidad y la resistencia del hormigón [19]. La presencia de agregados afecta a las propiedades reológicas de un hormigón de manera diferente a como lo hace con un mortero. En un hormigón los agregados gruesos contribuyen a la estabilidad e integridad estructural general de la mezcla, pero también pueden introducir desafíos relacionados con el flujo y la compactación. En contraste, los morteros, que contienen únicamente agregados finos, exhiben características de flujo diferentes debido a la ausencia de partículas más grandes que puedan interrumpir la homogeneidad de la mezcla [27], [28].

La presencia de agregados finos en morteros da lugar a una mezcla homogénea con un límite de fluencia menor que el del correspondiente hormigón [28]. La adición de agregados gruesos en hormigones genera complejidades adicionales. Los agregados gruesos aumentan el valor del límite de fluencia, afectando a su capacidad de flujo y compactación. Por lo tanto, es fácil comprender que la gradación de los agregados será crucial para conseguir un equilibrio entre la estabilidad del material cementoso y su capacidad de fluir. Una gradación bien elegida puede mejorar la compactación y reducir el riesgo de segregación y exudación [29], que son características deseables en un hormigón autocompactante.

Los agregados finos con superficies lisas y forma redondeada tienden a mejorar el flujo y la trabajabilidad de los morteros. Esto se debe a la menor fricción interna y la facilidad con la que las partículas pueden deslizarse unas sobre otras [30]. Sin embargo, los agregados con formas angulares y superficies rugosas pueden mejorar el interbloqueo

y la cohesión en los hormigones, aunque también aumentan la fricción interna y la resistencia al flujo. Por lo tanto, optimizar la forma y la textura de los agregados es una tarea esencial si se pretende conseguir un hormigón que sea estable y fluido [31].

La disminución de la viscosidad con la tasa de cizalla recibe el nombre de adelgazamiento por cizalla o reo-fluidificación (shear-thinning). Este comportamiento reológico es beneficioso ya que permite que el hormigón fluya fácilmente durante su puesta en obra para, posteriormente, recuperar el valor de su viscosidad cuando las fuerzas de cizallamiento se eliminan, lo que facilitará su estabilidad y reducirá el riesgo de segregación. Precisamente, la inclusión de agregados finos bien graduados contribuye a la aparición de una respuesta reo-fluidificante. El uso de agregados con formas suaves y redondeadas también facilita la aparición del comportamiento reo-fluidificante al minimizar la resistencia al flujo cuando aumenta la tasa de cizalla [32,33].

En contraste, también es factible observar, aunque únicamente en el caso de HACs, el comportamiento opuesto, es decir, un aumento de la viscosidad con la tasa de cizalla. A este comportamiento reológico se le denomina engrosamiento por cizalla o reo-espesamiento (shear-thickening). Aunque este comportamiento puede ser inducido por ciertos tamaños y formas de agregados, particularmente aquellos que aumentan la fricción entre partículas y la resistencia al flujo [32,33], es fundamentalmente debido a la presencia de aditivos superplastificantes, que mantienen dispersas a las partículas de cemento a niveles de cizalla relativamente altos [34,35].

Los materiales viscoelásticos exhiben, simultáneamente, características viscosas y elásticas cuando fluyen. Esto significa que la mezcla puede fluir como un líquido viscoso bajo cizallamiento, pero también puede recuperar parte de su forma cuando se elimina el cizallamiento, de forma similar a lo que ocurre con un sólido elástico. La naturaleza viscoelástica de los HACs viene influenciada por el tipo y la cantidad de agregados. Los agregados bien graduados y con formas adecuadas ayudan a mantener un equilibrio óptimo entre viscosidad y elasticidad, asegurando una buena trabajabilidad y estabilidad durante la puesta en obra [36–38].

La tixotropía se define como la disminución dependiente del tiempo de la viscosidad con el cizallamiento sostenido y la recuperación de la viscosidad cuando el cizallamiento



se elimina. Esta propiedad determina que el hormigón permanezca fluido facilitando la puesta en obra y recupere el valor de su viscosidad cuando cesa el flujo para evitar así la segregación y el sangrado [39]. Es deseable que los HACs recuperen rápidamente el valor de su viscosidad al ser llevados al reposo, lo cual se ve favorecido por el uso de agregados finos y determinados aditivos. Los agregados gruesos y angulares, por otro lado, pueden ralentizar la recuperación tixotrópica, afectando negativamente la estabilidad de la mezcla [40,41].

#### **1.4 INFLUENCIA DE LOS SUPERPLASTIFICANTES.**

Los superplastificantes desempeñan un papel crucial en la producción de HACs al mejorar sus propiedades de flujo sin comprometer su estabilidad y cohesión. Son aditivos químicos que reducen la relación agua/cemento en la mezcla de hormigón, aumentando así su resistencia y durabilidad mientras mantienen una excelente trabajabilidad. Los superplastificantes logran este objetivo dispersando las partículas de cemento de manera más uniforme, reduciendo la fricción entre ellas y facilitando un mejor empaquetamiento de partículas [42].

En el contexto del HAC-CPV, es esencial la selección de superplastificantes apropiados para asegurar que la reacción puzolánica de las CV no se vea afectada negativamente. Los superplastificantes comúnmente utilizados incluyen éteres de policarboxilato (PCE), formaldehído de melamina sulfonado (SMF) y lignosulfonatos (LGS). Cada tipo ofrece ventajas distintas y se elige en función de los requisitos específicos de la mezcla de hormigón [43]. En estudios previos realizados por el grupo de la Universidad de Málaga [47] sobre la compatibilidad de diferentes tipos de superplastificantes con CPVs, se llegó a la conclusión de que los que están basados en PCE son particularmente efectivos para proporcionar una alta reducción de agua y mejor fluidez, lo que los hace ideales para diseñar HAC-CPVs [44].

## 1.5 ENSAYOS MECÁNICOS. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN.

La capacidad de predecir el comportamiento de un HAC a partir de ensayos realizados con el correspondiente MEH se extiende no solo a los ensayos reométricos en el estado fresco, sino que incluye también a los ensayos mecánicos en el estado endurecido. Ambos estudios son cruciales a la hora de garantizar la seguridad y durabilidad de las estructuras en áreas con alta actividad sísmica. Los ensayos de compresión proporcionan información esencial para el diseño de estructuras resistentes, mientras que los ensayos reológicos aseguran que las mezclas puedan ser colocadas y compactadas adecuadamente sin segregación en condiciones reales de construcción [45,46].

En los ensayos de compresión, se preparan probetas de HAC-CPV con diferentes proporciones de CV. Las muestras HAC-CPV se dejan endurecer por un determinado intervalo de tiempo y luego se someten a un esfuerzo mecánico para medir su resistencia. Estos ensayos permiten evaluar cómo el contenido de CV en el hormigón afecta a la resistencia a compresión del HAC-CPV, proporcionando datos cruciales para el diseño y aplicación de estos materiales en la construcción [47].

En este estudio se plantea detectar la existencia de una posible correlación entre los resultados de los ensayos de compresión realizados con HAC-CPV y los obtenidos con sus correspondientes MEHs [18,48]. La transición de pruebas con MEH a escala de laboratorio a pruebas piloto de HAC-CPV implica escalar las formulaciones optimizadas mientras se mantienen las propiedades reológicas y mecánicas deseadas. Este proceso se beneficia de los datos reológicos y mecánicos detallados obtenidos de las pruebas con MEH, que pueden predecir el comportamiento de las mezclas de HAC-CPV [49]. Se entiende que este enfoque no solo mejorará la calidad y el rendimiento del HAC-CPV, sino que también ofrecerá beneficios prácticos y económicos significativos, contribuyendo a prácticas de construcción más sostenibles y rentables.

Las propiedades reológicas y mecánicas medidas en las pruebas con MEH se pueden utilizar para desarrollar modelos predictivos del comportamiento del HAC-CPV. Estos modelos ayudarán a entender cómo los cambios en las proporciones de mezcla o la adición de diversos aditivos afectarán a la mezcla del HAC-CPV [50]. Una vez que el diseño

de mezcla óptimo se establece a través de pruebas con MEH, se pueden realizar pruebas piloto con HAC-CPV para validar las predicciones. Este paso asegura que las propiedades reológicas y mecánicas observadas en pruebas a pequeña escala sean alcanzables en lotes más grandes, confirmando el rendimiento de la mezcla en aplicaciones en el mundo real [51].

Los ensayos de reología en MEH proporcionan información valiosa sobre la viscosidad plástica y el límite de fluencia, parámetros que influyen en la trabajabilidad del HAC-CPV. Estos parámetros reológicos tienen una correlación directa con las propiedades de compresión del HAC-CPV endurecido, ya que una buena trabajabilidad en estado fresco contribuye a una mejor compactación y densidad del HAC-CPV y, por lo tanto, a una mayor resistencia en estado endurecido [52]. Así, las mezclas con propiedades reológicas bien optimizadas tienden a exhibir un mejor rendimiento mecánico al endurecerse [24].

En entornos agresivos donde la durabilidad del HAC-CPV será un factor crítico, un comportamiento reológico adecuado asegura una distribución uniforme de los agregados y la pasta de cemento, llevando a una menor porosidad y una mejor durabilidad. La recuperación tixotrópica y las propiedades viscoelásticas del HAC-CPV ayudarán a mitigar las fisuras en edad temprana manteniendo la cohesión y reduciendo la contracción durante el proceso de fraguado [53]. Esto resulta en una estructura de hormigón más robusta, resistente a las fisuras y con una mayor capacidad de absorción de energía, lo cual es vital para la integridad estructural durante eventos sísmicos [54].

## 1.6 OBJETIVO.

El objetivo de esta investigación es obtener HAC-CPVs que sean válidos para ser utilizados en actividades de construcción y edificación en zonas sísmicas. Con tal fin, se utilizarán áridos y cementos volcánicos comercialmente distribuidos en Ecuador. Se hará uso del método del MEH y se estudiará la posible correlación entre las respuestas en los estados fresco y endurecido.

## 1.7 REFERENCIAS.

- [1] I. González Taboada, B. González Fonteboa, F. Martínez Abella, G. Rojo López, Influencia de las variaciones en los materiales sobre la reología de hormigones autocompactantes reciclados, (2018) 65–74.
- [2] D. Jiao, C. Shi, Q. Yuan, X. An, Y. Liu, H. Li, Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review, *Cem. Concr. Compos.* 83 (2017) 146–159.
- [3] A. Kefelegn, A. Gebre, Performance of self-compacting concrete used in congested reinforcement structural element, *Eng. Struct.* 214 (2020) 110–665.
- [4] M. Moravvej, M. Rashidi, Structural performance of self-compacting concrete, Woodhead Publishing, 2020.
- [5] N. Lemarchand, J.R. Grasso, Interactions between earthquakes and volcano activity, *Geophys. Res. Lett.* 34 (2007) 24–303.
- [6] M.J. Jiménez, M. García-Fernández, J. Romero, 1989-1995 Earthquake sequences in the Galeras volcano region, SW Colombia, and possible volcano–earthquake interactions, *Tectonophysics* 463 (2009) 47–59.
- [7] M.D. Higgins, The Cascadia megathrust earthquake of 1700 may have rejuvenated an isolated basalt volcano in western Canada: Age and petrographic evidence, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 179 (2009) 149–156.
- [8] H. Aoyama, S. Onizawa, T. Kobayashi, T. Tameguri, T. Hashimoto, H. Oshima, H.Y. Mori, Inter-eruptive volcanism at Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 187 (2009) 203–217.
- [9] S. De la Cruz-Reyna, M. Tárraga, R. Ortiz, A. Martínez-Bringas, Tectonic earthquakes triggering volcanic seismicity and eruptions. Case studies at

- Tungurahua and Popocatépetl volcanoes, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 193 (2010) 37–48.
- [10] J.H. Johnson, S. Prejean, M.K. Savage, J. Townend, Anisotropy, repeating earthquakes, and seismicity associated with the 2008 eruption of Okmok volcano, Alaska, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 115 (2010) B00B04.
- [11] N. Feuillet, F. Beauducel, P. Tapponnier, Tectonic context of moderate to large historical earthquakes in the Lesser Antilles and mechanical coupling with volcanoes, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 116 (2011) B10308.
- [12] F.L. Bonali, A. Tibaldi, C. Corazzato, D.R. Tormey, L.E. Lara, Quantifying the effect of large earthquakes in promoting eruptions due to stress changes on magma pathway: The Chile case, *Tectonophysics* 583 (2013) 54–67.
- [13] A.D. Jolly, J. Neuberg, P. Jousset, S. Sherburn, A new source process for evolving repetitious earthquakes at Ngauruhoe volcano, New Zealand, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 215–216 (2012) 26–39.
- [14] A. Játiva, E. Ruales, M. Etxeberria, Volcanic Ash as a Sustainable Binder Material: An Extensive Review, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 1302.
- [15] K. Celik, M.D. Jackson, M. Mancio, C. Meral, A.H. Emwas, P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete, *Cem. Concr. Compos.* 45 (2014) 136–147.
- [16] K. Celik, R. Hay, C.W. Hargis, J. Moon, Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement, *Constr. Build. Mater.* 197 (2019) 803–812.

- [17] K. Kupwade-Patil, C. De Wolf, S. Chin, J. Ochsendorf, A.E. Hajiah, A. Al-Mumin, O. Büyükköztürk, Impact of Embodied Energy on materials/buildings with partial replacement of ordinary Portland Cement (OPC) by natural Pozzolanic Volcanic Ash, *J. Clean. Prod.* 177 (2018) 547–554.
- [18] K.M. Anwar Hossain, Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 283–291.
- [19] A. Schwartzentruber, C. Catherine, Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - a new tool to design concrete containing admixture, *Mater. Struct. Constr.* 33 (2000) 475–482.
- [20] J. Li, D. Tan, X. Zhang, C. Wan, G. Xue, Mixture design method of self-compacting lightweight aggregate concrete based on rheological property and strength of mortar, *J. Build. Eng.* 43 (2021).
- [21] M. Kohandelnia, M. Hosseinpoor, A. Yahia, R. Belarbi, Multiscale investigation of self-consolidating earthen materials using a novel concrete-equivalent mortar approach, *Constr. Build. Mater.* 370 (2023).
- [22] E.P. Koehler, D.W. Fowler, Comparison of Workability Test Methods for Self-Consolidating Concrete, *J. ASTM Int.* 7 (2010) 1–19.
- [23] N. Roussel, C. Stefani, R. Leroy, From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 817–822.
- [24] N. Roussel, Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results, *Mater. Struct.* 39 (2006) 501–509.

- [25] D. Feys, R. Verhoeven, G. De Schutter, Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self-compacting concrete, *Appl. Rheol.* 17 (2007) 56244-1.
- [26] D.K. Ashish, S.K. Verma, An overview on mixture design of self-compacting concrete, *Struct. Concr.* 20 (2019) 371-395.
- [27] L. Arnaud, M. Dierkens, Setting and hardening of cement based materials: Which differences between mortars and concretes?, in: Christian U. Grosse (Ed.), *Adv. Constr. Mater.* 2007, 2007: pp. 441-449.
- [28] T. Li, Y. Zhou, J. Zhu, J. Liu, Effect of fine aggregate gradation on the rheology of mortar, *Constr. Build. Mater.* 332 (2022) 127-362.
- [29] W. Yan, W. Cui, L. Qi, Effect of aggregate gradation and mortar rheology on static segregation of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 259 (2020) 119-816.
- [30] M. Westerholm, B. Lagerblad, J. Silfwerbrand, E. Forssberg, Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 274-282.
- [31] M. Sahraoui, T. Bouziani, Effects of fine aggregates types and contents on rheological and fresh properties of SCC, *J. Build. Eng.* 26 (2019) 100-890.
- [32] B. Yahyaei, G. Asadollahfardi, A.M. Salehi, N. Esmaeili, Study of shear-thickening and shear-thinning behavior in rheology of self-compacting concrete with micro-nano bubble, *Struct. Concr.* 23 (2022) 1920-1932.
- [33] A.A.A. Hassan, M.K. Ismail, J. Mayo, Shear Behavior of SCC Beams with Different Coarse-to-Fine Aggregate Ratios and Coarse Aggregate Types, *J. Mater. Civ. Eng.* 27

(2015) 04015022.

- [34] D. Feys, R. Verhoeven, G. De Schutter, Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?, *Cem. Concr. Res.* 39 (2009) 510–523.
- [35] M. Gesoglu, E. Güneyisi, T. Ozturan, H.O. Oz, D.S. Asaad, Shear thickening intensity of self-compacting concretes containing rounded lightweight aggregates, *Constr. Build. Mater.* 79 (2015) 40–47.
- [36] H. Rasekh, A. Joshaghani, S. Jahandari, F. Aslani, M. Ghodrat, Rheology and workability of SCC, in: *Self-Compacting Concr. Mater. Prop. Appl.*, Elsevier, 2020: pp. 31–63.
- [37] D.K. Panesar, B. Shindman, Elastic properties of self consolidating concrete, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 3334–3344.
- [38] D. Bonen, S.P. Shah, Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete, *Prog. Struct. Eng. Mater.* 7 (2005) 14–26.
- [39] H.A. Barnes, Thixotropy—a review, *J. Nonnewton. Fluid Mech.* 70 (1997) 1–33.
- [40] A. Singh, R.B. Singh, B. Singh, Thixotropic evaluation of a highly-workable and a flowable concrete made with Rice Husk Ash, *J. Build. Eng.* 67 (2023) 105–990.
- [41] N. Roussel, F. Cussigh, Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 624–632.
- [42] L. Shen, H.B. Jovein, S. Shen, M. Li, Effects of Aggregate Properties and Concrete Rheology on Stability Robustness of Self-Consolidating Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (2014).
- [43] F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, L.M. Ordóñez-Belloc, Rheology of concrete: A study case based upon the use of the concrete equivalent mortar,

- Mater. Struct. Constr. 46 (2013) 587–605.
- [44] N.M. Páez-Flor, F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, Effect of various plasticisers on viscous flow properties of natural pozzolanic cement pastes, Adv. Cem. Res. 32 (2020) 20–29.
- [45] F. De Larrard, T. Sedran, Mixture-proportioning of high-performance concrete, Cem. Concr. Res. 32 (2002) 1699–1704.
- [46] Ferraris C Winpigerl J, Measuring Rheological Properties of Cement-based Materials, Springer Nat. Switz. 39 (2000).
- [47] K. Kovler, N. Roussel, Properties of fresh and hardened concrete, Cem. Concr. Res. 41 (2011) 775–792.
- [48] H.M. Hamada, F. Abed, S. Beddu, A.M. Humada, A. Majdi, Effect of Volcanic Ash and Natural Pozzolana on mechanical properties of sustainable cement concrete: A comprehensive review, Case Stud. Constr. Mater. 19 (2023).
- [49] M. Vieira, L. Ferrara, M. Sonebi, C. Shi, Specialty SCC, in: K. Khayat, G. De Schutter (Eds.), Mech. Prop. Self-Compacting Concr. RILEM State-of-the-Art Reports, Springer, Cham, 2014: pp. 221–254.
- [50] N. Cangussu, A.M. Matos, P. Milheiro-Oliveira, L. Maia, Modelling and Predicting Self-Compacting High Early Age Strength Mortars Properties: Comparison of Response Models from Full, Fractioned and Small Central Composite Designs, Appl. Sci. 13 (2023) 8413.
- [51] M. Urban, The new conception of self-compacting concrete composition design: theoretical background, evaluation, presentation of procedure and examples of usage, Mater. Struct. 48 (2015) 1321–1341.

- [52] J. Yammine, M. Chaouche, M. Guerinet, M. Moranville, N. Roussel, From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 890–896.
- [53] J.T. Kolawole, R. Combrinck, W.P. Boshoff, Rheo-viscoelastic behaviour of fresh cement-based materials: Cement paste, mortar and concrete, *Constr. Build. Mater.* 248 (2020) 118–667.
- [54] K. Hrabová, P. Lehner, P. Ghosh, P. Konečný, B. Teplý, Sustainability Levels in Comparison with Mechanical Properties and Durability of Pumice High-Performance Concrete, *Appl. Sci.* 11 (2021) 4964.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 INTRODUCCIÓN.

En este trabajo se estudian los modelos teóricos que describen el comportamiento puramente viscoso de los fluidos, considerando que la trabajabilidad de una mezcla cementosa está relacionada con su límite de fluencia y su viscosidad plástica.

Cuando hablamos de trabajabilidad de un material cementoso en general, y de un material autocompactante en particular, hemos de considerar tres características fundamentales [1]. En primer lugar, su *capacidad de llenado*, es decir, la capacidad del HAC para fluir libremente bajo la acción de su propio peso, sin sufrir las restricciones impuestas por el encofrado o la armadura. En segundo lugar, su *capacidad de paso*, que hace referencia a la habilidad que posee el HAC para pasar fácilmente entre obstáculos y espacios angostos del encofrado. Finalmente, su *estabilidad*, que es la propiedad del HAC que le permite mantenerse como mezcla homogénea. A su vez, la estabilidad de un HAC puede ser de dos tipos, estabilidad dinámica y estabilidad estática. La primera indica la resistencia que ofrecen los materiales que componen el hormigón a separarse de la mezcla durante el proceso de llenado del encofrado; la estabilidad estática representa la resistencia del hormigón a la separación de las fases sólida y líquida, conocida como segregación o “sangrado”. En resumen, un HAC que presente buena trabajabilidad ha de requerir de una mínima fuerza para empezar a fluir (bajo límite de fluencia) y de una adecuada cohesión entre sus componentes que le permita resistir su tendencia a segregar el exceso de sangrado (elevada viscosidad plástica).

La forma práctica de satisfacer los requerimientos que acabamos de describir y conseguir así un buen control reológico del HAC, pasa por la elaboración de diseños de hormigones que cumplan con una serie de requisitos [1]. En primer lugar, el volumen ocupado por los agregados en el hormigón ha de ser bajo, con una gradación suave y con agregados gruesos de tamaño moderado, siendo mayor el porcentaje de agregados finos

en comparación con su presencia relativa en hormigones convencionales. En segundo lugar, han de incluirse componentes minerales tales como arcilla calcinada, escorias de horno, caliza, humo de sílice o cenizas, como será el caso en este estudio. En tercer lugar, la cantidad de material cementante (puzolánico) ha de ser mayor de lo habitual (por ejemplo,  $445 \text{ kg/m}^3$ ). En cuarto lugar, han de incluirse aditivos químicos conocidos como superplastificantes, que tienen la capacidad de reducir la cantidad de agua en la mezcla al tiempo que, aunque aparentemente contradictorio, mejoran la facilidad para fluir del hormigón. En quinto y último lugar, la relación agua/cemento deberá reducirse adecuadamente. En términos generales, podemos afirmar que los tres primeros requisitos tienen un impacto mayor en el valor de la viscosidad plástica, mientras que los dos últimos afectan más al valor del límite de fluencia.

## 2.2 REOGRAMAS Y MODELOS REOLÓGICOS.

La respuesta de un hormigón frente a sollicitaciones mecánicas no encaja en el modelo de Fluido Newtoniano, que establece una proporcionalidad directa (linealidad) entre el tensor de esfuerzos viscosos ( $\tilde{\tau}$ ) y el tensor velocidad de deformación ( $\tilde{\gamma}$ ), es decir:

$$\tilde{\tau} = \eta \tilde{\gamma} \quad (2.1)$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad dinámica del correspondiente fluido newtoniano, que es constante para una temperatura y presión dadas. El estudio del comportamiento de flujo de hormigones pertenece a una disciplina relativamente nueva (nació en 1929) que se conoce como Reología y que se dedica específicamente a materiales que muestran comportamientos no-newtonianos, viscosos no lineales y viscoelásticos. En ambos casos incluyendo una componente viscosa, es decir, la Reología se ocupa fundamentalmente del estudio de líquidos no lineales y de líquidos viscoelásticos [2]. En la Tabla 2.1 se muestra un esquema que presenta el ámbito de estudio de la Reología.

Si la viscosidad disminuye cuando la velocidad de deformación o el esfuerzo ejercidos sobre él aumenta, se hablará de adelgazamiento por cizalla (shear thinning). Cuando la viscosidad aumenta al aumentar la velocidad de deformación o el esfuerzo

hablaremos de espesamiento por cizalla (shear-thickening). En ambos casos se observará flujo sin importar lo pequeño que sea el esfuerzo aplicado al material, de forma análoga a lo que ocurre con los materiales Newtonianos. Sin embargo, existen sistemas en los que es necesario superar cierto valor umbral de esfuerzo, denominado límite de fluencia (yield stress), para poder llegar a observar flujo en ellos. Este último comportamiento no-Newtoniano independiente del tiempo recibe el nombre de viscoplasticidad. Cuando el esfuerzo aplicado es inferior al valor del límite de fluencia, el sistema muestra comportamiento puramente elástico. Cuando el límite de fluencia es superado, el material muestra comportamiento puramente viscoso. El límite de fluencia marca, por lo tanto, la frontera entre el comportamiento elástico y el comportamiento viscoso del mismo material.

**Tabla 2.1.** Clasificación de los comportamientos no-Newtonianos [2].

| Flujos puramente viscosos |  | Flujos viscoelásticos |
|---------------------------|--|-----------------------|
| Dependientes del tiempo   | Independientes del tiempo                      | Viscoelasticidad      |
| Tixotropía                | Adelgazamiento por cizalla<br>(Shear-thinning) |                       |
|                           | Espesamiento por cizalla<br>(Shear-thickening) |                       |
|                           | Viscoplasticidad                               |                       |

En los tres comportamientos no-Newtonianos puramente viscosos considerados (adelgazamiento por cizalla, espesamiento por cizalla y viscoplástico) no interviene el factor tiempo, es decir, se trata de comportamientos resultantes de la dependencia del valor estacionario de la viscosidad con la velocidad de deformación o el esfuerzo. Lo que distingue a estos comportamientos no-Newtonianos del comportamiento Newtoniano es la no-linealidad de la relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación de aquéllos, frente a la linealidad de éste. Es decir, una ecuación constitutiva para los fluidos puramente viscosos independientes del tiempo puede ser que se conoce como ecuación constitutiva del Fluido Newtoniano Generalizado.

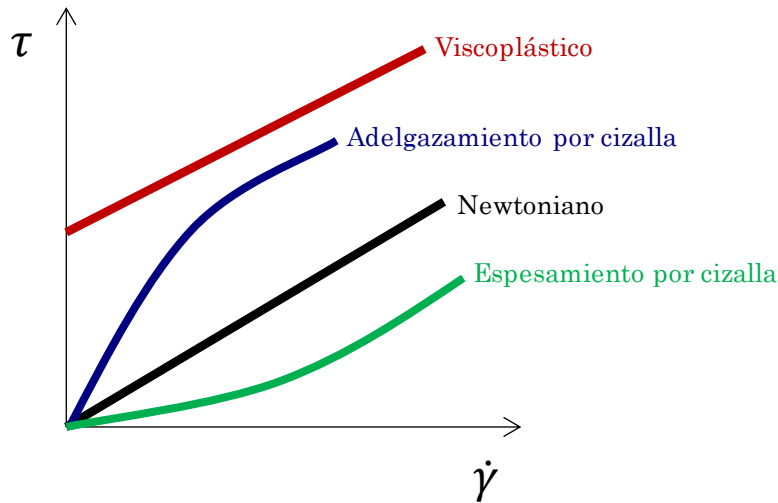
$$\tilde{\tau} = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \tag{2.2}$$



Cuando hacemos uso de un reómetro rotacional, la acción mecánica sobre el fluido consistirá en la aplicación de una deformación por cizalla. Es decir, de la ecuación (2.1), únicamente la componente de cizalla será relevante, pudiendo escribir:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \tag{2.3}$$

La ecuación (2.3) es una ecuación escalar. En la Figura 2.1 se muestran esquemáticamente los reogramas correspondientes a los tres comportamientos no-newtonianos puramente viscosos descritos. Se ha incluido el comportamiento newtoniano por comparación.



**Figura 2.1.** Reogramas (curva de flujo estacionario) correspondientes al comportamiento newtoniano y a los tres comportamientos no-newtonianos puramente viscosos independientes del tiempo.

Dado que los materiales cementosos poseen una naturaleza viscoplástica, nos centraremos únicamente en la descripción de modelos reológicos para el comportamiento viscoplástico. Para materiales viscoplásticos, la forma general de la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla es,

$$\tau = \tau_y + f(\dot{\gamma}) \tag{2.4}$$

Siendo  $\dot{\gamma} = 0$  cuando  $\tau < \tau_y$ , donde  $\tau_y \geq 0$  es el límite de fluencia. La forma de la función  $f(\dot{\gamma})$  es muy variada, dependiendo de una larga lista de propuestas que han ido surgiendo fruto de los estudios realizados con materiales viscoplásticos.

La forma más simple la proporciona el Modelo de Bingham:

$$f(\dot{\gamma}) = \eta_p \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Donde  $\eta_p > 0$  es la viscosidad plástica. Este modelo, aunque ampliamente utilizado, se limita a considerar aquellos casos en los que existe una relación lineal entre el esfuerzo y la velocidad de cizalla. Por otra parte, no es capaz de ajustar el comportamiento de espesamiento por cizalla de los materiales cementosos y, cuando se extrapolan regresiones con este modelo, aparecen límites de fluencia negativos, lo cual no tiene sentido físico.

Cuando se trata de modelar el comportamiento viscoplástico no-lineal, se han propuesto diferentes ecuaciones [3-6]. Una expresión de uso muy extendido que resuelve el problema de la no-linealidad del modelo de Bingham, se debe a Herschel y Bulkley. En este caso:

$$f(\dot{\gamma}) = K \dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

Donde el número adimensional  $n$  representa el índice de comportamiento de flujo y  $K$  representa la consistencia del material ( $K > 0$ ). Nótese que, cuando  $n = 1$  resulta  $K = \eta_p$ , y el modelo de Herschel-Bulkley se reduce al de Bingham. Aunque el modelo de Herschel-Bulkley da cuenta de la respuesta viscoelástica no-lineal, sobreestima el valor del límite de fluencia cuando el material muestra comportamiento de espesamiento por cizalla ( $n > 1$ ) porque la pendiente de la curva de flujo tiende a cero a tasas de corte muy bajas,

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \left( \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} \right) = Kn \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} (\dot{\gamma}^{n-1}) = 0 \quad (2.7)$$

subestima el valor del límite de fluencia cuando el material muestra comportamiento de adelgazamiento por cizalla ( $n < 1$ ), porque la pendiente de la curva de flujo tiende a infinito a tasas de corte muy bajas,

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \left( \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} \right) = Kn \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} (\dot{\gamma}^{n-1}) = \infty \quad (2.8)$$

y no es posible comparar diferentes valores del parámetro  $K$  de diferentes materiales debido a sus “extrañas” unidades ( $Pa \cdot s^n$ ) ya que, en general, el índice de flujo tendrá un valor distinto para diferentes materiales. Sin embargo, este último inconveniente puede ser parcialmente resuelto considerando que en una representación  $\log \tau$  vs.  $\log \dot{\gamma}$  se tendrá:

$$\log(\tau - \tau_y) = \log K + n \log \dot{\gamma} \quad (2.9)$$

Como  $\log 1 = 0$ , el término  $\log(\tau - \tau_y) = \log K$  cuando  $\tau_1 = \tau(\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1})$ . En consecuencia, es posible la comparación entre diferentes materiales basada en los valores de  $\log K$  [7].

En cualquier caso, es importante destacar que ha sido establecido que una buena ecuación viscoplástica debería cumplir siempre con las tres condiciones siguientes [2]: a) el límite de fluencia debería ser un valor siempre positivo por razones físicas evidentes, b) la ecuación debe contener un término lineal positivo que acompañe a la velocidad de cizalla para evitar pendientes cero o negativas a bajas velocidades de cizalla, y c) todos los parámetros del modelo deben tener dimensiones adecuadas que permitan la comparación e interpretación física de los resultados. Pues bien, resulta que el modelo más simple que cumple con estas tres condiciones básicas es la extensión a segundo orden del modelo lineal de Bingham, conocido como modelo de Bingham modificado, es decir:

$$f(\dot{\gamma}) = \eta_p \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2 \quad (2.10)$$

Donde  $c$  es un coeficiente de segundo orden que determina si el comportamiento es adelgazamiento por cizalla ( $c < 0$ ) o espesamiento por cizalla ( $c > 0$ ). Los parámetros del modelo de Bingham modificado cuentan con significado físico, al tiempo que práctico, lo que lo convierte en la mejor elección a la hora de describir el comportamiento de flujo de HACs [3-7]. Concretamente, el límite de fluencia ( $\tau_y$ ) indica el esfuerzo mínimo requerido para iniciar el flujo, garantizando que el HAC pueda superar la resistencia por fricción y comenzar a moverse [6,8]. Físicamente, el límite de fluencia está relacionado con la fuerza requerida para romper la red estructural resultante de la interacción de las partículas de cemento, así como también la adhesión y fricción entre las partículas de los agregados. Depende de la fracción volumétrica y del tamaño y rugosidad superficial de las

partículas. Se relaciona también con la estabilidad y la resistencia a la segregación de los materiales cementosos cuando están en estado de reposo [3,9,10]. La viscosidad plástica ( $\eta_p$ ) coincide con la variación del esfuerzo respecto de la velocidad de cizalla en el límite de muy bajas velocidades de cizalla ( $\eta_p = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}}$ ). Es un buen indicador de la compactibilidad, trabajabilidad y resistencia a la segregación del material cementoso. Viene afectada por fuerzas de interacción entre las partículas tales como coloidales, hidrodinámicas y viscosas. Depende de la fracción volumétrica y de la densidad del empaquetamiento de las partículas en la mezcla. Caracteriza la capacidad de bombeo y la resistencia a la segregación cuando el material está fluyendo [11]. También expresa la facilidad con la que el HAC puede continuar fluyendo una vez que el movimiento ha comenzado, determinando así su capacidad para llenar moldes y encapsular el reforzamiento.

El signo del coeficiente de segundo orden ( $c$ ) indica si el comportamiento es de espesamiento por cizalla ( $c < 0$ ) o de adelgazamiento por cizalla ( $c > 0$ ) a altas velocidades de cizalla, debido a las interacciones entre los agregados y la matriz de cemento [12],[13]. Su valor depende de la existencia de interacciones inclusiones-matriz y proporciona información sobre la complejidad del comportamiento viscoplástico [14–16].

Conseguir mezclas con valores adecuados de los parámetros descritos es crucial para diseñar HACs con las propiedades reológicas deseadas, asegurando así su estabilidad, ausencia de segregación y logrando un rendimiento óptimo en diversas aplicaciones [12,17].

## 2.3 TEORÍA MULTIESCALA

La teoría multiescala predice las propiedades mecánicas de mezclas heterogéneas a partir del conocimiento combinado de la matriz continua (o dispersante) y sus correspondientes inclusiones (o fase dispersa) [5,13,18,19]. Cuando la teoría multiescala se aplica al MEH, la pasta de cemento (cemento, agua y aditivos químicos) es la matriz y la arena es la fase dispersa. Por consiguiente, se espera que las propiedades reológicas de

las pastas de cemento, unidas a la forma, tamaño y fracción en volumen ocupada por la arena, puedan predecir las propiedades reológicas del MEH.

Extendiendo el propósito de la teoría multiescala al estudio de hormigones, el mortero es el dispersante y la grava es la fase dispersa. Este esquema es ciertamente atractivo cuando se piensa en una manera más sencilla de diseñar hormigones con diferentes aplicaciones prácticas. Sin embargo, estas buenas perspectivas deben considerarse con cautela.

Por ejemplo, los resultados parecen inapropiados [20] cuando la predicción del comportamiento reológico de un hormigón se basa en el comportamiento reológico de la pasta de cemento considerada como la fase dispersante y la arena y la grava consideradas como fases dispersas. Este resultado negativo se debe probablemente a que la reología de ambos materiales se basa en fundamentos diferentes.

Ciertamente, mientras que las fuerzas coloidales gobiernan principalmente la reología de las pastas de cemento, procesos más complejos relacionados con la fricción juegan un papel dominante en el comportamiento reológico de los hormigones [21,22]. Por lo tanto, en relación con la reología del hormigón, el interés en el estudio de la reología de la pasta de cemento debe reducirse básicamente a la compatibilidad y efecto de los aditivos. Es necesario incluir la fase inerte en el estudio para obtener un conocimiento más amplio, profundo y realista de la reología del hormigón. Según Schwartzentruber y Catherine [23], esto es posible utilizando la metodología del MEH, que ha sido utilizada en esta investigación.

## 2.4 REFERENCIAS.

- [1] Z. Zhang, J. Xiao, Q. Zhang, K. Han, J. Wang, X. Hu, A state-of-the-art review on the stability of self-consolidating concrete, *Constr. Build. Mater.* 268 (2021) 121099.
- [2] D. Feys, R. Verhoeven, G. De Schutter, Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self-compacting concrete, *Appl. Rheol.* 17 (2007) 56244-1.



- [3] N. Roussel, A theoretical frame to study stability of fresh concrete, *Mater. Struct.* 39 (2006) 81–91.
- [4] N. Roussel, Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results, *Mater. Struct.* 39 (2006) 501–509.
- [5] R.J. Flatt, D. Larosa, N. Roussel, Linking yield stress measurements: Spread test versus Viskomat, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 99–109.
- [6] D. Jiao, C. Shi, Q. Yuan, X. An, Y. Liu, H. Li, Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review, *Cem. Concr. Compos.* 83 (2017) 146–159.
- [7] L.F. Naranjo-Herrera, N.M. Páez-Flor, F.J. Rubio-Hernández, Using Natural Raw Materials and CEM Approach for the Design of Andean Volcanic Self-Compacting Concretes, *Processes* 10 (2022) 1820.
- [8] N. Roussel, C. Stefani, R. Leroy, From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 817–822.
- [9] A.W. Saak, H.M. Jennings, S.P. Shah, New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete, *Mater. J.* 98 (2001) 429–439.
- [10] K. Kovler, N. Roussel, Properties of fresh and hardened concrete, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 775–792.
- [11] L. Shen, H.B. Jovein, S. Shen, M. Li, Effects of Aggregate Properties and Concrete Rheology on Stability Robustness of Self-Consolidating Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (2014).
- [12] H.J.H. Brouwers, H.J. Radix, Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 2116–2136.
- [13] C.F. Ferraris, K.H. Obla, R. Hill, The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 245–255.
- [14] F. De Larrard, C.F. Ferraris, T. Sedran, Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material, *Mater. Struct.* 31 (1996) 494–498.
- [15] M. Cyr, C. Legrand, M. Mouret, Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not

- mineral additives, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 1477–1483.
- [16] D. Feys, R. Verhoeven, G. De Schutter, Fresh self compacting concrete, a shear thickening material, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 920–929.
- [17] D.K. Ashish, S.K. Verma, An overview on mixture design of self-compacting concrete, *Struct. Concr.* 20 (2019) 371–395.
- [18] F. De Larrard, T. Sedran, Mixture-proportioning of high-performance concrete, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1699–1704.
- [19] F. Mahaut, S. Mokéddem, X. Chateau, N. Roussel, G. Ovarlez, Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 1276–1285.
- [20] J. Newman, B.S. Choo, *Advanced concrete technology*, Elsevier Ltd, 2003.
- [21] J. Yammine, M. Chaouche, M. Guerinet, M. Moranville, N. Roussel, From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 890–896.
- [22] T. Lecompte, A. Perrot, V. Picandet, H. Bellegou, S. Amziane, Cement-based mixes: Shearing properties and pore pressure, *Cem. Concr. Res.* 42 (2012) 139–147.
- [23] A. Schwartzentruber, C. Catherine, Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - a new tool to design concrete containing admixture, *Mater. Struct.* 33 (2000) 475–482.

## CAPÍTULO III

### EQUIPOS, MATERIALES Y MÉTODOS DE MEDIDA

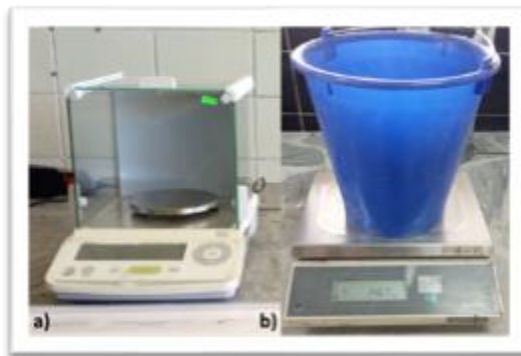
#### 3.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se describen los equipos y métodos de medida que han sido utilizados en el trabajo experimental. Se pondrá énfasis en la descripción del diseño de los experimentos obtenidos con las formulaciones de los morteros equivalentes al hormigón (MEH) y de los hormigones autocompactantes formulados con cemento Portland volcánico (HAC-CPV).

#### 3.2 EQUIPOS Y MÉTODOS DE MEDIDA.

Las masas de los materiales utilizados para el diseño de los MEHs se midieron con una balanza electrónica UW2200H (Shimadzu Corporation, Japón) capaz de medir hasta 2200 g con una sola pesada y con una sensibilidad de 0,01 g (Figura 3.1a).

Por otra parte, los materiales utilizados en la preparación de los HAC-CPVs se pesaron en una balanza BW32KH (Shimadzu Corporation, Japón) capaz de medir hasta 32000 g con una sensibilidad de 0,1 g (Figura 3.1b).



**Figura 3.1.** Balanzas a) UW2200H y b) BW32KH de (Shimadzu Corporation, Japón).

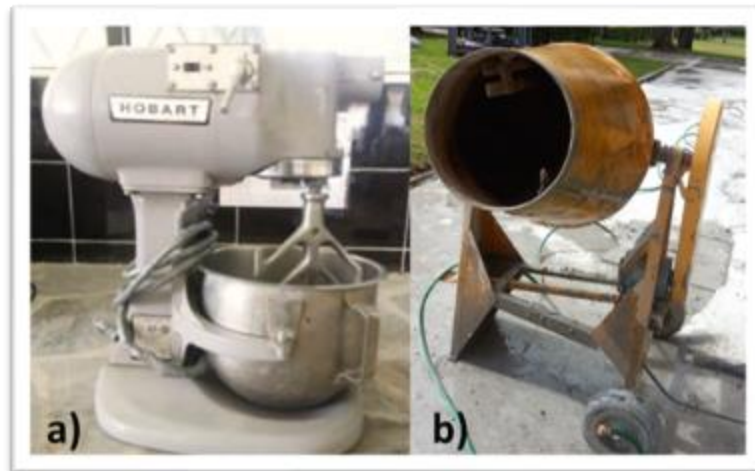
Con el uso de un soporte universal, una pinza de tres puntas tipo garra y un vaso de acero inoxidable de 200 *mL*, se mezclaron los materiales constituyentes de los MEHs con una batidora Hamilton Beach-64650 de seis velocidades y 290 *W* de potencia (Figura 3.2). Se empleó un estroboscopio Dawe-1214B para determinar las velocidades mínima y máxima de la batidora, resultando 370 y 540 *rpm*, respectivamente.



**Figura 3.2.** Batidora Hamilton Beach-64650 utilizada para preparar los MEHs.

Entre los utensilios de uso común en el laboratorio se emplearon espátulas gruesas de acero inoxidable, vasos de precipitación (20, 60 y 100 *mL*), agitadores magnéticos, una plancha magnética de agitación y pipetas plásticas desechables tipo Pasteur para la preparación de las disoluciones acuosas de aditivo.

Las formulaciones de los MEHs y los HACs utilizadas en los ensayos de mini-cono de Abrams y otros ensayos mecánicos, fueron preparadas con una mezcladora Hobart N50 de tres velocidades (136, 281 y 580 *rpm*) equipada con una pala plana “B” de aluminio y un recipiente de acero inoxidable de 5 *L* de capacidad (Figura 3.3a). Por otra parte, la preparación de los HACs a mayor escala necesitó de un mezclador de hormigón tipo trompo de 13 *HP*, 370 *L* de capacidad y 30 *rpm* (Figura 3.3b). También, se emplearon otros utensilios y materiales (Figura 3.4), todos ellos ubicados en el Laboratorio de



**Figura 3.3.** a) Mezcladora Hobart y b) Mezcladora Tipo Trompo.



**Figura 3.4.** Materiales para preparar HAC a gran escala: aditivo Sika, agregados finos, cemento, contenedor para las mezclas y báscula de pedestal.

Los análisis químicos y mineralógicos de los cementos se realizaron mediante difracción de rayos X de polvo en un difractómetro EMPYREAM (Malvern Panalytical, Inglaterra). Se empleó el software de análisis XRD High Score Plus, que lleva incorporado el difractómetro para la cuantificación e interpretación de los resultados. Se utilizaron las normas INEM 490 [1] e INEM 2380 [2] para estos análisis.

La densidad específica de los cementos se midió siguiendo la norma NTE INEN 156:2009 (ASTM C-128) [3]. Se empleó el frasco de Le Châtelier y gasolina comercial para este ensayo (Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Aparato de Blaine y matraces de Le Chatelier.

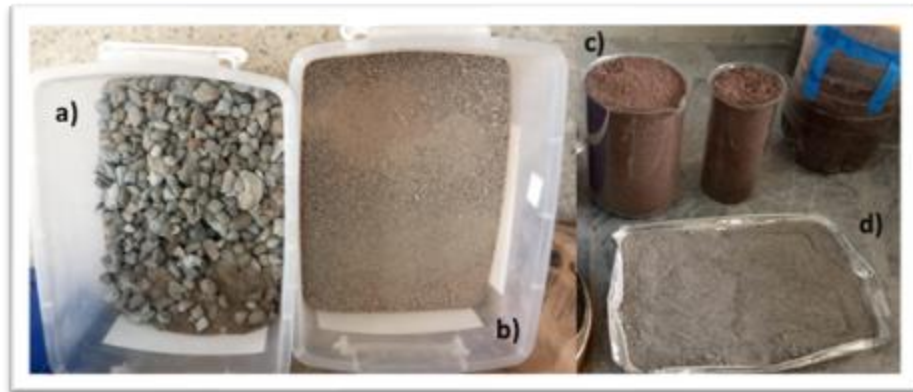
El área superficial específica de los cementos se obtuvo siguiendo las normas NTE INEN 196:2009 [4]. Se utilizó el aparato de permeabilidad al aire de Blaine (Figura 3.5). Se seleccionó el material de referencia estándar SMR 114q de cemento Portland con un área superficial específica de  $3.82 \pm 0,08 \text{ m}^2/\text{g}$  (Blaine),  $2.18 \pm 0.16 \text{ m}^2/\text{g}$  (Wagner) y  $1.32 \pm 0.03 \text{ m}^2/\text{g}$  (BET).

La forma y distribución de tamaños de las partículas de cemento se determinaron con un microscopio electrónico de barrido (SEM). Las micrografías obtenidas se procesaron con rutinas de caja de herramientas incluidas en el software MATLAB (MathWorks Inc., Natick, MA, EE. UU.).

Se empleó agua destilada comercial de la marca Disoloxi (Ecuador) para realizar las distintas mezclas de MEH a escala de laboratorio. Los MEHs y los HACs para las pruebas del cono de Abrams y los otros ensayos mecánicos se formularon con agua mineral.

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.

En la Figura 3.6 se observan las muestras crudas de a) Grava, b) Arena Beige (BS), c) Arena Roja Lavada (FS) y d) Piedra Azul Triturada (BP). Se empleó la norma NTE INEN 696:2011 para realizar el análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos [5]. Como lo estipula la norma, los agregados fueron secados en un horno a 110 °C por un lapso de 24 h antes de cada ensayo.



**Figura 3.6.** a) Agregado Grueso (Grava) y Agregados Finos b) BS, c) FS d) BP.

La granulometría de la grava se determinó empleando los siguientes tamices de malla cuadrada: N° 8 (2.36 mm), N° 4 (4.76 mm), 3/8" (9.51 mm), 1/2" (12.5 mm), 3/4" (19.0 mm), 1" (25.5 mm), 1 1/2" (38.1 mm), 2" (51.8 mm) y 3" (76.1 mm) (Figura 3.7a). Para la preparación de los HACs, se tomó una grava de referencia con los tamaños de grano retenidos por los tamices 2.36, 4.75 y 9.50 mm < 12.5 mm considerando las especificaciones de la norma europea EN12620 [6] (cuadro verde, Figura 3.7a). Por otra parte, la granulometría de los agregados finos se realizó empleando los tamices N° 200 (0.075 mm), N° 100 (0.149 mm), N° 50 (0.30 mm), N° 30 (0.60 mm), N° 16 (1.18 mm) y N° 8 (2.36 mm) (Figura 3.7b).



**Figura 3.7.** Tamices de malla cuadrada para los ensayos de granulometría.

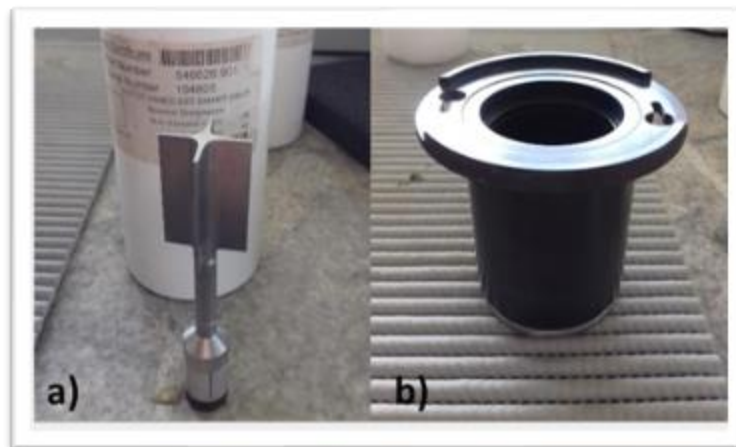
### 3.4 REÓMETRO.

El estudio de los MEHs en estado fresco se realizó con un reómetro “Discovery Hybrid Rheometer HR-2 (DHR2)” de la marca TA Instruments (EE.UU.) (Figura 3.8) dotado con una geometría de vanos (Figura 3.9a) y un vaso de cilindros concéntricos (Figura 3.9b).

El husillo de la geometría consta de 4 vanos, con un diámetro de rotor de  $28.0 \pm 0.1 \text{ mm}$  y altura de  $42.0 \pm 0.1 \text{ mm}$ . El vaso concéntrico de pared suave posee un diámetro interno de  $40.0 \pm 0.1 \text{ mm}$ . El vaso se colocó dentro de un sistema de control de temperatura Peltier ( $-15 \text{ °C}$  a  $150 \text{ °C}$ ) conectado a un recirculador de refrigerante. La temperatura de todos los ensayos se fijó en  $25 \text{ °C}$ .



**Figura 3.8.** Reómetro Discovery DHR2



**Figura 3.9.** Geometría para los ensayos reológicos: a) Vanos y b) Copa.

Se utilizó el software Tríos v5.1 que lleva incorporado el reómetro para tomar datos y realizar el análisis preliminar de los resultados reométricos correspondientes a los MEHs. Las Figuras 3.10 y 3.11 muestran ejemplos de pantallas de acceso al software Tríos v5.1 con la descripción de la muestra y los parámetros de la geometría de Vanos.

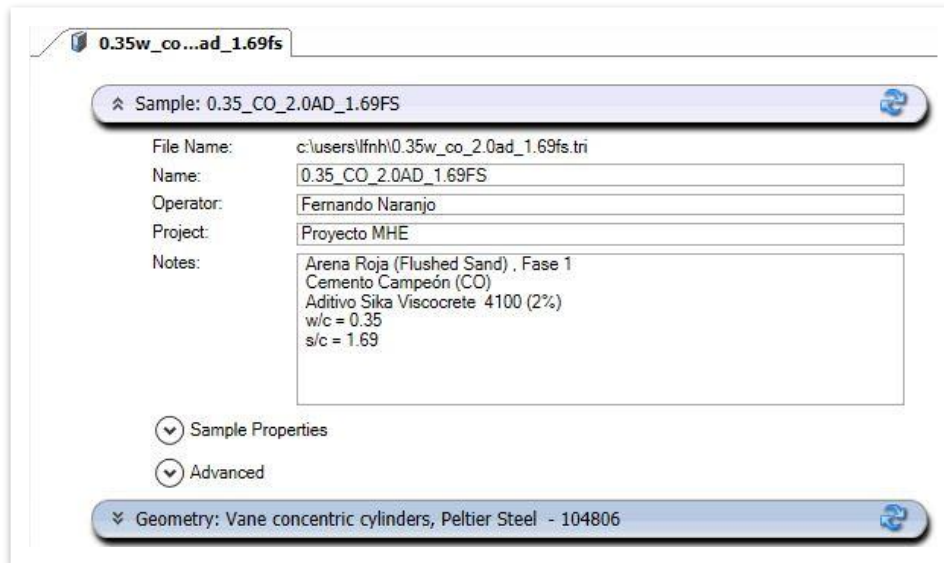


Figura 3.10. Pantalla para descripción de la muestra y procedimiento.

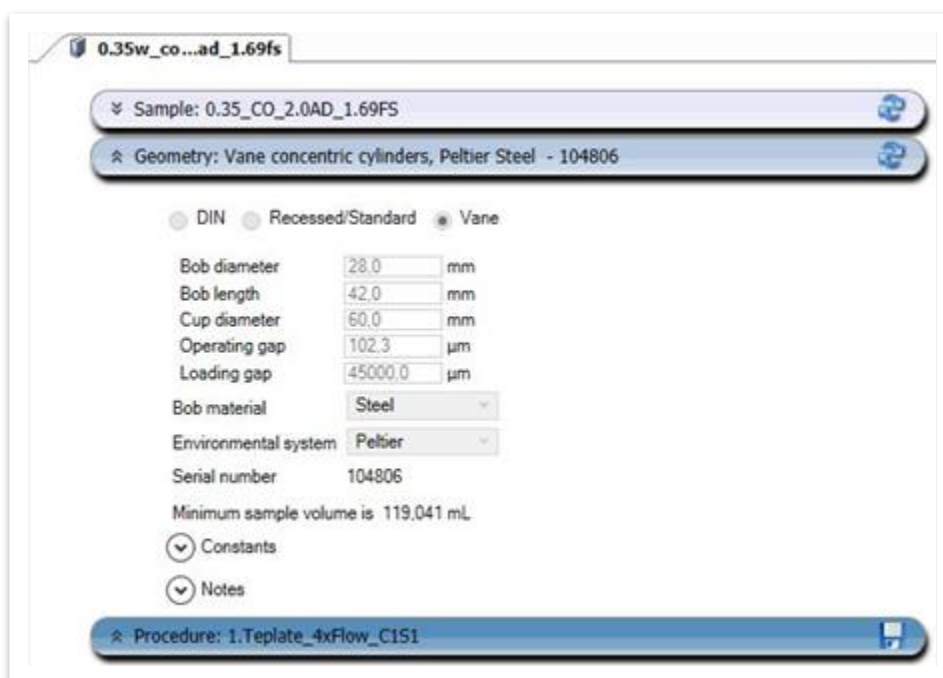


Figura 3.11. Descripción de los parámetros de la geometría de Vanos.

Las curvas de flujo en estado estacionario (CFE) mostradas en este estudio resultaron del promedio de, al menos, tres medidas. Las Figuras 3.12 y 3.13 muestran la Etapa 1 de medida dividida en: Paso 1, eliminación de tensiones arbitrariamente

desarrolladas en la muestra durante su colocación en el vaso cilíndrico con “pre-shear” o pre-cizallamiento (Flow Peak Hold), y Paso 2, que es el ensayo reométrico propiamente dicho y que consiste en un barrido de tasas de corte (Flow Sweep).

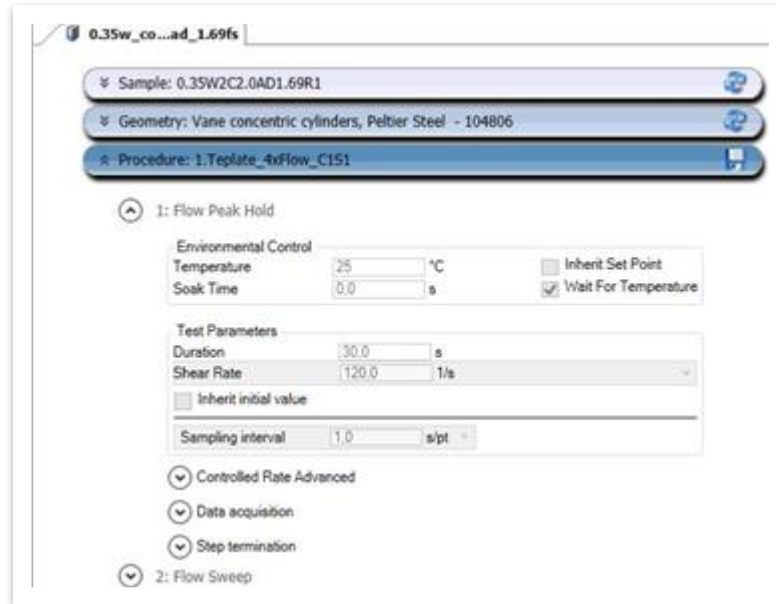


Figura 3.12. Descripción del Paso 1 de la Etapa 1 de medición (Flow Peak Hold).

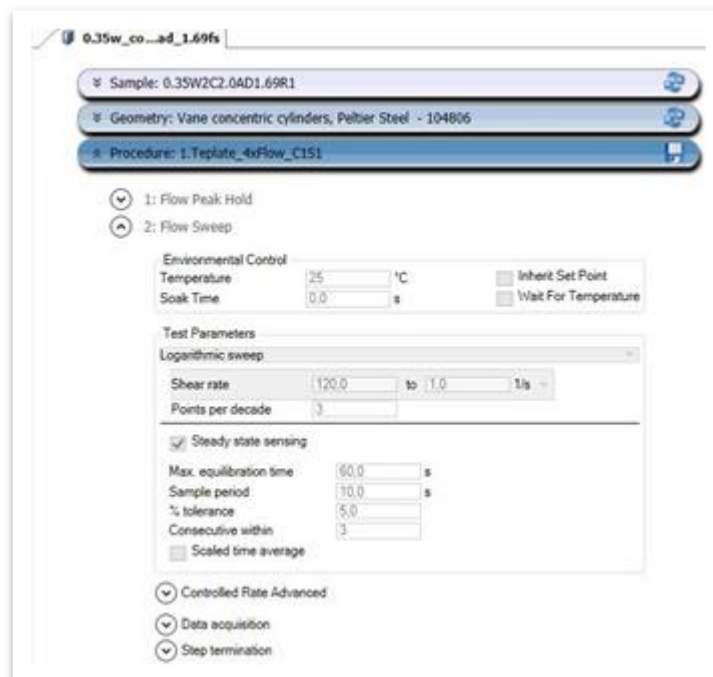


Figura 3.13. Descripción del Paso 2 de la Etapa 1 de medición (Flow Sweep).

Los pasos 1 y 2 (Tabla 3.1) se repiten alternadamente hasta completar 8 pasos (4 etapas). La primera curva de flujo (Etapa 1) se descarta para el análisis, ya que ésta se emplea solo para homogenizar la muestra dentro de la copa de medición del reómetro con la geometría de vanos para así asegurar la reproducibilidad de las subsiguientes mediciones. Con los datos obtenidos para las Etapas 2, 3 y 4, se realiza el correspondiente análisis estadístico utilizando para ello el software OriginPro 2018, con script del Modelo de Bingham Modificado (ecuación (5)).

**Tabla 3.1.** Plantilla modelo del procedimiento para realizar las medidas empleando la consola de control del software Tríos 5.1.

| Step /Procedure | Test Parameters  | Additional Parameters   |
|-----------------|--|---|
| Flow Peak Hold  | Duration: 30.0 s, Shear Rate: 120 s <sup>-1</sup>  | 25 °C, Wait For Temperature   |
|                 | Sampling Interval: 1.0 s/pt.   | Soak Time: 0.0 s.<br>Motor Mode: Auto.<br>End of Step: Zero Torque. |
| Flow Sweep      | Logaritmico Sweep. Shear Rate: 120 to 1 s <sup>-1</sup> . Points Per Decade: 3                   | 25 °C, Soak Time: 0.0 s.  |
|                 | Steady State Sensing. Max. Eq. Time 60 s, Sample Period 10 s, Tolerance 5%, Consecutive within 3 | Motor Mode: Auto  |

Se debe descartar la muestra inmediatamente después de realizadas las medidas. Cualquier interrupción o tiempo de espera adicional de la muestra dentro de la copa es motivo para descartar la medida. La copa debe ser limpiada inmediatamente para evitar acumulación de material en las paredes.

El reómetro y sus accesorios se encuentran ubicados en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE y las especificaciones técnicas se encuentran en el sitio web del fabricante [7].



### 3.5 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MATERIALES.

El diagrama mostrado en la Figura 3.14 presenta la composición general de la pasta de cemento (PC), el mortero equivalente al hormigón (MEH) y el hormigón autocompactante (HAC).

Las formulaciones se han realizado tomando como referencia trabajos previos realizados en el laboratorio por nuestro grupo de investigación [8–11] y según las recomendaciones preliminares del Colegio de Ingenieros del Ecuador [12].



**Figura 3.14.** Composición básica de pasta de cemento, mortero y hormigón.

A continuación, se describen las propiedades fisicoquímicas de cada uno de los componentes utilizados y se presentan resultados obtenidos en el laboratorio, incluyendo algunas características proporcionadas por el fabricante en cuanto a la aplicación y rango de operabilidad de los cementos y aditivos en el área de la construcción.

#### 3.5.1 Cementos.

Se seleccionaron tres cementos puzolánicos tipo Portland cuyos nombres comerciales son Selvalegre (SA), Campeón (CO) y Armaduro (AM). La Tabla 3.2 muestra las cantidades de ceniza volcánica (CV) que contiene cada uno de estos cementos, según

el fabricante. El resto de los datos fueron obtenidos en el departamento de Analítica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

**Tabla 3.2.** Mineralogía y composición química de los cementos puzolánicos.

| <b>Cemento</b>                 | <b>Selvalegre</b> | <b>Campeón</b> | <b>Armadero</b> |
|--------------------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| Componentes                    | (%)               | (%)            | (%)             |
| Ceniza Volcánica               | 42.60             | 46.40          | 30.60           |
| Cemento                        | 57.40             | 53.60          | 69.40           |
| Andesina                       | 36.00             | 37.00          | 23.00           |
| Turmalina                      | 5.00              | 6.40           | 4.60            |
| Cuarzo                         | 1.35              | 0.80           | 1.46            |
| Cordierita                     | 0.70              | 1.70           | 1.30            |
| C <sub>3</sub> S               | 42.70             | 40.20          | 51.80           |
| C <sub>2</sub> S               | 5.50              | 4.90           | 6.40            |
| C <sub>4</sub> AF              | 3.10              | 2.50           | 3.30            |
| C <sub>3</sub> A               | 4.40              | 3.80           | 5.20            |
| Yeso                           | 1.70              | 2.20           | 2.70            |
| SiO <sub>2</sub>               | 31.40             | 34.60          | 28.50           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.50              | 9.50           | 7.80            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.10              | 4.00           | 3.70            |
| CaO                            | 47.90             | 42.60          | 52.00           |
| MgO                            | 2.40              | 2.40           | 2.30            |
| SO <sub>3</sub>                | 2.00              | 2.10           | 2.30            |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.70              | 2.00           | 1.60            |
| K <sub>2</sub> O               | 0.50              | 0.60           | 0.50            |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.40              | 0.50           | 0.40            |

C<sub>3</sub>S (alita)= silicato tricálcico, 3CaO·SiO<sub>2</sub>; C<sub>2</sub>S (belita) = silicato dicálcico, 2CaO·SiO<sub>2</sub>; C<sub>4</sub>AF (felita) = ferritoaluminato tetracálcico, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·4CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; C<sub>3</sub>A (celita) = aluminato tricálcico, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaO.

La Tabla 3.3 muestra algunas propiedades físicas de interés determinadas para cada cemento empleando los procedimientos y dispositivos descritos anteriormente.

**Tabla 3.3.** Propiedades físicas de los cementos.

| Propiedades                           | Selvalegre | Campeón | Armadero |
|---------------------------------------|------------|---------|----------|
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> )         | 2.94       | 2.95    | 3.00     |
| Superficie Blaine (m <sup>2</sup> /g) | 2.60       | 2.40    | 2.20     |
| Tamaño de partícula (µm)              | 29 - 32    | 29 - 32 | 29 - 32  |

Los cementos seleccionados son de denominación puzolánica (CEM IV) según la norma UNE-EN 197-1:2011 [13]. Estos son comercializados y manufacturados por UNACEM Ecuador [14] utilizando como base el Clinker de Cemento Portland (CP) mezclado con ceniza volcánica (CV) proveniente de depósitos de puzolana natural del Ecuador.

En general, los tres cementos puzolánicos (CPV) seleccionados se emplean para construcciones de hormigón ya que desprenden menor calor de hidratación permitiendo manejar grandes masas de este material. A continuación, se resumen algunas características dadas por el fabricante en condiciones normales de trabajo.

**Selvalegre (Tipo IP).** Se pueden obtener resistencias a la compresión entre 35 y 50 MPa, creciendo progresivamente hasta los 28 días de fraguado, alcanzando hasta un 20% adicional a los 90 días. Cumple con las normas NTE INEN 490 y ASTM C595 [15].

**Campeón (tipo MS).** Se pueden obtener resistencias a la compresión de 35 MPa con un progresivo crecimiento de la resistencia aún después de los 28 días, alcanzando hasta un 20% más a los 90 días. Cumple con las normas NTE INEN 2380 y ASTM C1157 [16].

**Armadero (tipo IP).** Se pueden obtener resistencias a la compresión a los 28 días entre 35 y 50 MPa. Permite elaborar elementos prefabricados en menor tiempo por su alta resistencia inicial. Cumple con las normas NTE INEN 490 y ASTM C595 [15].

### 3.5.2 Aditivos.

En un estudio previamente reportado por nuestro grupo de investigación [17], se evaluaron individualmente siete aditivos comerciales para formular pastas de cementos con distintas relaciones agua/cemento como se muestra en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Datos técnicos para los aditivos comerciales plastificantes.

| <b>Aditivo</b>                | <b>Tecniflow<br/>605</b> | <b>SF-106</b> | <b>200-R</b> | <b>Viscocrete<br/>4100</b> | <b>Viscoflow<br/>50L</b> |
|-------------------------------|--------------------------|---------------|--------------|----------------------------|--------------------------|
| Marca                         | Aditec                   | Aditec        | Aditec       | Sika                       | Sika                     |
| Tipo                          | P, SP                    | SP            | SP           | HP                         | HP                       |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.10                     | 1.18          | 1.19         | 1.10                       | 1.11                     |
| pH                            | 7                        | 12 - 13       | 7 - 8        | ~4.3                       | 3 - 5                    |
| Dosificación                  | 0.19 a 0.9%              | 0.93 a 2%     | 0.93 a 2%    | 0.19 a 0.9%                | 0.4 a 2.3%               |

*Nota:* P = plastificante, SP = superplastificante, HP = hiperplastificante.

Luego de ajustar las concentraciones de los aditivos, se seleccionó el aditivo Viscocrete 4100 (Sika, Ecuador) como el óptimo en cuanto a la mejora de propiedades reológicas, la trabajabilidad en estado fresco, fraguado, más económico y propiedades mecánicas en estado endurecido de las mezclas con cemento Armaduro.

En la presente investigación, se considerará brevemente el estudio de la dosificación de aditivo para el amasado de los MEHs y HACs debido a que en éstos se incluye una nueva variable como lo es el contenido de agregados gruesos y/o finos, los cuales podrían o no interactuar químicamente con el aditivo y originar un comportamiento reológico y/o mecánico no deseado.

El aditivo Viscocrete 4100, según las especificaciones de la marca Sika, está formulado con policarboxilatos y cumple con las exigencias dadas por la norma ASTM C-494 [18], específicamente de tipo A y F, por lo que es un aditivo superfluidizante e hiperplastificante. La Tabla 3.5 muestra los datos técnicos de este aditivo.



**Tabla 3.5.** Datos técnicos del aditivo Viscocrete 4100 (Sika, Ecuador).

| Propiedad                     | Valor        |
|-------------------------------|--------------|
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.1 aprox.   |
| Consistencia                  | Líquido      |
| Color                         | Traslúcido   |
| Dosificación                  | 0.19% a 0.9% |

Según el fabricante, este aditivo está constituido por polímeros orgánicos y se puede aplicar tanto para hormigón premezclado como para prefabricados, añadiéndose como un reductor de agua de alto rango. Su uso otorga una excelente plasticidad al hormigón, manteniendo su trabajabilidad durante más de una hora.

### 3.5.3 Agregados.

Antes de proceder a formular los MEHs o los HACs, todos los agregados fueron secados en un horno a 110 °C por 24 horas para garantizar la evaporación total del agua. Los agregados son divididos en dos grupos, definidos como finos y gruesos.

Para el diseño de los MEHs se seleccionaron tres agregados finos (arenas) con partículas entre 0.075 mm y 2.36 mm de diámetro. Es importante señalar que estos valores se encuentran dentro de la clasificación general de agregados finos, pero se limitó su tamaño a 2.36 mm por razones inherentes al uso del reómetro según se detalla en la sección del diseño experimental.

Por otra parte, para el diseño de los HACs se seleccionó uno de los agregados finos de los MEHs y un único agregado grueso o grava (G) con diámetros de partículas mayores a 2.36 mm.

Los agregados finos son denominados arena beige (BS, Beige Sand), piedra azul triturada (BP, Blue Powder) y arena roja lavada (FS, Flushed Sand). Por otro lado, tal como se ha indicado, el agregado grueso corresponde a la grava (G).

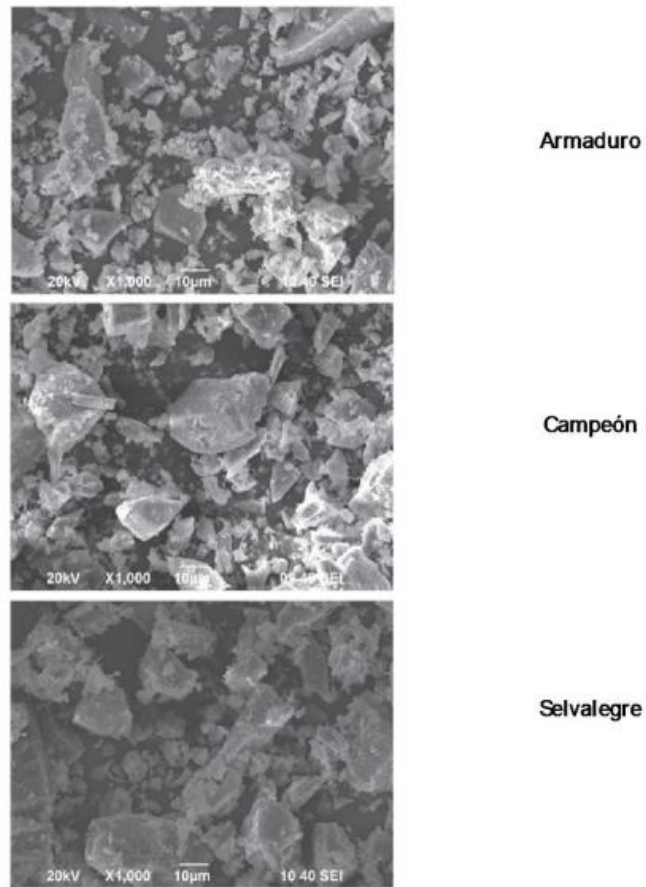
La arena beige (BS) proviene también de las canteras de Guayllabamba. Es una arena de origen natural de color aparente entre amarillo y beige. Esta arena es de uso común en Ecuador para construcciones de hormigón y para obras de asfaltado.

La piedra azul triturada (BP) proviene de las canteras de roca de la Mitad del Mundo (Quito, Ecuador). Es una roca o “piedra azul” de origen andesítico triturada mecánicamente (ripio). Este material es de uso común para el diseño de hormigones y usualmente se combina con grava.

La arena roja lavada (FS) proviene de las canteras de Pintag (Quito, Ecuador). Es una roca triturada y lavada (ripio) de color rojizo obtenida por trituración mecánica. Este tipo de roca es principalmente empleada en el sector asfáltico.

La grava empleada proviene de las canteras de Guayllabamba (Quito, Ecuador). Este ripio es obtenido por trituración mecánica, pero sin regulación del tamaño de grano, por lo que siempre debe gradarse y prepararse acorde con la aplicación a la que se destine. Posee un color aparente entre beige y gris, al lavar las partículas de fino en su superficie el color es gris.

Se realizó la microscopía electrónica de barrido de los agregados finos, la cual reveló una variedad similar de formas angulares de partículas de CPV (Figura 3.15). En otras palabras, no se observó diferencias significativas en la forma de las partículas de los tres CPV. Las micrografías SEM se procesaron con rutinas de caja de herramientas incluidas en el software Matlab (MathWorks Inc., Natick, MA, EE. UU.). Así mismo, se obtuvieron tamaños medios de partículas similares (29–32  $\mu\text{m}$ ) para las tres CPV. El índice de polidispersidad fue de 15.5 en todos los casos, y la superficie específica (método BET) solo mostró ligera variación de una a otra CPV (2.2-2.6  $\text{m}^2/\text{g}$ ). Por tanto, las cantidades de andesina y alita no tienen influencia sobre los parámetros geométricos de las partículas de cemento, aunque sí tienen cierta influencia sobre el comportamiento reológico de pastas de cemento [9] y morteros [19].



**Figura 3.15.** Microscopía electrónica de barrido realizada en los cementos.

En la Tabla 3.6 se resumen los resultados del análisis granulométrico de los agregados finos, adicional los datos de gravedad específica y porcentaje de adsorción de agua; y en la Tabla 3.7 se puede observar los resultados correspondientes a la grava y también los datos de gravedad específica.

**Tabla 3.6.** Resumen del análisis granulométrico de los agregados finos.

| N° Tamiz (mm)                     | BS                   |                     |   | BP                   |                     |   | FS                   |                     |   |
|-----------------------------------|----------------------|---------------------|---|----------------------|---------------------|---|----------------------|---------------------|---|
|                                   | Paso acumulativo (%) | S (m <sup>2</sup> ) | Superficie ponderada (m <sup>2</sup> /kg) | Paso acumulativo (%) | S (m <sup>2</sup> ) | Superficie ponderada (m <sup>2</sup> /kg) | Paso acumulativo (%) | S (m <sup>2</sup> ) | Superficie ponderada (m <sup>2</sup> /kg) |
| <0,075                            | 0.00                 | 65.17               | 4.039                                     | 0.00                 | 63.19               | 2.337                                     | 0.00                 | 64.86               | 2.209                                     |
| 0.075                             | 6.20                 | 21.82               | 1.013                                     | 3.70                 | 21.16               | 0.844                                     | 3.41                 | 21.72               | 1.823                                     |
| 0.149                             | 10.84                | 10.88               | 1.242                                     | 7.69                 | 10.56               | 2.793                                     | 11.80                | 10.83               | 2.133                                     |
| 0.3                               | 22.25                | 5.43                | 2.234                                     | 34.15                | 5.27                | 1.101                                     | 31.49                | 5.40                | 1.121                                     |
| 0.6                               | 63.42                | 2.74                | 0.459                                     | 55.06                | 2.66                | 0.454                                     | 52.23                | 2.73                | 0.477                                     |
| 1.18                              | 80.16                | 1.38                | 0.274                                     | 72.11                | 1.34                | 0.373                                     | 69.70                | 1.37                | 0.416                                     |
| 2.36                              | 100.00               | 0.77                | 0.000                                     | 100.00               | 0.75                | 0.000                                     | 100.00               | 0.76                | 0.000                                     |
|                                   |                      |                     | <b>9.261</b>                              |                      |                     | <b>7.902</b>                              |                      |                     | <b>8.179</b>                              |
| <b>Gravedad específica (Kg/L)</b> | 2.455                |                     |   | 2.532                |                     |   | 2.467                |                     |   |
| <b>Adsorción de agua (%)</b>      | 4.00                 |                     |   | 3.50                 |                     |   | 4.40                 |                     |   |

**Tabla 3.7.** Granulometría del agregado grueso.

| Grava                             |                      |                     |   |
|-----------------------------------|----------------------|---------------------|---|
| N° Tamiz (mm)                     | Paso acumulativo (%) | S (m <sup>2</sup> ) | Superficie ponderada (m <sup>2</sup> /Kg) |
| <2.36                             | 0.00                 | 2.097               | 0.079                                     |
| 2.36                              | 3.76                 | 0.695               | 0.043                                     |
| 4.76                              | 9.93                 | 0.347               | 0.115                                     |
| 9.51                              | 43.19                | 0.225               | 0.043                                     |
| 12.5                              | 62.49                | 0.157               | 0.039                                     |
| 19                                | 87.51                | 0.111               | 0.010                                     |
| 25.4                              | 96.92                | 0.079               | 0.002                                     |
| 38.1                              | 100.00               | 0.055               | 0.000                                     |
|                                   |                      |                     | <b>0.331</b>                              |
| <b>Gravedad específica (Kg/L)</b> | 2.455                |                     |   |

Los resultados del análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos se representan en las curvas de granulometría detalladas en la Figura 3.16. Es importante señalar que, a pesar de que el paso acumulado es similar para las tres arenas, la distribución del tamaño de las partículas es ligeramente diferente. Así mismo, se puede observar que, el tamaño medio de partícula más representativo que se obtuvo mediante



el procedimiento de tamiz siguió la secuencia FS (0.20 mm) < BP (0.22 mm) < BS (0.42 mm). Estos tres valores de tamaño de partícula se utilizaron para calcular la cantidad de arena en el MEH correspondiente. Se supusieron arenas mono dispersas utilizando este método, lo que claramente es una fuente.

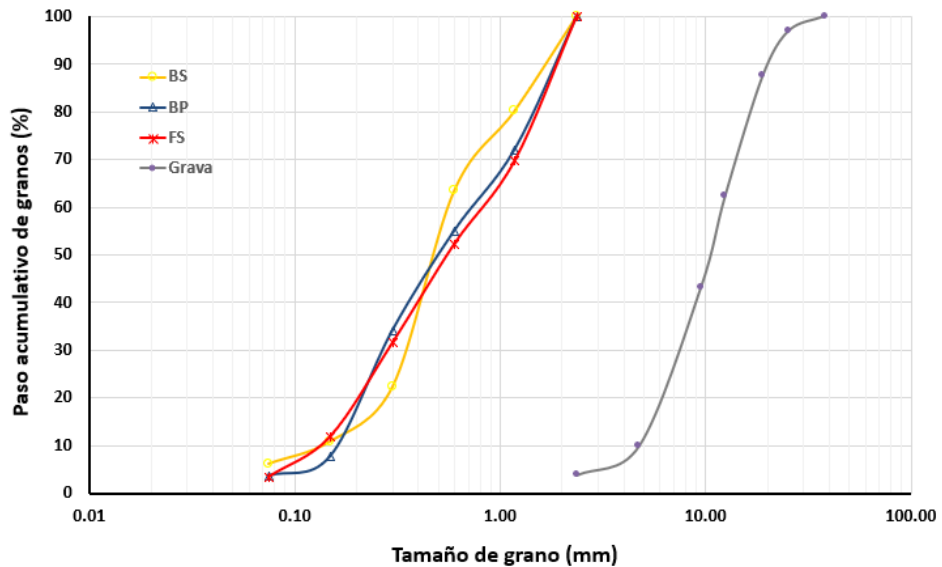


Figura 3.16. Paso acumulativo de las tres arenas y del agregado grueso.

Así mismo, para obtener la composición de un mortero, es obligatorio determinar previamente la demanda hídrica de la arena [20]. Se obtuvo la densidad y la demanda hídrica de las tres arenas siguiendo las normas NTE INEN 856 y ASTM C128, [21], [22]. Las densidades de las tres arenas fueron muy similares, concretamente,  $2.607 \text{ g/cm}^3$  (BS),  $2.674 \text{ g/cm}^3$  (BP) y  $2.640 \text{ g/cm}^3$  (FS). Los índices de adsorción de agua de las arenas naturales o trituradas fueron 3.5% (BP), 4.0% (BS) y 4.4% (FS). En resumen, solo el tamaño máximo del grano y su forma son parámetros que deben utilizarse eventualmente para distinguir el efecto de las tres arenas en el comportamiento reológico de los MEHs.

### 3.5.4 Descripción del ensayo de la curva de flujo estacionario.

En el diseño del protocolo para la experimentación reológica con materiales cementantes frescos se consideró la necesidad de minimizar la influencia en los resultados del proceso de hidratación del cemento. Además, se definió el estado mecánico

de referencia de la lechada cementante fresca para asegurar la repetibilidad de los resultados experimentales.

Tomando en cuenta lo anteriormente indicado, el intervalo de tiempo desde el primer contacto cemento/agua hasta el final del ensayo reológico debe ser menor que el período de inducción del cemento, que suele ser de alrededor de 30 min. Además, es importante mencionar que el estado de reposo favorece la hidratación del cemento. En consecuencia, es conveniente diseñar la curva de flujo estacionario (CFE), en un ensayo reológico que registre la respuesta de tensión constante del material a una serie de velocidades de corte distribuidas uniformemente, comenzando desde el valor de velocidad de corte más alto. Por lo tanto, la CFE correspondiente a cada muestra fue la gráfica del esfuerzo cortante constante versus el valor de la velocidad de corte distribuido uniformemente en una rampa decreciente de velocidades de corte que fue desde  $120 \text{ s}^{-1}$  hasta  $1 \text{ s}^{-1}$ , tal como se muestra en la Figura 3.17.

Adicional, se debe indicar que cada velocidad de corte se aplicó durante el tiempo necesario para registrar la respuesta del esfuerzo cortante constante. Solo cuando la variación relativa de la respuesta del esfuerzo a cada velocidad de corte fue menor al 5% durante 20 s se aseguró el logro de la condición constante. Se presentaron los resultados de los CFE como el valor promedio de tres mediciones tomadas con tres muestras diferentes de la misma lechada cementosa ( $3 \times 3 = 9$  mediciones en total por cada formulación cementosa).

Finalmente, y relacionado con el diseño del protocolo de la CFE, es importante indicar que pueden desarrollarse tensiones aleatorias en las muestras durante los procesos de mezcla y manipulación que tienen lugar en la preparación y posicionamiento de las muestras antes de los procedimientos de medición. Por lo tanto, se realizó una fase de pre-corte que consistió en la aplicación del esfuerzo cortante máximo ( $120 \text{ s}^{-1}$ ) durante 60 s antes de la prueba reológica para borrar efectos aleatorios indeseables.

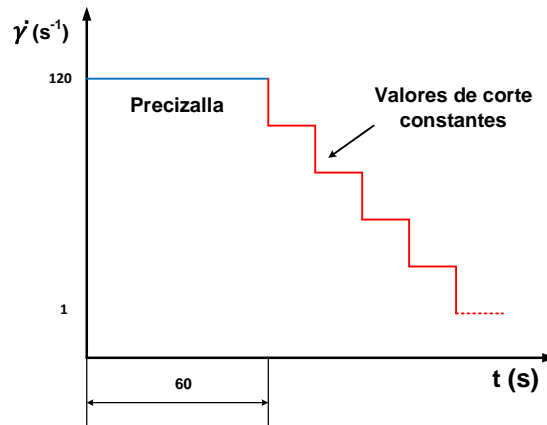


Figura 3.17. Protocolo de curva de flujo constante.

### 3.6 ENSAYOS DE CONO Y MINI-CONO DE ABRAMS.

En la Figura 3.18, se puede observar el mini-cono empleado y la superficie que se preparó para realizar el vaciado (escurrido) durante dicho ensayo [23]. Las dimensiones de este son: diámetros base y tope,  $d_2 = 90$  mm y  $d_2' = 40$  mm; altura  $h_2 = 75$  mm. Para realizar un ensayo, el cono se coloca sobre una base metálica con cobertor plástico negro que posee 2 círculos de referencia color amarillo, uno coincide con la base del cono ( $R_1 = 90$  mm) y el otro es la referencia máxima que puede alcanzar la mezcla.

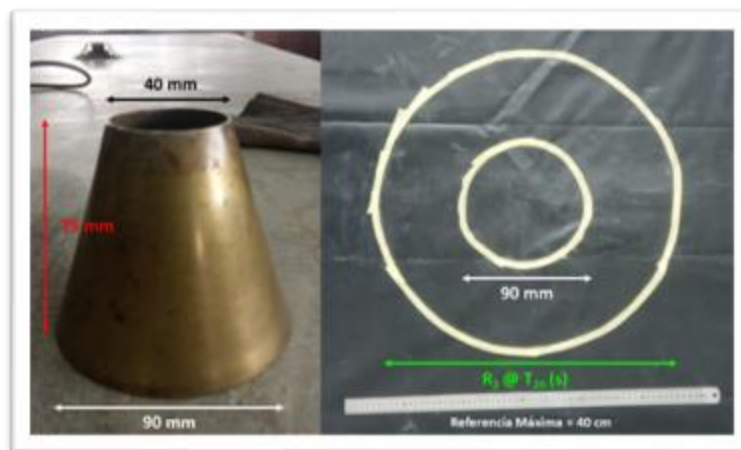


Figura 3.18. Elementos para los ensayos de mini-cono de Abrams.

Se fija el cono círculo central en la superficie y con ayuda de una mano o un ayudante se evita que se desplace en cualquier sentido. Luego se vierte la muestra MEH o HAC dentro del cono hasta que cubra el borde del éste evitando cualquier derrame. Inmediatamente,

se retira el cono y se deja fluir la muestra midiendo el tiempo  $T_{20} = T_2$  (s) y el diámetro máximo ( $R_2$ ) alcanzado por la mezcla, hasta observar que ésta no fluya más.

Las dimensiones del cono de Abrams (cono grande) son: diámetros base y tope,  $d_2 = 100$  mm y  $d_2' = 200$  mm; altura  $h_2 = 300$  mm [24]. Con estos datos, se pueden extrapolar los datos del mini-cono para calcular los valores  $R_1$  y  $T_1 = T_{50}^*$  para el cono grande empleando las ecuaciones.

$$R_1 = R_2 \cdot \left\{ \frac{h_1 \cdot [(d_1)^2 + (d_1')^2 + (d_1 \cdot d_1')]}{h_2 \cdot [(d_2)^2 + (d_2')^2 + (d_2 \cdot d_2')]} \right\}^{2/5} \quad (3.1)$$

$$T_1 = T_2 \cdot \left( \frac{300}{160} \right) \quad (3.2)$$

### 3.7 ENSAYOS MECÁNICOS EN PROBETAS DE MEH Y HAC EN ESTADO ENDURECIDO.

Las probetas que se prepararon conforme las mezclas de materiales que se utilizaron para los ensayos en estado fresco, tanto para MEH como para HAC [25], se retiraron del molde después de 24 horas de curado. Las muestras se sumergieron de inmediato en agua, en un tanque hecho de un material que resista la corrosión. Es importante mantener el agua del tanque limpia, cambiándola según sea necesario. Las probetas estuvieron almacenadas durante un periodo de 28 días, antes de proceder con las pruebas mecánicas de esfuerzo de compresión [26], [27].

El equipo utilizado para el ensayo mecánico de esfuerzo de compresión es de marca DIGIMAX Plus 70-Q0802/D y se muestra en la Figura 3.19 pertenece al Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.



**Figura 3.19.** Equipo utilizado para ensayo mecánico (esfuerzo de compresión).

El procedimiento para los ensayos fue realizado conforme la norma NTE INEN 488 [28], a saber:

- Secar cada muestra hasta una condición de superficie seca y eliminar los granos sueltos de arena u otras incrustaciones, de las caras que estarán en contacto con los bloques de apoyo de la máquina de ensayo.
- Colocar cuidadosamente la muestra en la máquina de ensayo, bajo el centro del cabezal de apoyo superior, de manera que la carga se aplique a dos caras del cubo previamente medidas.
- Aplicar la velocidad de carga con un incremento uniforme de velocidad entre los cabezales superior e inferior hasta alcanzar una carga sobre el espécimen entre el rango de 900 a 1.800 N/s, esta velocidad de aplicación de carga debe ser alcanzada durante la primera mitad de la carga máxima estimada y no se debe reajustar la velocidad de carga en la última mitad de la carga, especialmente mientras el cubo está rápidamente fluyendo antes de la falla.
- Registrarse la carga total máxima indicada por la máquina de ensayo.

### 3.8 REFERENCIAS.

- [1] NTE INEM 490:2011, Cementos hidráulicos compuestos. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, 2011.
- [2] NTE INEN 2380:2011, Cementos hidráulicos. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, 2011.
- [3] NTE INEN 156:2009, Cemento hidráulico. Determinación de la densidad. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, 2009.
- [4] NTE INEN 196:2009, Determinación de la finura mediante el aparato de permeabilidad al aire. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, 2009.
- [5] NTE INEN 696:2011, Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, 2011.
- [6] EN 12620:2013, Agragates for Concrete. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2013.
- [7] TA Instruments, Specifications: Discovery Hybrid Rheometer DHR-2, (2023).
- [8] F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, L.M. Ordóñez-Belloc, Rheology of concrete: A study case based upon the use of the concrete equivalent mortar, *Mater. Struct.* 46 (2013) 587–605.
- [9] N.M. Páez-Flor, F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, Steady viscous flow of some commercial Andean volcanic Portland cement pastes, *Adv. Cem. Res.* 29 (2017) 438–449. <https://doi.org/https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00188>.
- [10] N.M. Páez-Flor, F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, Effect of various plasticisers on viscous flow properties of natural pozzolanic cement pastes, *Adv. Cem. Res.* 32 (2019) 20–29.
- [11] J.F. Velázquez Navarro, Tesis Doctoral. Reología de pastas y morteros equivalentes de hormigones autocompactantes., Universidad Málaga, 2009.
- [12] NEC-HC-SM, Estructura de Hormigón Armado. Norma Ecuatoriana de la Construcción., Quito, Ecuador, 2014.

- [13] UNE-EN 197-1:2011, Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. Asociación Española de Normalización., España, 2011.
- [14] UNACEM, Cementos del Ecuador: Selvalegre, Campeón y Armaduro, (2023).
- [15] ASTM International, C0595\_C0595M-20: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, Philadelphia, 2020.
- [16] ASTM International, ASTM C1157/C1157M-20: Standard Performance Specification for Hydraulic Cement, Philadelphia, 2020.  
[https://doi.org/10.1520/C1157\\_C1157M-20](https://doi.org/10.1520/C1157_C1157M-20).
- [17] T.D. Chávez Bedoya, Estudio del comportamiento viscoso (trabajabilidad) de pastas y morteros equivalentes para aplicaciones autocompactantes utilizando cementos de alta resistencia., Escuela Politécnica del Ejército del Ecuador, 2020.
- [18] ASTM International, ASTM C494/C494M-19e1: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Philadelphia, 2019.
- [19] A. Hammat, S.; Menadi, B.; Kenai, S.; Tomás, C.; Kirguistán, MS; de Sousa Galdino, Efecto del contenido y finura de la puzolana natural sobre las propiedades reológicas, mecánicas y de durabilidad de morteros autocompactantes, J. Construir 44 (2021) 103–276.
- [20] A. De Schutter, G.; Pope, Quantification of the water demand of sand in mortar, Constr. Build. Mater. 18 (2004) 517–521.
- [21] D. Gómez-cano, R.B. Correa, Y.P. Arias, Mechanical Behavior of Recycled Mortars Manufactured from Moisture Correction Using the Halogen Light Thermogravimetric Balance as an Alternative to the Traditional ASTM C 128 Method, Int. J. Struct. Constr. Eng. 16 (2022) 164–168.
- [22] R. Kasemchaisiri, S. Tangtermsirikul, A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete, Constr. Build. Mater. 21 (2007) 1322–1334.
- [23] The European Standard, Testing fresh concrete, 15 (1999) 1–2.
- [24] D. Sanchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001.
- [25] V. Dils, J., De Schutter, G. & Boel, Influence of mixing procedure and mixer type on

fresh and hardened properties of concrete: a review, *Mater. Struct.* 45 (2012) 1673–1683.

- [26] L. García, *Propiedades mecánicas y reológicas de hormigones autocompactantes sometidos a carga a edades muy tempranas y tempranas*, Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
- [27] G. Rodríguez de Sensale, L. Segura-Castillo, I. Rodríguez Viacava, R. Rolfi Netto, D. Miguez Passada, M.E. Fernández Iglesias, *Hormigón autocompactante con fibras para premoldeados*, *Hormigón y Acero* 69 (2018) 69–75.
- [28] NTE INEN 488. *Cemento Hidráulico: Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50mm de arista*. Quito: INEN., (2009) 16.

# CAPÍTULO IV<sup>1</sup>

## COMPORTAMIENTO VISCOSO DEPENDIENTE DEL TIEMPO DE PASTAS DE CEMENTO

### 4.1 INTRODUCCIÓN.

En primer lugar, en este capítulo se profundizará el estudio tixotrópico y de comportamiento de flujo (adelgazamiento por cizalla/espesamiento por cizalla) de aglutinantes cementosos (binders) en presencia o no de un aditivo superplastificante. El estudio del comportamiento viscoso dependiente del tiempo (CVDT) de estos materiales cementosos es un aspecto crítico desde el punto de vista práctico de las tareas de construcción.

Es importante resaltar que, frecuentemente se ha reportado que las pastas de cemento muestran un comportamiento viscoso independiente del tiempo (CVIT), siendo la mayoría de las veces viscoplástico/adelgazamiento por cizalla [1]. Sin embargo, la adición de un aditivo plastificante a estas pastas en estado fresco causa un efecto dispersante pudiendo cambiar su comportamiento de CVIT a CVDT, es decir, causando un efecto de espesamiento por cizalla [2], [3], [4], [5], asociado al cambio de las propiedades tixotrópicas de estos materiales.

En segundo lugar, se estudiará cómo cambia el comportamiento de flujo de la pasta de cemento Armaduro (AM), el cual contiene ceniza volcánica, en función de diferentes aditivos plastificantes añadidos a diferentes concentraciones y en relación agua/cemento constante. Los resultados de esta sección ayudarán a establecer bases para entender las propiedades reológicas (límite de fluencia, viscosidad plástica, etc.) de los MEH y cómo estas cambian con la inclusión de los agregados en su composición.

---

<sup>1</sup> Parte de este capítulo ha sido publicado en la revista *Advances in Cement Research* **35(11)** (2023): 506-514.

## 4.2 ESTUDIOS CON PASTAS DE CEMENTOS VOLCÁNICOS.

La sustitución parcial del cemento por materiales con actividad puzolánica es una línea de investigación muy activa. El uso de las puzolanas naturales, como la piedra pómez (PP) en polvo y la ceniza volcánica (CV), es común en zonas sísmicas debido a su amplia presencia y fácil extracción. Obviamente, es necesaria una buena caracterización de este tipo de materiales cementantes sostenibles para proponer posibles usos prácticos.

El estudio de los comportamientos viscosos dependientes del tiempo (CVDT) de los materiales cementantes es un tema importante desde un punto de vista práctico. Este pronunciamiento puede ponerse en contexto al considerar que la realización óptima de muchas tareas de construcción diferentes, como por ejemplo, la colocación de hormigón en encofrados, el vertido de múltiples capas, la estabilidad del hormigón frente a la sedimentación, el hormigón proyectado, la capacidad de impresión de las pastas de cemento, etc., está determinada por la evolución temporal de las propiedades mecánicas del hormigón fresco [6], [7], [8], [9], [10],[11].

Cuando se llevan a cabo tales actividades, los materiales cementantes se bombean, impulsan o transfieren de un punto a otro. Cabe mencionar que, los dispositivos utilizados para estas actividades aplican algún valor de torque o tensión a las muestras. Sin embargo, a pesar de que el torque es la magnitud aplicada a las lechadas de cemento, los procesos de flujo que involucran materiales cementantes se han descrito tradicionalmente en términos de velocidad, caudal, velocidad de corte, etc. No obstante, cuando se preestablece un caudal para un uso específico, la resistencia al flujo, es decir, la viscosidad, debe conocerse de antemano para seleccionar el dispositivo de bombeo adecuado. Como la viscosidad del material no es a priori una magnitud conocida, para evitar este problema, es evidente que es más apropiado expresar la CVDT de los materiales cementantes en términos de torque (tensión) que en términos de velocidad angular (tasa).

También relacionado con esta controversia, se debe indicar que la mayoría de las veces, el CVDT de los materiales cementantes se registra utilizando el modo de velocidad controlada de los reómetros comunes de tensión controlada. Sin embargo, surgen algunos inconvenientes, al utilizar reómetros de tensión controlada en modo de control de velocidad para el estudio de CVDT [12]. Específicamente, con reómetros controlados por

la tensión, un valor de velocidad de corte solo se monitorea cuando se selecciona el modo de control de velocidad. Luego, el reómetro aplica una secuencia de tensiones de corte hasta que finalmente se logra el valor de velocidad de corte deseado. El problema es que este proceso consume un tiempo valioso para los estudios del CVDT justo en la evolución transitoria inicial del material. Como ejemplo, que demuestra claramente la necesidad de utilizar el modo de control de tensión para el estudio de CVDT con un reómetro de tensión controlada, se probó una muestra de pasta de cemento Portland (PC) para estudios transitorios, comparando los resultados obtenidos con ambos modos de control (Figura 4.1). El reómetro utilizado para esta prueba es, como se indicó anteriormente, un reómetro de tensión controlada (MARS III, Thermo-Haake, Alemania). Cuando se registró una velocidad de cizallamiento (60 l/s), el reómetro necesitó alrededor de 0,5 s para alcanzar el valor impuesto (Figura 4.1(a)). Por lo tanto, no se pudo registrar la respuesta transitoria corta de esta pasta de CP (Figura 4.1(b)). Sin embargo, cuando se seleccionó un valor de esfuerzo cortante (60 Pa), el reómetro pudo imponer este valor desde el principio (Figura 4.1(c)) y, en consecuencia, la respuesta transitoria de la pasta de CP se puede registrar adecuadamente (Figura 4.1(d)).

Además, y para apoyar el uso del modo de tensión controlada para el estudio de CVDT de materiales cementantes, sin importar qué tipo de reómetro se haya utilizado, vale la pena señalar que las respuestas no newtonianas son, en general, la consecuencia directa de los cambios inducidos en las microestructuras desarrolladas en fluidos complejos [13] debido a la acción de fuerzas externas [14], que compiten con fuerzas internas de corto alcance [15]. De acuerdo con este escenario físico, la tensión de corte en lugar de la velocidad de corte debe considerarse responsable de los cambios en el estado microscópico de fluidos complejos [16].

El comportamiento viscoso independiente del tiempo (CVIT) que se muestra con mayor frecuencia en las pastas de cemento fresco es el comportamiento viscoplástico de adelgazamiento por cizallamiento [17]. No obstante, gracias a su efecto dispersante, la adición de algún plastificante puede cambiar el CVIT de las pastas de cemento fresco para que sea espesamiento por cizallamiento [2], [3], [4], [5], [18], [19] y [20]. Cabe señalar que, la misma pasta fresca de CP puede verse forzada a mostrar comportamientos de adelgazamiento por cizalla o espesamiento por cizalla por la adición de plastificantes, lo que permite comprobar si los diferentes tipos de CVDT están ligados a cada uno de los

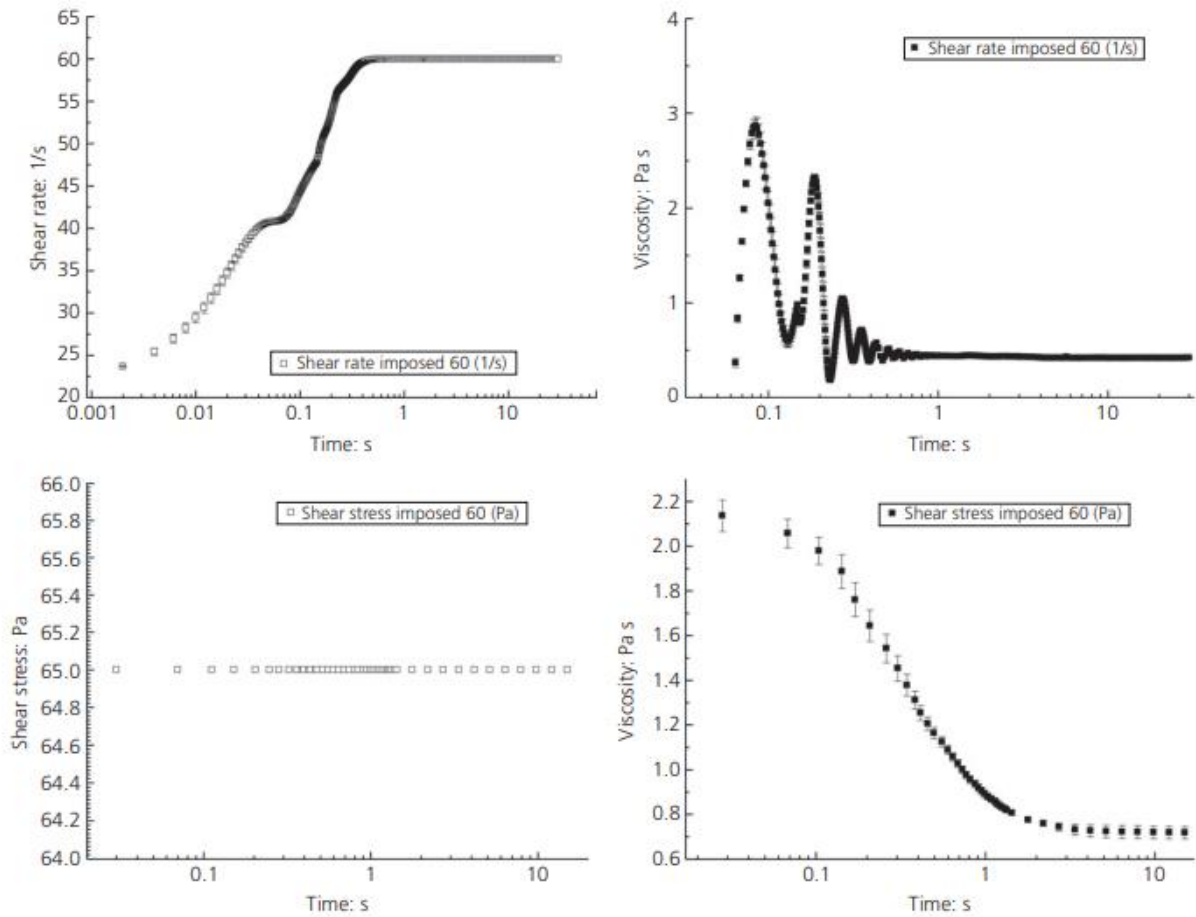
CVIT o no, evitando así posibles incertidumbres derivadas de la diferente naturaleza de los materiales. Cuando el CVDT consiste en la disminución isotérmica y reversible de la viscosidad con el cizallamiento, es decir, tixotropía, se ha asumido que está ligada al comportamiento de adelgazamiento por cizalla [21].

Por el contrario, cuando la CVDT consiste en el aumento isotérmico y reversible de la viscosidad con el cizallamiento, es decir, antitixotropía o tixotropía negativa, se ha asumido que está ligada al espesamiento por cizalla [22]. En otro trabajo de investigación [23], se ha confirmado esta correlación en una suspensión de sílice pirogénica. Sin embargo, como una lista de resultados previos y actuales pone en tela de juicio la validez general de estas relaciones CVIT y CVDT [24], [25] y [26], se puede recomendar que la validez general o específica de las conexiones tixotropía/adelgazamiento por cizalla y antitixotropía/espesamiento por cizalla se establezca realizando estudios experimentales con una variedad de materiales diferentes.

Teniendo en cuenta que, la viscosidad de un fluido cambia con el cizallamiento debido a reajustes a nivel microestructural provocados por acciones mecánicas, la idea fundamental que justifica la existencia de los CVDTs es simplemente que el logro de una microestructura de equilibrio se retrasa necesariamente en el tiempo. Entonces, la observación de tixotropía o antitixotropía debe considerarse como la expresión macroscópica de la variación temporal de la microestructura desde que se aplica un esfuerzo cortante constante hasta que finalmente se alcanza un estado de equilibrio final. Por lo tanto, se puede suponer que un aumento de la viscosidad es la manifestación macroscópica de un aumento en la extensión, la resistencia o ambas de la microestructura.

De acuerdo con este escenario, aparecerá un comportamiento constante de adelgazamiento por cizalla cuando la microestructura de equilibrio se rompa con un esfuerzo cortante creciente, y se observará un comportamiento constante de espesamiento por cizalla cuando la microestructura se acumule debido al aumento del esfuerzo cortante. En otras palabras, debería esperarse razonablemente el cumplimiento general de las relaciones tixotropía/adelgazamiento por cizalla y antitixotropía/espesamiento por cizalla. Sin embargo, algunos resultados contradicen estas correlaciones asumidas.

En este contexto, es esencial que las relaciones tixotropía/adelgazamiento por cizalla y antitixotropía/espesamiento por cizalla encontradas previamente en una suspensión de sílice pirogénica [23] y en gran medida asumidas sin demostración en la literatura especializada [21] se prueben con diferentes materiales. En este caso, se estudió el comportamiento viscoso de algunas pastas de cemento frescas y pastas de cemento volcánico (PCV) frescas. La ventaja del uso de estos materiales radica en el hecho de que ambos CVIT se pueden observar simplemente agregando una pequeña cantidad de aditivo, es decir, se mantiene básicamente la composición de las suspensiones.



**Figura 4.1.** Comparación entre los resultados de estudios transitorios correspondientes a una pasta de CP obtenida con un reómetro de tensión controlada que trabaja en modo de control de velocidad (fila superior) y en modo de control de tensión (fila inferior).

#### 4.3 ESTUDIO DEL CVDT DE CP ADELGAZAMIENTO POR CIZALLA/ESPESAMIENTO POR CIZALLA.

Se empleó un cemento Portland (CEM I 52.5 R) cedido por la Financiera y Minera S.A. (España), obtenidos a partir de la molienda de clínker sin ninguna otra adición según normas españolas (AENOR, España). Las pastas de CVs se obtuvieron a partir de la sustitución parcial del CP por una mezcla de puzolana volcánica (PV), la cual se obtuvo de depósitos naturales provenientes de la actividad del volcán Reventador (Otavalo, Ecuador), esta consiste en polvo de piedra pómez (PP) y ceniza volcánica (CV).

La composición mineralógica y algunas propiedades físicas de la PV y CP se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 4.1.** Composición mineralógica y propiedades físicas de la PV y el CP.

|                               | PV    | CP    |
|-------------------------------|-------|-------|
| Andesina                      | 84    | -     |
| Tschermakita                  | 8     | -     |
| Cuarzo                        | 3.5   | -     |
| Cordierita                    | 4.3   | -     |
| Celita (C3A)                  | -     | 3.5   |
| Alita (C3S)                   | -     | 56.4  |
| Belita (C2S)                  | -     | 21.2  |
| Felita (C4AF)                 | -     | 14    |
| Basanita                      | -     | 4.8   |
| Área BET (m <sup>2</sup> /g)  | 6.05  | 1.31  |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.53  | 3.17  |
| Porosidad (%)                 | 56.33 | 59.24 |

Se utilizó el aditivo plastificante policarboxilato (Viscocrete, Sika) a la concentración de saturación de acuerdo con las especificaciones del fabricante (2% en peso de cemento) para permitir la máxima dispersión de la fase sólida. Este plastificante tiene una densidad de 1.09 g/cm<sup>3</sup> y un residuo sólido relativamente bajo (20% en peso).



Las muestras se prepararon siguiendo un protocolo específico para facilitar el contacto entre agua y partículas. Esta precaución debe tenerse en cuenta porque se han reportado diferencias en el comportamiento reológico debido a la variación en la secuencia de mezclado de materiales cementantes [27]. Previamente se mezclaron agua y plastificante. Luego a esta mezcla líquida se agregó a la fase sólida. Se completó una mezcla de primera mano para asegurar la rotura completa de los agregados más grandes. Posteriormente se utilizó un mezclador (RZR1, Heidolph Instruments, Alemania) durante 180 s a 100 r/min. para homogeneizar las pastas de cemento, eliminando agregados pequeños y asegurando una mezcla uniforme. Se prepararon cuatro pastas de cemento con una relación agua/aglutinante (a/b) de 0,45 (Tabla 4.2).

Nomenclatura: b = binder (aglutinante), a = agua y ad = aditivo. Los aglutinantes son el CP o la mezcla CP+PV.

**Tabla 4.2.** Composición de las pastas de cemento a/b = 0.45.

| Mezcla/Aglutinante | CP (%) | PV (%) | Aditivo (% ad/b) |
|--------------------|--------|--------|------------------|
| CPA                | 100    | -      | -                |
| CVA                | 80     | 20     | -                |
| CPAAAd             | 100    | -      | 2                |
| CVAAd              | 80     | 20     | 2                |

Se utilizó un reómetro de tensión controlada (MARS III, Thermo-Haake Scientific Instruments, Alemania) para realizar un estudio del comportamiento reológico de las pastas de cemento. Este dispositivo está equipado con un módulo Peltier con cilindros (TM PE-C) para el control de la temperatura. Cada experimento se realizó en una muestra fresca con una temperatura fijada a  $25.00 \pm 0.05^\circ\text{C}$ . Se empleó un rotor de paletas (geometría de cuatro palas) con 22 mm de diámetro y 1 mm de espesor de pala. El uso de la geometría de paletas en copa se ha confirmado como el más adecuado para ensayos de materiales cementosos [28].

El rotor se insertó a una profundidad de 1 mm a una velocidad de 0.15 mm/s. De esta manera, se redujeron las grietas y los daños en las muestras. Esta es una condición

muy importante que se debe cumplir cuando se estudia la evolución temporal con cizallamiento de una microestructura inicial. Para evitar efectos indeseables de deslizamiento de la pared, se utilizó una copa dentada. El diámetro de la copa fue de 25 mm. Por lo tanto, la relación entre los diámetros del rotor y del estator fue de 0.88, lo que cumple razonablemente bien la condición de corte simple del espacio donde se cortó la muestra.

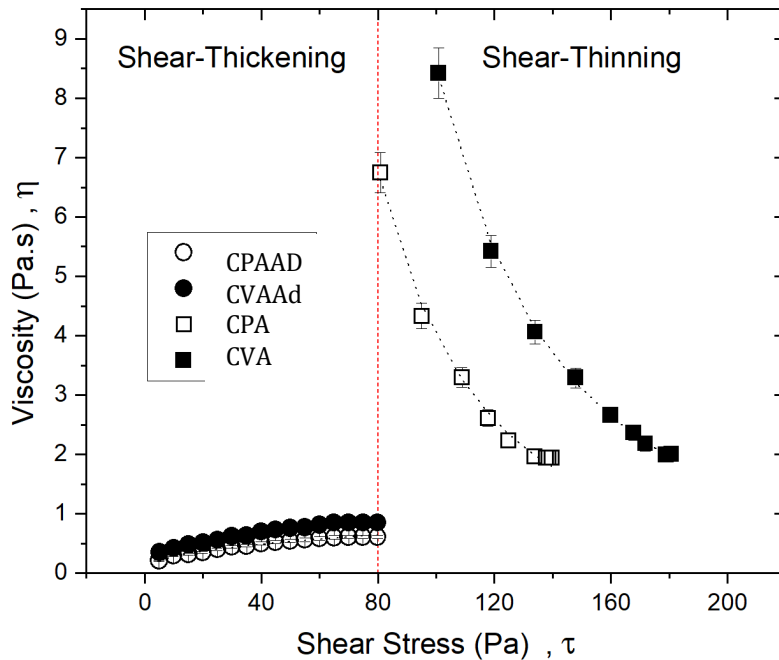
Se obtuvieron curvas de flujo estacionario (CFE) en el intervalo de esfuerzo cortante 5–180 Pa a fin de determinar la CVIT de las pastas de cemento. Previamente, se había realizado un pre-corte (corte durante 120 s a 50 Pa para pastas shear-thickening y a 120 Pa para pastas de adelgazamiento por cizalla, seguido de 60 s de tiempo de reposo en ambos casos) para eliminar de la muestra aquellos estados iniciales aleatorios o peligrosos. Cada esfuerzo cortante se aplicó durante el tiempo suficiente para asegurar que el valor de respuesta correspondiente (velocidad de corte) consiguiera un estado estacionario; más precisamente, se exigió que  $(\dot{\gamma}/\gamma) \leq 0.01$  durante 10 s para aceptar que se había alcanzado efectivamente un estado estacionario.

Se realizaron pruebas de paso de esfuerzo cortante a partir de un valor fijo para estudiar las CVDT de las pastas de cemento. Cada prueba se repitió al menos tres veces para garantizar la repetibilidad de los resultados.

#### **4.4 COMPORTAMIENTO DE FLUJO EN ESTADO ESTACIONARIO.**

La reacción puzolánica de CP y CV con agua genera suspensiones floculadas en reposo. En ausencia de cualquier otra adición, estas suspensiones (CPA y CVA) muestran típicamente un comportamiento de adelgazamiento por cizalla, es decir, una disminución de la viscosidad estacionaria con el esfuerzo cortante, debido a la erosión de las partículas de los agregados (Figura 4.2). Además, se caracterizan por la existencia de un esfuerzo de fluencia, es decir, un valor umbral de esfuerzo cortante que debe superarse para observar el flujo en las pastas de cemento ( $81 \pm 1$  Pa para la pasta de CPA y  $101 \pm 1$  Pa para la pasta de CVA), y el esfuerzo de fluencia que limita los comportamientos de las pastas de cemento de tipo sólido y líquido. En otras palabras, las pastas de cemento muestran

típicamente un comportamiento viscoplástico, que requiere la aplicación de valores de esfuerzo cortante relativamente altos para iniciar el flujo.



**Figura 4.2.** Se presentan las curvas de viscosidad estacionaria para las pastas de cemento fresco CPA, CVA, CPAAd y CVAAd.

En la Figura 4.2 se observa que la adición de plastificantes modifica la CVIT de las pastas de cemento. Más concretamente, la presencia de plastificantes hace que se evite la formación de agregados de partículas cuando las suspensiones están en reposo porque aumenta las fuerzas repulsivas (electrostáticas y/o estéricas) entre partículas. Al ser las pastas de cemento con plastificantes suspensiones concentradas no floculadas cuando están en reposo, se consiguen claramente las condiciones requeridas para observar un comportamiento de espesamiento por cizalla [21].

Efectivamente, como se puede observar en la Figura 4.2, las pastas CPAAd y CVAAd mostraron un ligero comportamiento de espesamiento por cizalla cuando se aplicaron valores de esfuerzo cortante extremadamente bajos, lo que es un signo claro de la ausencia de esfuerzo de fluencia.

En resumen, se deben aplicar valores altos de esfuerzo cortante para observar el flujo de las pastas de cemento en ausencia de cualquier aditivo, mientras que el flujo de las pastas de cemento con aditivo puede observarse sin importar cual sea el valor del

esfuerzo cortante. Este resultado sugiere la existencia de una red microestructural en el estado de reposo de las pastas CPA y CVA, pero una microestructura no floculada en reposo para las pastas CPAAd y CVAAd.

Los valores de viscosidad graficados en función de la tensión de corte en la Figura 4.2 se ajustaron con polinomios de segundo orden.

$$\eta(\tau) = A + B\tau + C\tau^2 \quad (4.1)$$

Los resultados se muestran en la Tabla 4.3. Curiosamente, los signos de los coeficientes B y C son opuestos cuando las pastas muestran comportamientos de adelgazamiento y espesamiento por cizalla.

Para dar algún significado físico a los coeficientes del modelo A, B y C, se relacionaron con las cantidades medidas de la siguiente manera. En ambos casos (Figura 4.2), la viscosidad tiende a un valor newtoniano asintótico ( $\eta_\infty$ ) a tensiones de cizallamiento 'altas' ( $\tau_\infty$ ), es decir:

$$\eta_\infty(\tau_\infty) = A + B\tau_\infty + C\tau_\infty^2 \quad (4.2)$$

La viscosidad disminuye (adelgazamiento por cizalla de las pastas) o aumenta (espesamiento por cizalla de las pastas) hacia este valor límite de viscosidad ( $\eta_\infty$ ). En ambos casos:

$$\left. \frac{d\eta(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau_\infty} = B + 2C\tau_\infty = 0 \quad (4.3)$$

Sin embargo, suponiendo que el valor de esfuerzo cortante inferior a partir del cual se observa experimentalmente el flujo de la pasta coincide con el esfuerzo de fluencia ( $\tau_y$ ) en el caso de las pastas CPA y CVA (adelgazamiento por cizalla), la ecuación (4.1) establece que el valor de viscosidad constante de las pastas de adelgazamiento por cizalla/viscoplásticas, registrado en el esfuerzo cortante inferior es:

$$\eta_y(\tau_y) = A + B\tau_y + C\tau_y^2 \quad (4.4)$$

Por lo tanto, la ecuación (4.1) se puede reescribir para pastas de adelgazamiento por cizalla/viscoplásticas (CPA y CVA) utilizando coeficientes relacionados con resultados accesibles experimentalmente.

$$\eta(\tau) = \left[ \eta_{\infty} + \frac{\tau_{\infty}^2 (\eta_y - \eta_{\infty})}{(\tau_y - \tau_{\infty})^2} \right] + 2\tau_{\infty} \frac{\eta_{\infty} - \eta_y}{(\tau_y - \tau_{\infty})^2} \tau + \frac{\eta_{\infty} - \eta_y}{(\tau_y - \tau_{\infty})^2} \tau^2 \quad (4.5)$$

Los valores de los parámetros reológicos obtenidos con la ecuación (4.5) y la Tabla 4.2 se muestran en la Tabla 4.3. La presencia de puzolana volcánica transforma las pastas de cemento en materiales más viscosos. Además, la tensión de fluencia de la pasta CVA es mayor que la de la pasta CPA. Por lo tanto, se necesita un mayor consumo de energía para bombear pastas CVA que para CPA cuando se utilizan en tareas de construcción y edificación.

Para el caso de las pastas de espesamiento por cizalla (CPAAd y CVAAd), no se observa tensión de fluencia, y la ecuación 4.1 se puede reescribir utilizando coeficientes que también están relacionados con datos accesibles experimentalmente.

$$\eta(\tau) = \eta_0 - 2 \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{\tau_{\infty}} \tau + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{\tau_{\infty}^2} \tau^2 \quad (4.6)$$

Los resultados de los parámetros reológicos obtenidos utilizando la ecuación 4.6 se muestran en la Tabla 4.4. Nótese el aumento de la viscosidad a partir de los valores  $\eta_0$  y  $\eta_{\infty}$ , lo que indica que el comportamiento de espesamiento por cizalla fue inducido por la adición del plastificante.

**Tabla 4.3.** Resultados del ajuste de la viscosidad vs. esfuerzo de corte.

| Pasta | A /Pa·s     | B /s                        | C /s·Pa <sup>-1</sup>     | R <sup>2</sup> |
|-------|-------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|
| CPA   | 29 ± 2      | -(0.36 ± 0.04)              | (13 ± 2)·10 <sup>-4</sup> | 0.9900         |
| CVA   | 27 ± 3      | -(0.29 ± 0.04)              | (8 ± 1) 10 <sup>-4</sup>  | 0.9864         |
| CPAAd | 0.18 ± 0.01 | (112 ± 9)·10 <sup>-4</sup>  | -(7 ± 1)·10 <sup>-5</sup> | 0.9934         |
| CVAAd | 0.30 ± 0.02 | (130 ± 10)·10 <sup>-4</sup> | -(7 ± 2)·10 <sup>-5</sup> | 0.9968         |

**Tabla 4.4.** Parámetros reológicos interpretados partiendo de A, B y C.

| Pasta | $\tau_{\infty}/Pa$ | $\tau_y/Pa$ | $\eta_{\infty}/Pa\cdot s$ | $\eta_y/Pa\cdot s$ |
|-------|--------------------|-------------|---------------------------|--------------------|
| CPA   | 151 ±1             | 81±1        | 1.006±0.003               | 6.40±0.07          |
| CVA   | 183±1              | 101 ±1      | 2.183±0.005               | 8.24±0.08          |
| Pasta | $\tau_{\infty}/Pa$ | -           | $\eta_{\infty}/Pa\cdot s$ | $\eta_0/Pa\cdot s$ |
| CPAAd | 80±2               | -           | 0.63±0.03                 | 0.18±0.01          |
| CVAAd | 93±1               | -           | 0.90±0.04                 | 0.30±0.02          |

#### 4.5 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO VISCOSO DEPENDIENTE DEL TIEMPO (CVDT) DE LAS PASTAS DE CEMENTO.

La investigación en reología aborda dos tipos de CVDT que son reversibles. Es importante notar que el uso del término "viscoso" subraya que la dependencia temporal del flujo analizada aquí proviene exclusivamente de fenómenos disipativos, lo que implica que no se considera ninguna contribución elástica en la evolución de la microestructura dentro de las definiciones de tixotropía y antitixotropía.

La tixotropía se refiere a la reducción de la viscosidad aparente de un material de forma isotérmica a lo largo del tiempo al aplicarle un esfuerzo cortante constante, seguido de una recuperación una vez que se restauran las condiciones iniciales. Por otro lado, la antitixotropía es el fenómeno contrario, que se caracteriza por un aumento isotérmico de la viscosidad aparente con el tiempo bajo un esfuerzo cortante constante, regresando a su valor original al restablecer las condiciones iniciales.

Es importante destacar que, estas dos definiciones se basan únicamente en efectos viscosos relacionados con la ruptura y la reconstrucción de la microestructura, es decir, representan las definiciones fundamentales de tixotropía y antitixotropía [29], ya que no se incluyen los efectos de las deformaciones elásticas. Si se toman en cuenta también las contribuciones elásticas debidas a la deformación de la microestructura, lo cual sería una perspectiva más realista, estos fenómenos deberían ser correctamente denominados tixo-(anti-tixo-)elasticidad [30] y [31].



Con el fin de determinar cómo las deformaciones elásticas pueden influir en la respuesta transitoria de las pastas de cemento ante la aplicación de escalones de tensión, se ha calculado el tiempo de relajación de la microestructura en estado de reposo utilizando el modelo generalizado de Maxwell para viscoelasticidad lineal. Este parámetro indica el intervalo de tiempo durante el cual los fenómenos elásticos son significativos en la evolución de la microestructura.

Así, tras identificar el límite viscoelástico lineal (LVL) de las pastas de cemento mediante ensayos de barrido de amplitud de tensión, se realizaron ensayos de barrido de frecuencia en las pastas, manteniendo la amplitud de esfuerzo en el LVL. A través de ensayos de cizallamiento oscilatorio de pequeña amplitud (COPA), se pueden definir y cuantificar dos características viscoelásticas del material: el módulo elástico ( $G'$ ) y el módulo viscoso ( $G''$ ). Según el modelo generalizado de Maxwell, los módulos viscoelásticos se relacionan con la frecuencia angular aplicada a una muestra en el régimen COPA de la siguiente forma:

$$G'(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{g_i \lambda_i^2 \omega^2}{1 + (\lambda_i \omega)^2} \quad (4.7)$$

$$G''(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{g_i \lambda_i \omega}{1 + (\lambda_i \omega)^2} \quad (4.8)$$

Donde  $g_i$  es el módulo y  $\lambda_i$  es el tiempo de relajación del  $i$ -ésimo elemento de Maxwell (para un amortiguador y un resorte en serie). El número mínimo de configuraciones individuales de Maxwell (N) se determina mediante un valor máximo impuesto arbitrariamente de alguna función objetivo [32].

$$\mathcal{O} = \left\{ \sum_{i=1}^M \left[ \frac{G'_{exp}(\omega_i) - G'_{mod}(\omega_i)}{G'_{exp}(\omega_i)} \right]^2 - \left[ \frac{G''_{exp}(\omega_i) - G''_{mod}(\omega_i)}{G''_{exp}(\omega_i)} \right]^2 \right\} \quad (4.9)$$

Donde  $M$  es el número de valores de frecuencia impuestos a la microestructura en reposo. En este estudio, se asumió como válido el ajuste con el modelo generalizado de Maxwell, imponiendo una condición débil para el valor de la función objetivo, es decir,  $\mathcal{O} < 10$ . Usando esta condición, los datos experimentales se ajustaron razonablemente con solo  $N = 3$  elementos individuales de Maxwell. El tiempo de relajación representativo es el promedio de los  $\lambda_i$  correspondientes a cada elemento individual de Maxwell, es decir:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^3 g_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^3 g_i} \quad (4.10)$$

Como se indica en la Tabla 4.5, los tiempos de relajación de las pastas de cemento analizadas en este estudio fueron menores a 0,35 s. Esto sugiere que, transcurridos los primeros 0,5 segundos, únicamente se observan efectos viscosos (definición tixotropía antigua) al examinar la evolución temporal de la respuesta de la microestructura.

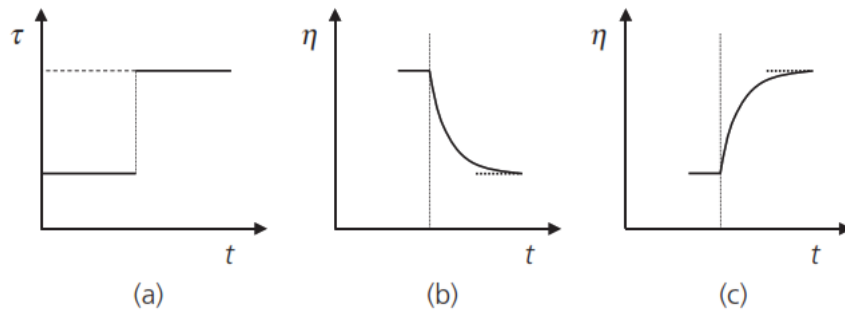
Por lo tanto, dado que la influencia elástica en el flujo transitorio de las pastas de cemento se puede considerar despreciable después del primer segundo de cizallamiento, se puede afirmar que los CVDT reflejan cambios en la viscosidad aparente a lo largo del tiempo, como resultado de la reorganización de la microestructura de las pastas provocada por acciones mecánicas (cizallamiento). Con esta explicación, es razonable concluir que un aumento en la viscosidad representa una manifestación macroscópica de una mayor distorsión en el campo de flujo, atribuida a una microestructura más compleja. En contraste, microestructuras más abiertas tienden a generar una disminución en la viscosidad bajo cizallamiento.

**Tabla 4.5.** Tiempo de relajación para la respuesta viscoelástica de CP y PV.

| Pasta | $\lambda$ /s | $\sigma$ |
|-------|--------------|----------|
| CPA   | 0.350±0.002  | 4.8      |
| CVA   | 0.007±0.001  | 6.6      |
| CPAAD | 0.058±0.001  | 4.8      |
| CVAAd | 0.024±0.001  | 2.9      |

Considerando las definiciones de adelgazamiento por cizalla, espesamiento por cizalla, tixotropía y antitixotropía, es lógico suponer que un incremento en la tensión (ver Figura 4.3(a)) de un fluido de adelgazamiento por cizalla —lo que implica un cambio de una viscosidad aparente alta y constante a una baja— debe ir acompañado de una disminución gradual de la viscosidad a lo largo del tiempo (ver Figura 4.3(b)). De manera similar, aplicar la misma prueba de incremento a un fluido de espesamiento por cizalla debería revelar un cambio de una viscosidad aparente baja y constante a una alta (ver

Figura 4.3(c)), que también debería estar asociado con un aumento progresivo de la viscosidad con el tiempo.



**Figura 4.3.** Se presentan predicciones sobre la respuesta a una prueba de aumento gradual, como se muestra en (a), (b) Si el fluido se comporta como adelgazamiento por cizalla y (c), si el fluido se convierte en espesamiento por cizalla.

Los resultados de los ensayos de aumento/reducción entre tensiones de corte seleccionadas de ambas regiones CVIT se muestran en la Figura 4.4. La viscosidad disminuye con el tiempo y se recupera el estado inicial cuando se aplican los ensayos de aumento de acuerdo con la definición de tixotropía en todos los casos, es decir, independientemente de que la muestra presente adelgazamiento por cizalla (CPA, CVA) o espesamiento por cizalla (CPAAd, CVAAd) CVIT. Además, se observa una respuesta tixotrópica cuando se aplican los ensayos de reducción a todas las pastas de cemento estudiadas en esta investigación.

A pesar de que la evolución temporal de la viscosidad de las pastas de adelgazamiento por cizalla respalda la conexión esperada entre adelgazamiento por cizalla y tixotropía, los hallazgos de los ensayos de esfuerzo cortante en pastas de espesamiento por cizalla permitieron concluir que, aparentemente, el comportamiento de espesamiento por cizalla está vinculado a la tixotropía en lugar de la antitixotropía, lo cual contrasta con las expectativas iniciales. Este resultado inesperado para las pastas de espesamiento por cizalla se puede explicar provisionalmente de la siguiente manera: al incrementar el esfuerzo cortante en una pasta de espesamiento por cizalla, la microestructura se organiza rápidamente en un estado bloqueado, que tiene una viscosidad alta. Sin embargo, al mantener el esfuerzo cortante constante de forma repentina, la microestructura original se deteriora gradualmente, resultando en una

disminución de la viscosidad de la pasta de cemento con el tiempo. Este proceso concluye al alcanzar un estado microestructural estable que corresponde a la tensión de corte aplicada. En contraste, al reducir la tensión de corte en una pasta de espesamiento por cizalla, la microestructura inicial se transita rápidamente a un estado no bloqueado, caracterizado por una viscosidad muy baja de forma repentina. La acumulación gradual de la microestructura es el resultado de la acción continua de la tensión de corte, que se manifiesta como un incremento de la viscosidad de la pasta de cemento, hasta que se logra el estado microestructural estable.

Es importante destacar que aparentemente los comportamientos antitixotrópico y tixotrópico se comportan de manera similar; en todos los casos, se observó una disminución isotérmica de la viscosidad aparente a lo largo del tiempo bajo un esfuerzo de corte constante, el cual regresa a su valor inicial una vez que se restauran las condiciones previas. La distinción entre los comportamientos tixotrópico y antitixotrópico radica en que la viscosidad estable disminuye con una prueba de aumento en el caso de un CVDT tixotrópico (adelgazamiento por cizalla), mientras que aumenta para un CVDT antitixotrópico (espesamiento por cizalla). Este patrón es más general de lo que se había anticipado, ya que se han documentado comportamientos similares en materiales diversos [33] y [34].

Desde una perspectiva práctica es importante señalar que, por ejemplo, en los cálculos para bombas de potencia, el hecho de que la viscosidad de las pastas de cemento antitixotrópicas se eleve abruptamente a un nivel superior al valor estable que se alcanza tras un incremento en el ensayo de cizallamiento puede acarrear consecuencias negativas que se deben considerar. Si solamente se utiliza el valor final de viscosidad estable para determinar la potencia mínima requerida por una bomba para iniciar el flujo de una pasta de cemento antitixotrópica/espesamiento por cizalla, podrían surgir problemas de bloqueo debido a la subestimación de la viscosidad inicial. Por lo tanto, sería más adecuado emplear el valor de viscosidad inicial en los cálculos.

Otro ejemplo que ilustra los efectos adversos de ignorar el comportamiento antitixotrópico de estas pastas está relacionado con el uso de dispositivos de caudal controlado. Estos métodos han evolucionado para lograr un uso más eficiente de la energía durante las transferencias de fluidos [35], optimizando el consumo de caudal.

Para su implementación, es esencial entender cómo las condiciones iniciales influyen en la evolución de la viscosidad a lo largo del tiempo. Sin embargo, se ha demostrado que la viscosidad de las pastas antitixotrópicas/espesamiento por cizalla cambia con el tiempo, comenzando desde un valor inicial que depende de las tensiones de cizallamiento, tanto finales como iniciales (Figura 4.4). Es importante señalar que, no existe un modelo matemático que prediga completamente esta dependencia de la viscosidad.

A continuación, se presenta una expresión empírica para describir cómo la viscosidad de las pastas de cemento de adelgazamiento por cizalla y espesamiento por cizalla varía en función del tiempo y de las tensiones de cizallamiento iniciales y finales.

En el caso de pastas de cemento tixotrópicas/adelgazamiento por cizalla, el valor de viscosidad inicial ( $\eta_0$ ) registrado justo después de la aplicación de una prueba de esfuerzo escalonado de  $\tau_0$  a  $\tau$  coincide con el valor de viscosidad constante correspondiente a  $\tau_0$  ( $\eta_{SSO}(\tau_0)$ ) (ver resultados para pastas CPA y CVA en la Figura 4.4), es decir:

$$\eta_0 = \eta_{SSO}(\tau_0) = A + B \cdot \tau_0 + C \cdot \tau_0^2 \quad (4.11)$$

Por el contrario (ver los resultados para las pastas CPAAd y CVAAd en la Figura 4.4), cuando la pasta de cemento muestra un comportamiento viscoso antitixotrópico/espesamiento por cizalla, el valor de viscosidad inicial también es una función del valor de esfuerzo cortante final ( $\tau$ ).

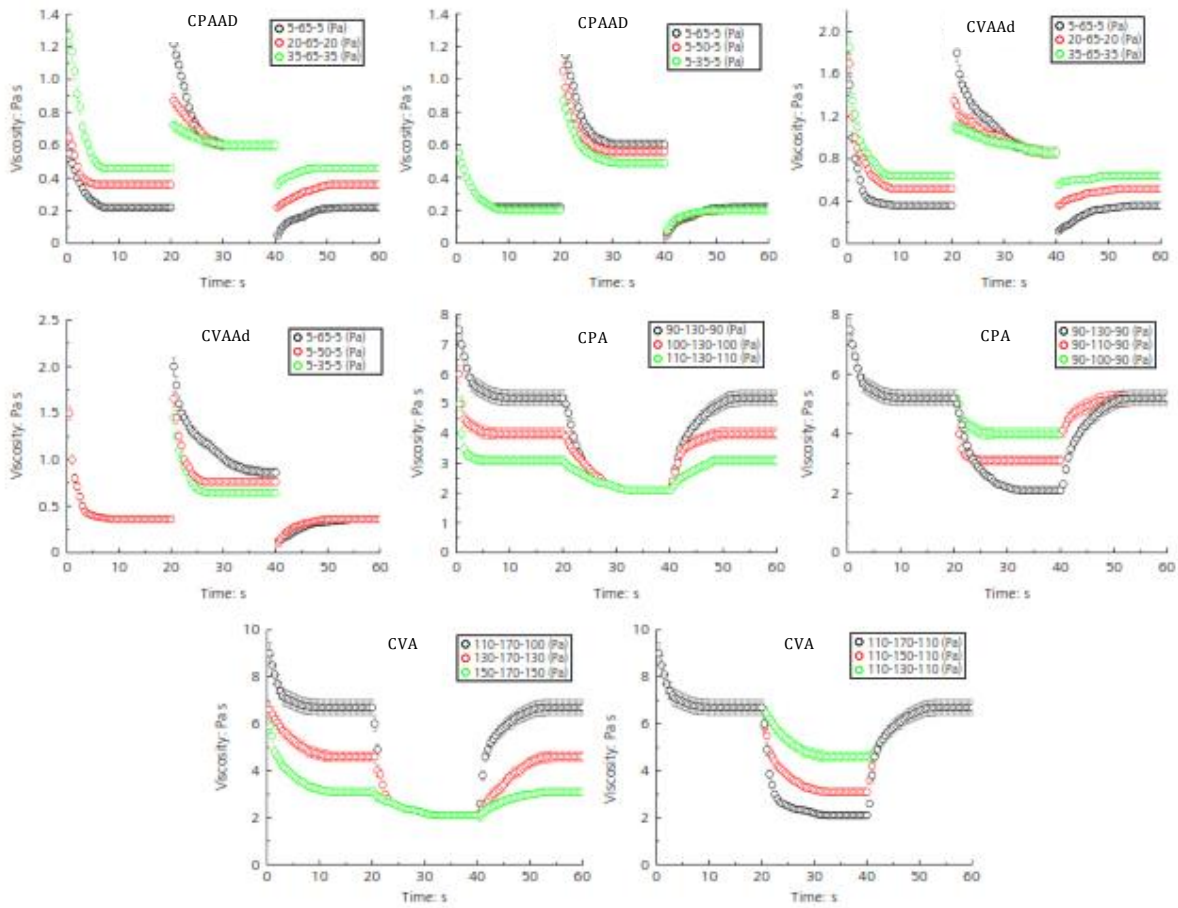
$$\eta_0 = \eta_0(\tau, \tau_0) \quad (4.12)$$

A partir de los resultados presentados en la Figura 4.4, se deduce que el  $\eta_0$  de las pastas de cemento de espesamiento por cizalla está influenciado por  $\tau$  y  $\tau_0$ .

$$\eta_0 = \eta_0(\tau, \tau_0) \propto f\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) \quad (4.13)$$

Se puede concluir que la viscosidad de corte inicial al comienzo de la prueba de incremento gradual debe ser más baja cuando las tensiones de corte iniciales ( $\tau_0$ ) y finales ( $\tau$ ) son cada vez más semejantes, dado que el cambio microestructural resultante será menos relevante. Además, es importante señalar que este hallazgo es consistente con el

modelo de bloqueo seguido de erosión en la respuesta de las pastas de espesamiento por cizalla ante las pruebas de tensión de corte de aumento gradual.

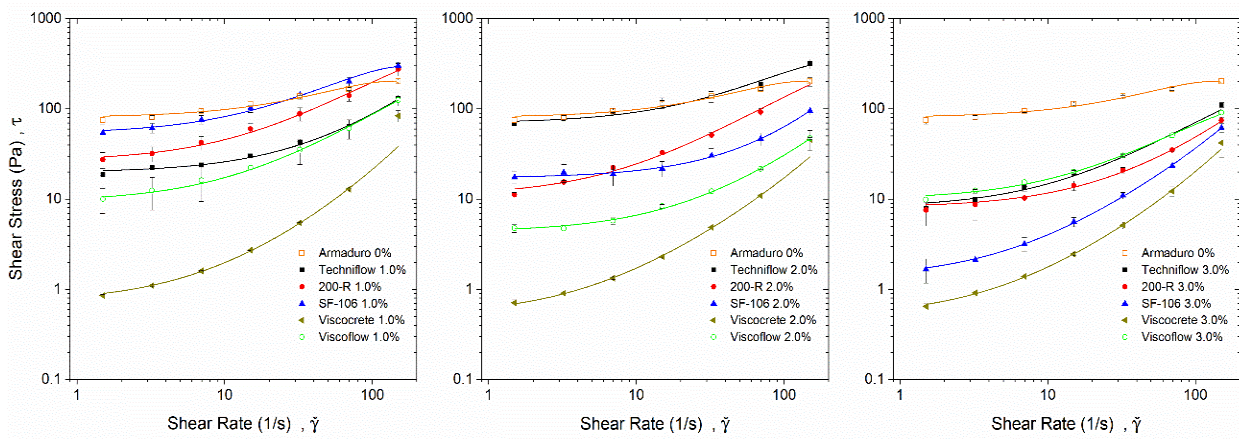


**Figura 4.4.** Resultados de los ensayos de esfuerzo cortante por pasos aplicados a suspensiones de espesamiento por cizalla (CPAAD y CVAAd) y de adelgazamiento por cizalla (CPA y CVA).

#### 4.6 ESTUDIO DEL EFECTO DE ADITIVOS PLASTIFICANTES COMERCIALES EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS PASTAS DE CEMENTO VOLCÁNICO.

En esta sección se abordarán los resultados de los ensayos reológicos obtenidos con PC Armaduro (AM), con relación constante agua/cemento de 0.35 y empleando 5 aditivos plastificantes. En el Capítulo III se muestra la caracterización química, mineralogía y algunas propiedades físicas del cemento AM. En la Tabla 4.6 se listan algunos datos técnicos de los aditivos empleados para este estudio.

El impacto del tipo y la cantidad de aditivo en el CFE de las pastas de cemento Armaduro (0.35 % a/c) se ilustra en la Figura 4.5. La cantidad de aditivo se determinó en relación a la masa de cemento (% en masa). También se incluyen los resultados de la pasta de cemento Armaduro sin aditivo, denominada Armaduro 0%, para fines de comparación. No se presentan los resultados de los otros dos tipos de cemento (Selvalegre y Campeón) para evitar redundancias, ya que los resultados fueron cualitativamente similares. Sin importar las recomendaciones del fabricante utilizadas (consultar Tabla 3.4), se evaluaron pastas de cemento con proporciones de 1, 2 y 3 % en masa de los aditivos.



**Figura 4.5.** CFE para las pastas de CPV-AM con aditivos al 1, 2 y 3% de masa de cemento.

#### **4.7 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ADITIVO EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS MEZCLAS CON CPV-AM.**

El cemento Armaduro está compuesto por una mezcla de 69.4 % m/m de cemento Portland y un 30.6 % m/m de puzolana volcánica (PV = PP+CV) con valores medios de tamaños de partículas de 29 a 32  $\mu\text{m}$ . Estas características permiten asumir que las suspensiones de este material en agua presentarán un estado floculado como el observado en la sección anterior para la pasta de cemento con PV (CVA), con un comportamiento de adelgazamiento por cizalla.

Para entender mejor el efecto de los aditivos en las propiedades reológicas de las pastas de cemento volcánicas es necesario considerar lo descrito en la literatura relacionada con el efecto del cizallamiento en la microestructura de estos materiales.

Es importante recalcar que, en estado de reposo la hidratación de los CPV no afecta significativamente a su microestructura en un periodo de tiempo suficiente para observar la reversibilidad de este proceso, razón por la cual, las pastas de cemento pueden ser tratadas como suspensiones coloidales y la velocidad con la que las pastas de cemento volcánicas logren el máximo microestructural puede ser usada como una medida de la trabajabilidad de la mezcla. Mientras más contenido de PV contenga el CPV, este desarrollara una estructura más fuerte.

Por otra parte, los materiales cementosos en estado fresco como es el caso de las pastas de cemento pueden ser caracterizados mediante sus CFE, de tal manera que se pueda calcular parámetros como el límite de fluencia, la viscosidad plástica, la viscosidad aparente y las características adelgazamiento por cizalla/espesamiento por cizalla de las pastas de cemento. Con esta información se puede conocer la fluidez y la resistencia a la segregación del material.

Cabe mencionar que, la adición de una gran cantidad de PV conlleva a un incremento en el límite de fluencia confiriéndole una menor fluidez a la muestra. Así mismo, un aumento en el contenido de PV causa una disminución de la viscosidad plástica con la consecuente disminución de la resistencia a la segregación.

Por otro lado, también en reportes previos se ha demostrado que el nivel microestructural mínimo de las CPV incrementa cuando aumenta el contenido de PV y disminuye la relación  $a/c$ . Esto implica que cuando la cantidad de partículas en la suspensión es mayor, deberían obtenerse respuestas no lineales en las CFE ya que las partículas se someten a diferentes arreglos para llegar al estado estacionario, aunque los efectos no lineales tienden a ser menores de lo esperado por que las partículas de PV son menos densas.

Por lo tanto, estos dos parámetros reológicos son el principal objeto de estudio cuando adicionamos un agente plastificante, con lo cual también, el detrimento de estas propiedades afecta el diseño del MEH porque se esperaría mayor sedimentación de los agregados.

Cuantitativamente para lograr características autocompactantes en las pastas de cemento, cuanto mayor sea la viscosidad plástica y menor el esfuerzo de cedencia, mejor será el efecto del aditivo.

A continuación, se estudia las CFE del PCV-AM con los aditivos listados en la Tabla 4.6, extrayendo de los reogramas la información obtenida mediante una de las ecuaciones constitutivas del modelo de Bingham Modificado (MBM).

En la Tabla 4.6 se listan los coeficientes del MBM para las CFE para las pastas de cemento con una  $a/c = 0.35$ ; además se puede observar que el modelo de Bingham Modificado se ajusta muy bien a los puntos experimentales ( $R^2 \geq 0.9994$ ).

El aditivo Viscocrete proporcionó valores más bajos de límite de fluencia, observándose una disminución de este valor cuando la dosificación de Viscocrete aumenta del 1 % al 2 % mc. No se aprecia una disminución significativa en el límite de fluencia cuando la cantidad de Viscocrete aumentó al 3 % mc. En consecuencia, se propone que una dosificación del 2 % mc de Viscocrete sería apropiada para el diseño de los MEH.

**Tabla 4.6.** Parámetros del MBM obtenidos a partir de los datos en extraídos de la Figura 4.5.

| Aditivo    | (%) <i>cw</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> | $\tau_{MB}$ (Pa) | $\eta_p$ (Pa.s) | <i>c</i> (Pa.s <sup>2</sup> ) |
|------------|---------------|-----------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|
| Techniflow | 1             | 0.9997                | 20.0 ± 1.0       | 0.60 ± 0.05     | 0.0008 ± 0.0003               |
|            | 2             | 0.9998                | 70.0 ± 4.0       | 2.3 ± 0.5       | ~0                            |
|            | 3             | 0.9995                | 8.1 ± 0.9        | 0.68 ± 0.06     | ~0                            |
| 200R       | 1             | 0.9999                | 27.0 ± 7.0       | 1.9 ± 0.2       | ~0                            |
|            | 2             | 0.9996                | 9.5 ± 0.8        | 1.5 ± 0.1       | -(0.002 ± 0.001)              |
|            | 3             | 0.9999                | 8.0 ± 0.6        | 0.35 ± 0.03     | ~0                            |
| SF 106     | 1             | 0.9994                | 53.0 ± 9.0       | 3.0 ± 0.3       | -(0.009 ± 0.002)              |
|            | 2             | 0.9999                | 17.2 ± 0.5       | 0.34 ± 0.04     | 0.0010 ± 0.0003               |
|            | 3             | 0.9999                | 1.3 ± 0.1        | 0.26 ± 0.01     | 0.0009 ± 0.0001               |
| Viscocrete | 1             | 0.9997                | 0.7 ± 0.2        | 0.12 ± 0.02     | 0.0009 ± 0.0004               |
|            | 2             | 0.9999                | 0.52 ± 0.08      | 0.12 ± 0.01     | 0.0005 ± 0.0002               |
|            | 3             | 0.9999                | 0.50 ± 0.04      | 0.12 ± 0.01     | 0.0008 ± 0.0001               |
| Viscoflow  | 1             | 0.9999                | 8.8 ± 0.3        | 0.83 ± 0.06     | ~0                            |
|            | 2             | 0.9999                | 4.3 ± 0.2        | 0.23 ± 0.01     | 0.0004 ± 0.0001               |
|            | 3             | 0.9999                | 9.9 ± 0.5        | 0.68 ± 0.04     | -(0.0011 ± 0.0005)            |
| -          | 0             | 0.9995                | 80.0 ± 4.0       | 1.9 ± 0.2       | -(0.007 ± 0.001)              |

Desafortunadamente, el valor de la viscosidad plástica no fue el más alto cuando la PC de Armaduro contenía el aditivo Viscocrete. Esto significa que probablemente, con el uso de este aditivo, se observará algo de sangramiento en la lechada cementosa.

Alternativamente, por ejemplo, el aditivo Viscoflow proporcionó valores de viscosidad plástica más altos, lo cual es un resultado positivo para evitar la exudación de la pasta; sin embargo, los valores del límite de fluencia fueron más de 10 veces mayor que los obtenidos con el uso de Viscocrete.

Para decidir sobre que aditivo fue más apropiado de acuerdo con el objetivo de esta investigación, se consideró la tercera característica que debe cumplir un diseño HAC, es decir, el comportamiento de espesamiento por cizalla a altas tasas de corte. Este comportamiento reológico se manifiesta en valores positivos del coeficiente de segundo orden (*c*) del MBM. Como se puede ver en la Tabla 4.7, este fue el caso con el aditivo Viscocrete.



#### 4.8 REFERENCIAS.

- [1] I.S. Boddepalli, U., Panda, B., & Ranjani Gandhi, Rheology and printability of Portland cement based materials: a review, *J. Sustain. Cem. Mater.* 12 (2022) 789–807.
- [2] D. Feys, R. Verhoeven, G. De Schutter, Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?, *Cem. Concr. Res.* 39 (2009) 510–523.
- [3] N.M. Páez-Flor, F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, Steady viscous flow of some commercial Andean volcanic Portland cement pastes, *Adv. Cem. Res.* 29 (2017) 438–449.
- [4] N.M. Páez-Flor, F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, Microstructure-at-rest evolution and steady viscous flow behavior of fresh natural pozzolanic cement pastes, *Constr. Build. Mater.* 194 (2019) 360–371.
- [5] N.M. Páez-Flor, F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, Effect of various plasticisers on viscous flow properties of natural pozzolanic cement pastes, *Adv. Cem. Res.* 32 (2019) 20–29.
- [6] K. Manthena, S.L., Boddepalli, Effect of tile aggregate and flyash on durability and mechanical properties of self-compacting concrete, *J. Build. Pathol. Rehabil.* 7 (2022).
- [7] S.R. Romano Lapasin, Vittorio Longo, Thixotropic behaviour of cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 9 (1979) 309–318.
- [8] N. Roussel, A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 1797–1806.
- [9] N. Roussel, F. Cussigh, Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 624–632.
- [10] N. Roussel, G. Ovarlez, S. Garrault, C. Brumaud, The origins of thixotropy of fresh cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 42 (2012) 148–157.
- [11] J.E. Wallevik, Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown, *Cem. Concr. Res.* 39 (2009) 14–29.
- [12] F. Baravian, C., Benbelkacem, G. & Caton, Unsteady rheometry: can we

- characterize weak gels with a controlled stress rheometer?, *Rheol Ogica Acta* 46 (2006) 577–581.
- [13] R.G. Larson, *The Structure and Rheology of Complex Fluids*, in: *Appl. Rheol.*, 1999: p. 360.
- [14] R.L.P. de S.M.R. Thompson, A simple method to analyze materials under quasilinear large amplitude oscillatory shear flow (QL-LAOS), *J. Rheol. (N. Y. N. Y)*. 63 (2018) 305–317.
- [15] J.M.N. Wagner, *Review Colloidal Suspension Rheology*, in: *Colloid. Suspens. Rheol.*, 2012: p. 393.
- [16] P.R. de Souza Mendes, R.L. Thompson, Time-dependent yield stress materials, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 43 (2019) 15–25.
- [17] N. Roussel, A. Lemaître, R.J. Flatt, P. Coussot, Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 77–84.
- [18] P. F. G. Banfill, A viscometric study of cement pastes containing superplasticizers with a note on experimental techniques, *Mag. Concr. Res.* 33 (1981) 37–47.
- [19] A. Kitahara; K. Yoshioka; E. Sakai; M. Daimon;, Role of Steric Hindrance in the Performance of Superplasticizers for Concrete, *Am. Ceram. Soc.* 80 (2005) 2667–2671.
- [20] L.H. a Anatol Zingg a,\*, A.K. B, F.W. A, J.P. C, S.B. C, Ludwig Gauckler, The microstructure of dispersed and non-dispersed fresh cement pastes — New insight by cryo-microscopy, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 522–529.
- [21] H. A. Barnes, Shear-Thickening (“Dilatancy”) in Suspensions of Nonaggregating Solid Particles Dispersed in Newtonian Liquids, *J. Rheol. (N. Y. N. Y)*. 33 (1989) 329–366.
- [22] H.A. Barnes, *Analytical Chemistry*, *Anal. Chem.* 48 (1976) 500A-500A.
- [23] F. Rubio Hernández; J. Sánchez; N. Páez, Testing shear thinning/thixotropy and shear thickening/antithixotropy relationships in a fumed silica suspension, *J. Rheol. (N. Y. N. Y)*. 64 (2020) 785–797.
- [24] J. Araki, M. Wada, S. Kuga, T. Okano, Flow properties of microcrystalline cellulose
-

- suspension prepared by acid treatment of native cellulose, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 142 (1998) 75–82.
- [25] H. Stein; W. Boersma; P. Baets; J. Laven;, Time-dependent behavior and wall slip in concentrated shear thickening dispersions, *J. Rheol. (N. Y. N. Y).* 35 (1991) 1093–1120.
- [26] N. Muñoz; J. Calero; J. Santos, Methodology to estimate the yield stress applied to ultraconcentrated detergents as model systems, *Chem. Eng. Sci.* 166 (2017) 115–121.
- [27] D. Han, R.D. Ferron, Effect of mixing method on microstructure and rheology of cement paste, *Constr. Build. Mater.* 93 (2015) 278–288.
- [28] A.H.D. Hannant, Developments in the shear vane test to measure the gel strength of oilwell cement slurry, *Adv. Cem. Res.* 1 (1988) 221–229.
- [29] D.C.H. Cheng, F. Evans, Phenomenological characterization of the rheological behaviour of inelastic reversible thixotropic and antithixotropic fluids, *Br. J. Appl. Phys.* 16 (1965) 1599–1617.
- [30] P.R. de S. Mendes, Thixotropic elasto-viscoplastic model for structured fluids, *Soft Matter* 7 (2011) 2471–2483.
- [31] R.G. Larson, Constitutive equations for thixotropic fluids, *J. Rheol. (N. Y. N. Y).* 59 (2015) 595–611.
- [32] F.A. Morrison, *Understanding Rheology*, 1st ed., Oxford University Press, New York, 2001.
- [33] Jorge H. Sánchez, and N.M.P.-F. , Francisco J. Rubio-Hernández, Time-Dependent Viscous Flow Behavior of a Hydrophobic Fumed Silica Suspension, *Processes* (2021).
- [34] Y.W. and R.H. Ewoldt, New insights on carbon black suspension rheology— Anisotropic thixotropy and antithixotropy, *J. Rheol. (N. Y. N. Y).* 66 (2022) 937–953.
- [35] H. Mohammed; R. Saidur; S. Mekhilef; M. B. Ali; A. Safari, Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 543–550.

## CAPÍTULO V<sup>2</sup>

### DISEÑO Y REOLOGÍA DE LOS MORTEROS EQUIVALENTES AL HORMIGÓN

#### 5.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presentarán el diseño experimental y el estudio reológico correspondientes a los morteros equivalentes al hormigón (MEH), considerando como parámetros el efecto de la concentración de aditivo (%Ad), la relación agua/cemento (a/c), el tipo de cemento según su contenido de ceniza volcánica (CV) y el efecto más crítico, como es la definición de los agregados finos y su subdivisión en fases (F), las cuales corresponden a tres intervalos de tamaño de grano. Además, se detallarán los parámetros de medición para realizar los ensayos reológicos de cizalla continua.

Como se estudió en el Capítulo I, el uso del método del MEH nos permite evaluar el efecto de cada uno de los parámetros de la matriz cementosa del MEH en el comportamiento en estado fresco y estado endurecido del hormigón.

La mayoría de las técnicas empíricas para evaluar los HACs en estado fresco son dependientes de la gravedad y solo reflejan el desempeño del hormigón a bajas tasas de corte. Entre estas técnicas se encuentran el cono de Abrams (slump-flow test), que mide la deformabilidad y límite de fluencia; el Embudo-V, para la velocidad del flujo y la viscosidad; la Caja-L y el Anillo-J para evaluar la capacidad de paso del hormigón, y la Caja-U para su capacidad de llenado [1], [2]. Estos ensayos asumen que el hormigón fluye bajo su propio peso, lo que representa un factor limitante para evaluar las propiedades reológicas a altas tasas de corte, lo cual es vital para las operaciones de producción y transporte del hormigón.

---

<sup>2</sup> Parte de este capítulo ha sido publicado en la revista *Processes* **10** (2022) 1820/1-1820/18.

Por un lado, ya conocemos que por adición del aditivo super plastificante (ASP) a las pastas de CPV se produce un comportamiento de espesamiento por cizalla (shear-thickening) en estas mezclas a altas tasas de corte. Sin embargo, se desconoce el tipo de flujo que puedan presentar los cementos volcánicos ecuatorianos en presencia del ASP y de los diferentes aditivos minerales como son la grava y los agregados finos, necesarios para formular un HAC para llevar a cabo operaciones de construcción en regiones del Ecuador con conocida actividad sísmica. Además, como hemos mencionado en otros capítulos, el flujo de este material en estado fresco también se verá afectado por el contenido de ceniza volcánica del cemento y la relación a/c que se utilice.

Debido a lo expuesto, muchos investigadores han realizado estudios de reología absoluta de los MEH en estado fresco, aunado a que no es posible realizar estas medidas con los HACs que contienen agregados minerales de gran tamaño (mayores a ~20 mm, parte de los finos y los gruesos), lo cual limita el uso de reómetros absolutos para obtener información detallada que prediga la fluidez y trabajabilidad del HAC en una operación de campo.

La metodología del MEH nos ayuda a lidiar con las desventajas anteriores, además el estudio reométrico con MEH es rápido y requiere poca cantidad de muestra. Esta técnica consiste en sustituir la fase inerte original (arena o grava) por una cantidad específica de arena de tamaño de partícula más pequeño la cual debe reproducir la misma área superficial total de la fase inerte original que se emplearía para el HAC, pero con la condición límite del tamaño de partícula que exijan las medidas en el reómetro absoluto [3].

Por lo tanto, una vez eliminado los inconvenientes causados por los agregados gruesos, en la presente sección de este trabajo evaluaremos los resultados de los ensayos reológicos de diferentes formulaciones de MEH partiendo del diseño del HAC inicial recomendado por el Colegio de Ingenieros del Ecuador, empleando cementos volcánicos y agregados minerales locales.

## 5.2 DEFINICIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS Y SUS FRACCIONES PARA PREPARAR LOS MEH.

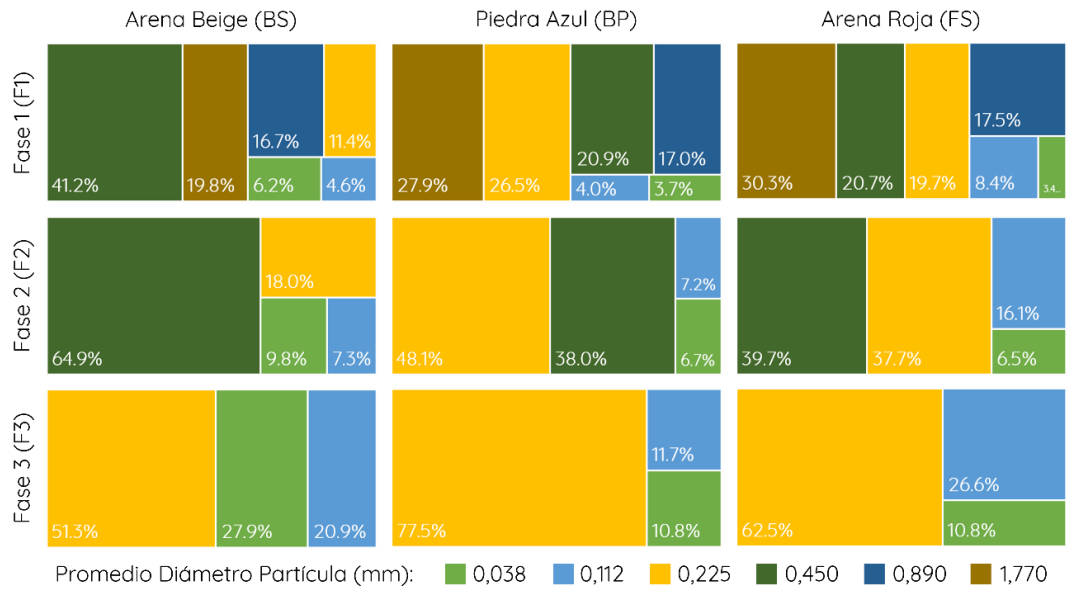
El diseño del MEH está basado en dos hipótesis: (i) los productos de hidratación aparecen en la interfase que existe entre las partículas de cemento y la de los sólidos inertes y, (ii) cuando el material fluye, el fenómeno de fricción ocurre únicamente en la interfase. Por lo tanto, el área total superficial de la fase inerte de los agregados es la variable crítica para entender la trabajabilidad y el comportamiento reológico del concreto.

En este sentido, la granulometría natural inicial de los agregados es un factor clave para asegurar la reproducibilidad de los resultados reológicos para las mezclas del MEH. Para delimitar esta variable, se separaron los distintos diámetros de granos y se recombinaron nuevamente manteniendo la misma proporción para la mezcla del MEH. Este procedimiento evita los posibles cambios en granulometría que pueden existir con respecto a la profundidad de muestreo en donde se almacena la arena, el uso de distintos sacos de la misma arena o variabilidad de tamaños de grano que pueda existir dentro de la cantera de procedencia.

En el caso de los HAC, los agregados constituyen alrededor de un 60% de la masa del material, lo cual es un factor dominante en la reología del hormigón, ya que al agregar una segunda fase sólida (finos y gruesos) a la pasta de cemento, aumenta la fracción volumétrica de las partículas en el MEH, produciendo un aumento de la viscosidad de la mezcla final [4]. Generalmente, la composición química de los agregados tiene muy poco efecto en las propiedades reológicas de las mezclas cementosas.

Partiendo de la granulometría inicial (Capítulo III), se seleccionaron tres fracciones de la granulometría inicial que contienen cada una distintos tamaños de grano. Se definen estas fracciones (Figura 5.1) como “Fases” F1, F2 y F3 con los siguientes diámetros de apertura de tamiz:

Fase 1 (F1, gruesos)  $0.075 < d < 2.36$  mm, granos que pasan por el tamiz N° 8; Fase 2 (F2, medios),  $0.075 < d < 0.30$  mm, granos que pasan 100% por el tamiz N° 30; Fase 3 (F3, finos),  $0.075 < d < 0.149$  mm, granos que pasan 100% del tamiz N° 50.



**Figura 5.1.** Diseño de Fases (F1, F2, F3) para los agregados finos (BS, BP, FS).

En principio, el diseño de las fases se basó en la distribución de tamaños de grano observada cualitativamente en cada fracción de arena y, cómo estos se pueden cernir en aplicaciones de campo en el caso de realizar una obra de construcción a gran escala con los HAC resultantes de esta investigación, es decir, se ciernen y descartan los granos > 0.30 mm de la F1 para obtener F2 o, se ciernen y descartan los granos > 0.149 mm de la F1 para obtener F3.

En la Figura 5.1 se observa para las distintas fases cuáles tamaños de partícula se encuentran en mayor proporción para cada agregado en una fase específica. Se pueden observar claras diferencias entre la arena natural (BS) y los agregados obtenidos por métodos de trituración industrial (BP y FS), estas diferencias también afectan la distribución de diámetros de partículas promedios en las fases 2 y 3. Para los agregados BP y FS se obtienen resultados muy parecidos en lo que respecta a las fases 2 y 3.

En este contexto, a continuación se describe la gradación, tamaño y morfología de los granos de los agregados, así como también su rol determinante en las propiedades reológicas del concreto.

### 5.3 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE LOS AGREGADOS.

Varios autores señalan que la distribución de tamaño de partículas (DTP) de los agregados empleados en la elaboración de los MEH y los HACs es uno de los factores claves para comprender el comportamiento reológico de estos en estado fresco y en estado endurecido, así como también, el tamaño medio de las partículas y su forma afectan también dicho comportamiento [5,6], [7].

Partiendo del análisis granulométrico de las tres arenas se pueden racionalizar los datos de la Figura 5.1. Por una parte, se obtuvo las gráficas de los granos acumulados pasantes (Figura 5.2) y por otra, para los tres agregados se obtuvieron las curvas de DTP normalizadas con respecto al máximo de la función de distribución de tamaño, en este caso, el máximo se encuentra en la piedra azul (BP) con un diámetro promedio de partícula de 0.225 mm (Figura 5.3). Este último valor corresponde al punto de referencia para comparar las demás curvas.

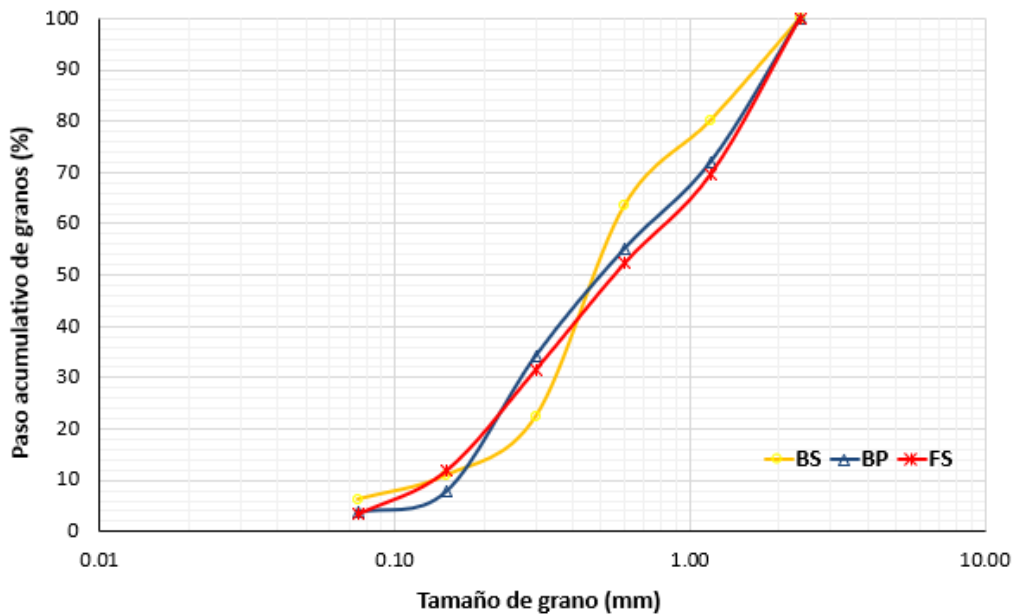


Figura 5.2. Acumulado Pasante para los agregados finos BS, BP y FS.

En la Figura 5.2 se puede observar que el acumulado pasante para las arenas trituradas (BP y FS) es muy similar, lo cual también se observa en la proporción de sus tamaños de grano en la Figura 5.1, pero aún no se pueden comparar estos datos directamente con los obtenidos para la arena BS.

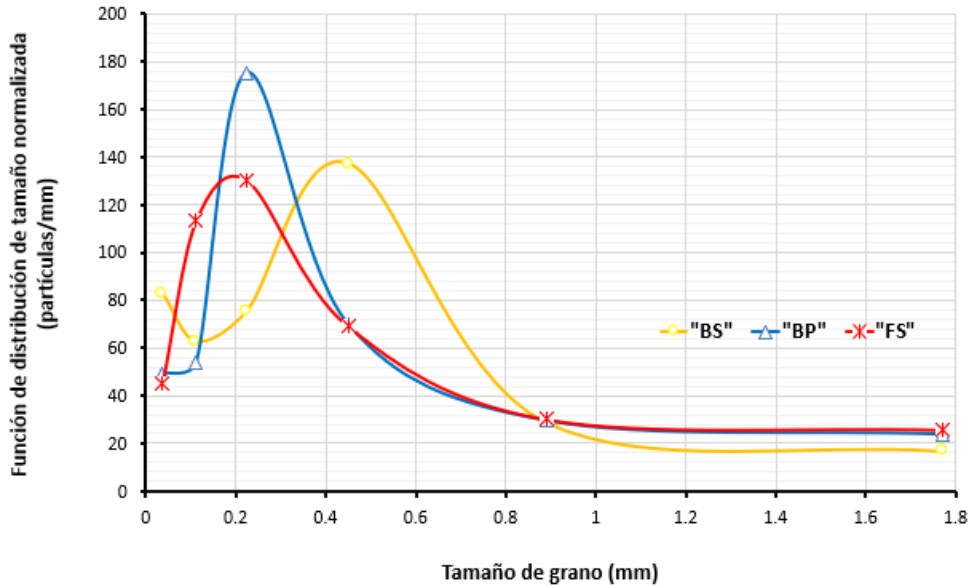


Figura 5.3. Distribución de tamaño de partículas para BS, BP y FS.

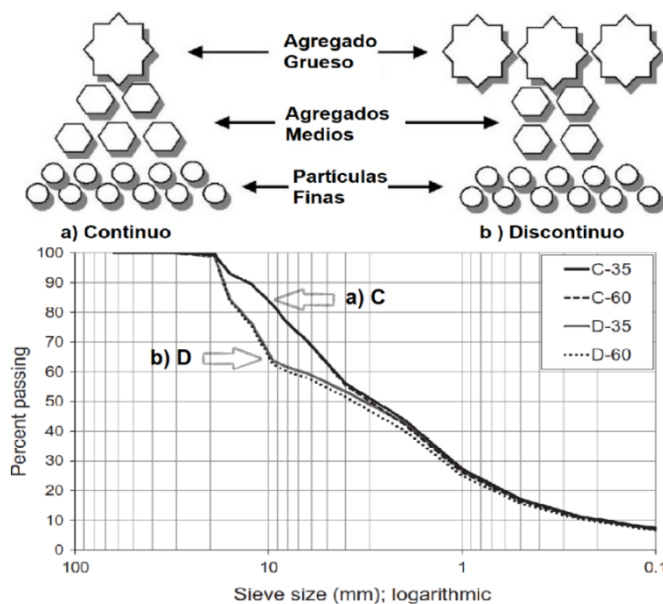
La Figura 5.3 muestra claramente las diferencias entre la distribución de tamaño de partículas ( $D_n$ ) y sus máximos ( $\bar{D}_{max}$ ) de diámetro de partícula promedio para las tres arenas. Se observa el máximo de las curvas de la DTP es muy cercano para BP (0.22 mm) y FS (0.20 mm), pero el polvo azul (BP) contiene una mayor proporción de tamaño de granos de ~0.2 mm (ver Figura 5.1, F1, 26.5%). Mientras que, para la arena beige (BS) el máximo de la DTP se encuentra en 0.42 mm, prácticamente el doble de las otras arenas.

Los autores señalan que, la gradación y el tamaño de partículas de los agregados juegan un rol importante en el estudio de las propiedades reológicas del hormigón [5] respecto a los siguientes aspectos:

- Mientras más grande es el tamaño de partícula, menor es el área superficial específica, y menores valores de los parámetros reológicos son obtenidos.

- Mientras más grandes son las partículas, más débil será la respuesta de espesamiento por cizalla.
- Agregados con gradación continua (Figura 5.4) conllevan a mezclas con menor segregación y concretos con mayor resistencia mecánica.
- La evolución del límite de fluencia se ve menos afectada en mezclas que contienen agregados con gradación continua que aquellas con gradación no uniforme.
- La fluidez del concreto fresco se mejora con agregados bien gradados, ya que la densidad de empaquetamiento y el área superficial específica de los agregados disminuye (menos fricción).

Es importante resaltar que, agregados que han sido sometidos a procesos de lavado suelen perder partículas de finos <math> < 0.04 \text{ mm}</math>, lo cual causa disminución en el área superficial específica total, pudiendo reducir significativamente el límite de fluencia de los morteros debido a la menor demanda de agua y a la disminución de las fuerzas coloidales. Mientras que morteros de arenas lavadas muestran valores de viscosidad plástica ligeramente más altos, debido a la carencia de finos que llenarían los espacios vacíos y actuarían como partículas lubricantes.



**Figura 5.4.** Representación gráfica y DTP de los tipos de gradación [8].

### 5.3.1 Forma de las partículas de los agregados BS, BP y FS.

El tipo de agregado, su densidad de empaquetamiento y la morfología de la superficie de sus granos influye en la trabajabilidad del concreto. Estudios han demostrado que la forma de las partículas de la arena es un factor determinante para el estudio del comportamiento reológico de los MEH, los cuales en ausencia de agregados gruesos exhiben menores valores de límite de fluencia y viscosidad [9,10].

La morfología del agregado influye en los aspectos reológicos según:

- Agregados más angulares y rugosos en el MEH, incrementan la viscosidad plástica y el límite de fluencia, reduciendo la fluidez de la mezcla.
- Agregados más redondeados o naturales reducen la fricción entre partículas resultando en un incremento de la fluidez.
- Las partículas más planas y alargadas incrementan las colisiones entre estas debido a su forma, incrementando así en mayor medida la viscosidad plástica y en menor medida al límite de fluencia.

Los agregados de piedra triturada tienen forma angular y superficie rugosa, lo cual incrementa el área superficial específica de estos y reduce el contenido de agua libre (mayor absorción), además su forma no conduce bien el flujo e incrementa la resistencia por fricción entre las partículas.

La Figura 5.5 resume los efectos explicados anteriormente con relación a la cantidad de arena y la forma de sus partículas.

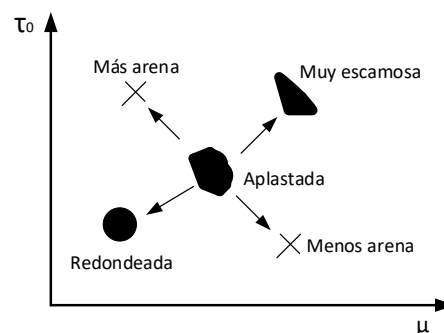


Figura 5.5. Efecto de la forma del agregado y el contenido de arena.

En este sentido, se estudiará el efecto de los parámetros de los agregados en las propiedades reológica de los MEH. Imágenes ópticas (Figura 5.6) de los tres granos de arena fueron obtenidas con un microscopio óptico de luz no polarizada (model BA310E, Motic Inc. Ltd., Hong Kong, China).

La Figura 5.6 muestra que para diámetros de partícula grandes ( $1.18 < dp < 2.36$  mm) la forma de los granos de la arena natural (BS) es ligeramente más esférica que los agregados obtenidos por procesos de trituración (BP y FS). Sin embargo, para diámetros intermedios ( $0.30 < dp < 0.60$  mm) las tres arenas presentan granos mixtos unos con formas angulares y otros redondeados. Cuando se realizan imágenes a los granos más pequeños ( $dp < 0.30$  mm) no se pueden apreciar a la escala de aumento (10x) la forma de las partículas. Cabe indicar que, la escala utilizada y que se muestra en la Figura 5.6 es de  $1000 \mu\text{m}$ .

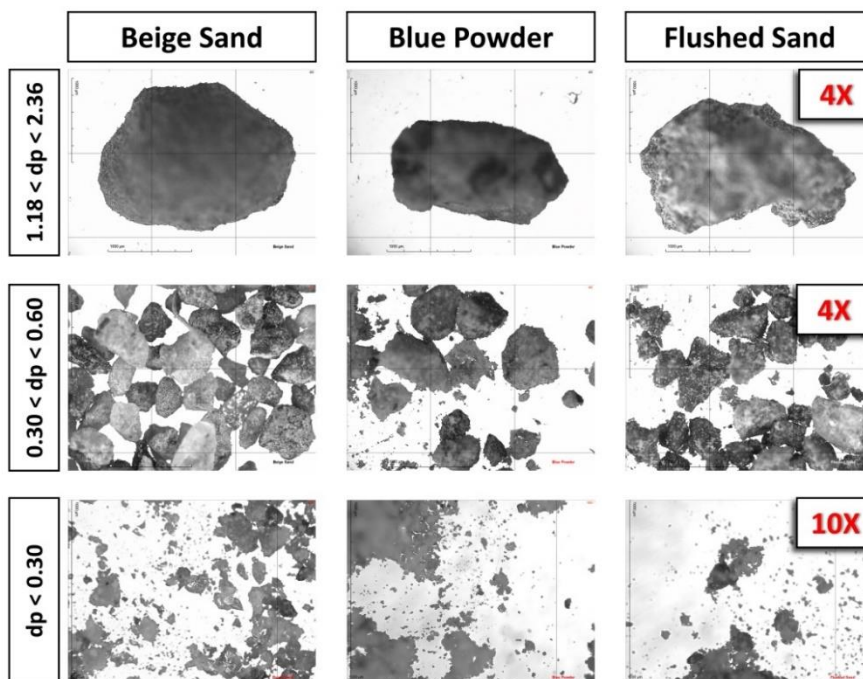


Figura 5.6. Imágenes ópticas obtenidas para las arenas BS, BP y FS.

### 5.3.2 Efecto del volumen de las partículas de los agregados.

Algunos autores sostienen que la fracción volumétrica de los agregados finos o gruesos puede afectar las propiedades reológicas de los morteros y hormigones [11,12].

- Incrementando la fracción volumétrica de los agregados gruesos, incrementa la viscosidad plástica y el límite de fluencia.

La adición de agregados de gran tamaño incrementa la cobertura de su superficie en el mortero, reduciendo el efecto adhesivo entre el agregado y la pasta de cemento, disminuyendo la fricción entre los agregados.

- Incrementando la fracción volumétrica de los agregados finos, incrementa el límite de fluencia, pero disminuye la viscosidad plástica.

La adición de agregados finos incrementa el área superficial de las partículas sólidas y la demanda de agua, reduciendo la fricción entre los agregados gruesos.

También, en lo que se refiere a la naturaleza o procedencia de los agregados, los granos finos de las arenas naturales no tienen efecto sobre la viscosidad plástica de los morteros, mientras que para los morteros con agregados triturados, la viscosidad plástica alcanza un mínimo con un cierto contenido de finos [10]. Cuando el contenido de finos es bajo para ocupar los espacios entre los agregados de mayor tamaño, la fricción entre partículas incrementa causando un aumento de viscosidad. En sentido contrario, si el contenido de finos se incrementa, el aumento del área superficial conlleva a una viscosidad plástica más alta.

#### 5.4 DISEÑO DE LOS MEHs CON LOS CPVs Y AGREGADOS MINERALES DE CANTERAS DEL ECUADOR.

Una vez definidos los tamaños de granos de los agregados y el aditivo a emplear, se establece como referencia la formulación para el hormigón diseñado por el Colegio de Ingenieros Civiles de Quito (Tabla 5.1).

**Tabla 5.1.** Proporciones de los materiales para el hormigón de referencia.

| Proporción | Cemento (kg) | Arena (kg) | Grava (kg) | Agua (kg) |
|------------|--------------|------------|------------|-----------|
| 1:1.5:1.5  | 520          | 750        | 750        | 208       |

Para preparar los MEH [13] con los tres agregados finos seleccionados (BS, BP y FS) debemos considerar un único agregado grueso y un árido fino como referencia, en este caso, la grava (G) y la arena beige (BS) provenientes de las canteras de Guayllabamba. El resumen de los datos granulométricos de estos agregados se presentó en el Capítulo III.

### 5.4.1 Cálculos para preparar los MEH con la Fase 1.

Inicialmente, para obtener la composición de un mortero se deben determinar en el laboratorio los datos de densidad específica para cada agregado a condiciones de superficie saturada seca ( $\rho_{ssd}$ ) y el coeficiente de absorción de agua de cada muestra de agregado fino (**%Abs**) (Tabla 5.2). Estos datos se obtuvieron siguiendo las normas NTE INEN 856 y ASTM C128, respectivamente.

**Tabla 5.2.** Densidad específica y coeficiente de absorción de los agregados.

| Parámetro  | Arena Beige<br>(BS) | Piedra Azul<br>(BP) | Arena Roja Lavada<br>(FS) |
|--|---------------------|---------------------|---------------------------|
| Densidad Aparente, <b>d</b><br>(g/cm <sup>3</sup> )              | 2.361               | 2.447               | 2.363                     |
| Densidad Relativa @ ssd,<br>$\rho_{ssd}$ (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.455               | 2.532               | 2.467                     |
| Densidad Relativa, $\rho$<br>(g/cm <sup>3</sup> )                | 2.607               | 2.674               | 2.638                     |
| Absorción de Agua (%Abs)   | 4.0                 | 3.5                 | 4.4                       |
| *Superficie ponderada<br>Media, $\bar{S}_T$ (m <sup>2</sup> /kg) | 9.27                | 7.90                | 8.18                      |

Mientras que, del análisis granulométrico, se conoce el diámetro equivalente de partícula (**D<sub>n</sub>**) para los granos que quedan retenidos en el tamiz de menor tamaño, lo corresponde al promedio del diámetro de apertura de los tamices (**d<sub>tn</sub>**) (ecuación (5.1)).

$$D_n = \frac{d_{tn} + d_{t(n+1)}}{2} \quad (5.1)$$

Por ejemplo, para la grava calculamos  $D_1, D_2, \dots, D_7$ :



$$D_1 = \frac{d_{t1} + d_{t2}}{2} = \frac{38.1 + 25.4}{2} = 31.75 \text{ mm}$$

$$D_7 = \frac{d_{t7} + d_t}{2} = \frac{2.36 + 0.00}{2} = 1.18 \text{ mm}$$

Para  $D_1$ , pasa tamiz 1½" ( $d_{t1} = 38.1 \text{ mm}$ ) y se retiene en tamiz 1" ( $d_{t2} = 25.4 \text{ mm}$ ); para  $D_7$ , pasa tamiz N° 8 ( $d_{t7} = 2.36 \text{ mm}$ ) y se retiene en la base de fondo ( $d_t = 0.00 \text{ mm}$ ).

En este caso, el valor de  $\rho_{ssd}$  se mantiene constante diámetro específico ( $D_n$ ) para calcular el número de partículas ( $N_n$ ) en 1 kg de árido (ecuación (5.2)).

$$N_n = \frac{V_{ssd}(1 \text{ kg})}{V_n} = \frac{\frac{1}{\rho_{ssd}} \cdot 10^6}{\frac{4}{3} \pi \cdot \left(\frac{D_n}{2}\right)^3} \quad (5.2)$$

$V_{ssd}$  = volumen de 1 kg de partículas y  $V_n$  = volumen de partícula de diámetro  $D_n$  en unidades de [ $\text{mm}^3$ ];  $\rho_{ssd}$  en [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ].

Partiendo de los datos del análisis granulométrico, la superficie específica de las partículas ( $S_n$ ) en [ $\text{m}^2$ ], viene dada por la ecuación (5.3):

$$S_n = N_n \cdot \pi \cdot (D_n)^2 \cdot 10^{-6} \quad (5.3)$$

También, de la granulometría conocemos el porcentaje (m/m) de la masa retenida acumulada de partículas en cada tamiz ( $m_{Dn}$ ) y el porcentaje (m/m) de la masa retenida acumulada de toda la muestra ( $m_T = \sum m_{Dn}$ ).

Por lo tanto, la superficie total ponderada de cada partícula ( $\bar{S}_n$ ) y la superficie total ponderada de toda la muestra ( $\bar{S}_T$ ) (Tabla 5.2) vienen dadas por las ecuaciones (5.4) y (5.5), respectivamente.

$$\bar{S}_n = \frac{m_{Dn}}{\sum m_T} \cdot S_n \quad (5.4)$$

$$\bar{S}_T = \sum \bar{S}_n \quad (5.5)$$

Según el Método del Mortero Equivalente se debe reemplazar la masa de la grava en el HAC por una cantidad de masa de agregado fino que tenga la misma superficie específica (ecuación (5.6)). Por lo tanto:

$$m_G \cdot \bar{S}_G = m_F \cdot \bar{S}_F \quad (5.6)$$

Donde, las superficies ponderadas totales específicas ( $\bar{S}_T$ ) para la grava y el agregado fino se definen como  $\bar{S}_G$  y  $\bar{S}_F$ ; mientras, la masa de grava de referencia y la masa de agregado fino de reemplazo son  $m_G$  y  $m_F$ , respectivamente.

En este punto, es importante recordar que para cada agregado fino la referencia es la Fase 1 (F1) de la arena beige (BS). Se asigna el subíndice "F" para posteriormente referirnos a cualquier Fase.

La masa total de agregado fino ( $m_{F1T}$ ) para formular el MEH, viene dada por la suma de la masa inicial de referencia del agregado fino ( $m_{F1}^\circ$ ) más la masa de agregado fino ( $m_{F1}$ ) que reemplaza a la cantidad de grava ( $m_G$ ) de una determinada área ponderada específica ( $\bar{S}_G$ ) (ecuación (5.7)).

$$m_{F1T} = m_{F1}^\circ + m_{F1} = m_{F1}^\circ + \frac{m_G \cdot \bar{S}_G}{\bar{S}_{F1}} \quad (5.7)$$

$m_{F1}^\circ (BS) = 750 \text{ kg}$  y  $m_G = 750 \text{ kg}$ , referencias para el HAC en Ecuador.

Así, aplicando la ecuación (5.6) se puede calcular las masas para los MEH de la Fase 1 para cada una de las arenas (ecuación (5.8)).

$$m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1} (BS) = m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1} (BP) = m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1} (FS) \quad (5.8)$$

Se deben emplear las masas de los agregados a condiciones de superficie saturada seca (**ssd**), es decir, sin el agua de absorción, por lo que se debe agregar el agua absorbida para formular el MEH según la ecuación (5.9).

$$m_{AT} = m_A^\circ + m_{AF} = m_A^\circ + m_{FT} \cdot \frac{\%Abs(F)}{100} \quad (5.9)$$

Donde  $m_{AT}$ ,  $m_A^\circ$  y  $m_{AF}$  son las masas correspondientes a: agua total, agua inicial de la relación agua/cemento (a/c) y agua absorbida; mientras que, **%Abs(F)** representa el

coeficiente de absorción de agua (Tabla 5.2) para la correspondiente Fase del agregado fino.

En el siguiente ejemplo se muestran los cálculos de la formulación del MEH para la arena beige (BS) con los valores recomendados para el HAC de referencia.

$$m_{FT} = 750 \text{ kg} + \frac{750 \text{ kg} \cdot 0.3326 \text{ m}^2}{9.2683 \text{ m}^2} = 776.91 \text{ kg}$$

$$m_{AT} = 208 \text{ kg} + 776.91 \text{ kg} \cdot \frac{4}{100} = 239.08 \text{ kg}$$

$$m_C^\circ = 520 \text{ kg} \quad \text{Masa de referencia para el cemento}$$

Así, los cálculos resultan en una relación arena/cemento  $R_{(s/c)}$  de 1.494 y una relación agua/cemento  $R_{(a/c)}$  de 0.40.

A continuación, se explican los cálculos para la Fase 2 y la Fase 3.

#### 5.4.2 Cálculos para preparar los MEH para las Fases 2 y 3.

En estos dos casos, se separaron los distintos tamaños de diámetro de granos de la Fase 1 según su granulometría. Luego se procedió a determinar la densidad específica para cada tamaño de grano a condiciones de superficie saturada seca y el coeficiente de absorción de agua de cada una de estas fracciones. Posteriormente, se recombinaron las distintas fracciones acorde a su granulometría inicial y conformando las 3 Fases.

Para cada Fase (F), se calculó el coeficiente de absorción de agua ponderado  $\%Abs(F)$ , conociendo el coeficiente de absorción de agua  $\%Abs(D_n)$  y la masa retenida acumulada de partículas en cada tamiz ( $m_{Dn}$ ) para cada tamaño de granos ( $D_n$ ) (ecuación (5.10)).

$$\%Abs(F) = m_{D_1} \cdot \%Abs(D_1) + m_{D_2} \cdot \%Abs(D_2) + \dots + m_{D_n} \cdot \%Abs(D_n) \quad (5.10)$$

Por otra parte, empleando la ecuación (5.2) con el valor de densidad específica  $\rho_{ssd}$  ( $D_n$ ) para cada intervalo de tamaño de granos, se repiten los cálculos como se realizaron para la Fase 1, obteniéndose la superficie total ponderada para cada una de las demás Fases,  $\bar{S}_T(F) = \bar{S}_F$ .

Es importante resaltar que en el cálculo de los MEH para las Fases 2 y 3 debemos reemplazar tanto la arena de la Fase 1 como la grava. Así, empleando una relación similar a la ecuación (5.8), para cada Fase de cada arena se obtiene la ecuación (5.11).

$$m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1} (BS) = m_{F2T} \cdot \bar{S}_{F2} (F2) = m_{F3T} \cdot \bar{S}_{F3} (F3) \quad (5.11)$$

Por medio de la ecuación (5.11), tenemos que:

$$m_{F2T} = \frac{m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1}}{\bar{S}_{F2}} \quad (\text{masa Fase 2})$$

$$m_{F3T} = \frac{m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1}}{\bar{S}_{F3}} \quad (\text{masa Fase 3})$$

El cálculo modelo de las proporciones de los materiales para preparar un MEH con la arena de la Fase 2 de la BS se presenta a continuación:

$$m_{F1T}(BS) = 776.91 \text{ kg};$$

$$m_{F2T}(BS) = 776.91 \text{ kg} \cdot \frac{9.2683 \text{ m}^2}{13.3611 \text{ m}^2} = 538.93 \text{ kg}$$

Así, las masas  $m_{F1T}$  y  $m_{F2T}$  tendrán la misma superficie ponderada, es decir, son equivalentes.

Para  $m_{F2T}$  (BS) tenemos una relación  $s/c = 538.93 \text{ kg}/520 \text{ kg} = 1.036$ .

El agua total necesaria para una  $R_{(a/c)} = 0,40$  empleando la F2 (BS) como agregado fino y una absorción  $\%Abs(F2) = 4.78\%$ , se obtiene según:

$$m_{aT}(BS) = 208 \text{ kg} + 538.93 \text{ kg} \cdot \frac{4.78\%}{100} = 233.76 \text{ kg}$$

Donde,  $m_a^\circ = R_{(a/c)} \cdot m_c^\circ = 0.40 \cdot 520 \text{ kg} = 208 \text{ kg}$  de agua de la relación a/c.

Finalmente, se debe calcular la dosificación del aditivo para las mezclas de MEH. El Viscocrete es un aditivo líquido base agua, por lo que es necesario tomar en cuenta esta cantidad de agua para no alterar la relación a/c de las formulaciones.

Se debe añadir el porcentaje de aditivo **%Ad** (% mc) con relación a la masa del cemento, por lo que el aporte de agua del aditivo ( $m_{AAd}$ ) viene dado por la ecuación (5.12).

$$m_{AAd} = m_c^{\circ} \cdot \frac{\%Ad}{100} \quad (5.12)$$

De esta manera, partiendo de las ecuaciones (5.8) y (5.12), se calcula la masa agua destilada corregida ( $m_{AT}^*$ ) para el amasado (ecuación (5.13)).

$$m_{AT}^* = m_a^{\circ} + m_{AF} - m_{AAd} = m_a^{\circ} + m_{FT} \cdot \frac{\%Abs(F)}{100} - m_c^{\circ} \cdot \frac{\%Ad}{100} \quad (5.13)$$

En la Tabla 5.3 se resumen los datos necesarios para realizar los cálculos para las mezclas de MEH de todas las arenas y sus Fases aplicando las ecuaciones (5.2) - (5.11). Posteriormente, solo se debe ajustar la relación a/c y realizar la corrección del agua para el amasado (ecuación (5.13)) según la masa de agua aportada por la concentración de aditivo seleccionada.

**Tabla 5.3.** Parámetro para el diseño de los MEH con las Fases 1, 2 y 3 de los agregados finos BS, BP y FS.

| <b>Agregado</b>    | <b>%Abs</b> | $\bar{S}_T$ (m <sup>2</sup> ) | $m_T$ (kg) | R <sub>(s/c)</sub> |
|--------------------|-------------|-------------------------------|------------|--------------------|
| <b>Grava</b>       |             |                               |            |                    |
| <i>Grava</i>       | -           | 0.3326                        | 750.00     | 1.442              |
| <b>Arena Beige</b> |             |                               |            |                    |
| <i>Fase 1</i>      | 4.00        | 9.2683                        | 776.91     | 1.494              |
| <i>Fase 2</i>      | 4.78        | 13.3611                       | 538.93     | 1.036              |
| <i>Fase 3</i>      | 4.76        | 28.0334                       | 256.86     | 0.494              |
| <b>Piedra Azul</b> |             |                               |            |                    |
| <i>Fase 1</i>      | 3.50        | 7.9030                        | 911.14     | 1.752              |
| <i>Fase 2</i>      | 4.69        | 13.0024                       | 560.30     | 1.077              |
| <i>Fase 3</i>      | 5.06        | 17.6293                       | 254.12     | 0.489              |
| <b>Arena Roja</b>  |             |                               |            |                    |
| <i>Fase 1</i>      | 4.40        | 8.1797                        | 880.31     | 1.693              |
| <i>Fase 2</i>      | 3.80        | 14.0709                       | 514.797    | 0.990              |
| <i>Fase 3</i>      | 4.14        | 19.8369                       | 213.54     | 0.411              |

### 5.4.3 Preparación de las mezclas de los MEH.

Una vez definido los parámetros de los agregados para el diseño de los MEH se procede a realizar las respectivas mezclas a escala de laboratorio para su posterior medición en el Reómetro.

Para preparar bajas cantidades de mezcla del MEH se necesita muy poco aditivo y este tiende a ser bastante viscoso, por lo que puede formar grumos al dosificarse

directamente sobre la mezcla sólida. Debido a esto, la mejor práctica es preparar una solución diluida como se explica a continuación.

En un vaso de precipitados pequeño (30 mL) se coloca entre 20 y 25 mL de aditivo. Desde este vaso, se toma el aditivo con una pipeta Pasteur desechable de plástico. Se dosifican 20 g de aditivo concentrado completando con 80 g de agua destilada para un total de 100 g de aditivo diluido preparado en un vaso de 100 mL previamente tarado en conjunto con una barra magnética de agitación. Así cada alícuota de 10 g de la solución diluida contendrán 2 g de aditivo concentrado.

Luego, se pesan los 100 g de cemento en el vaso metálico de 200 mL previamente tarado en la balanza electrónica, luego se adiciona la cantidad calculada del agregado fino sobre el cemento y se homogenizan ambos con una espátula metálica obteniéndose una mezcla sólida seca.

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo para 100 g de cemento, %Ad = 2 % mc de aditivo, una  $R_{(a/c)}$  de 0.35 y la Fase 1 de la arena beige.

$$m_{FT} = R_{(s/c)} \cdot m_c^{\circ} = 1.494 \cdot 100 \text{ g} = 149.40 \text{ g de arena beige}$$

$$m_{AT}^* = m_a^{\circ} + m_{AF} - m_{AAd} = R_{(a/c)} \cdot m_c^{\circ} + m_{FT} \cdot \frac{\%Abs(F)}{100} - m_c^{\circ} \cdot \frac{\%Ad}{100}$$

$$m_{AT}^* = 0.35 \cdot 100 + 149.4 \cdot \frac{4}{100} - 100 \cdot \frac{2}{100} = 38.976 \text{ g de agua total.}$$

Así, se coloca 10 g de solución diluida de aditivo y se completa con 28.98 g (25 g a/c + 3.98 g Abs.) de agua destilada en un vaso de 60 mL. Luego se dosifica la mezcla líquida a la mezcla sólida y se homogeniza el MEH brevemente (~2 min) con una espátula metálica gruesa.

Finalmente, se coloca el vaso metálico con la mezcla MEH en la batidora y se introduce el aspa a una altura del fondo aproximada de 3.5 mm. La mezcla se bate a máxima velocidad (540 rpm) por 10 min, cubriendo el vaso con una tapa y un paño húmedo para evitar que el aire de la batidora seque la muestra y se formen escamas.

Esta muestra se trasvasa de forma inmediata al vaso de la geometría del reómetro y a continuación se explican los parámetros del reómetro para realizar las medidas.

#### **5.4.4 Parámetros para los ensayos reológicos de cizalla continua.**

Antes de iniciar cualquier ensayo reológico, se debe considerar un parámetro crítico para las medidas como lo es el diámetro de partícula ( $D_n$ ) que del agregado de la Fase 1. Éste no debe ser mayor a un tercio (1/3) del valor gap lateral entre la copa y las aspas de la geometría de vanos. Por ende, el gap de fondo también debe ajustarse a este valor.

El gap lateral empleado es  $12.0 \pm 0,2$  mm, por esta razón las partículas del agregado se seleccionan con un diámetro menor a 3.0 mm (tamiz 2.36 mm). Teniendo en cuenta que las partículas más grandes pueden presentar cierta angularidad, se seleccionó un gap de fondo de 3500  $\mu$ m para medir las Fases 1 y 2, mientras que para la Fase 3 se ajustó a 1000  $\mu$ m para evitar cualquier acumulación de sedimentos en el fondo del vaso.

Cabe destacar que, se realizaron medidas con distintos gaps de fondo para la Fase 3 y no hubo diferencias significativas en las curvas de flujo, pero al realizar varias medidas en la misma muestra, ésta se sedimentaba.

#### **5.4.5 Ajustes iniciales de la concentración de aditivo y la relación agua/cemento (a/c) para las mezclas de MEH.**

En el Capítulo IV se estudió la selección del plastificante apropiado para el diseño de los MEH y los HACs, estos resultados se tomarán como base de partida en este capítulo para el estudio inicial de la reología de los MEH. Por lo cual, se hará referencia a los resultados reológicos de esfuerzo fluyente y viscosidad plástica para las pastas de cemento CPV formuladas con cemento Armaduro (AM), una a/c de 0.35 y con el superplastificante (SP) Viscocrete a 2 % mc.

En este estudio, se realizarán ensayos preliminares con concentraciones del aditivo Viscocrete 4100 de 2.0 y 2.5 % mc; relaciones agua/cemento de 0.30, 0.35 y 0.40; los cementos SA y AM; y los agregados finos BS y BP.

Para este estudio se seleccionaron dos tipos de agregados (Fase 1) con distintas características físicas. Un agregado natural con partículas redondeadas (BS) y una DTP

discontinua, con  $\rho_{ssd} = 2.455 \text{ g/cm}^3$ ,  $\bar{D}_{max} = 0.42 \text{ mm}$ ,  $\bar{S}_T = 9.27 \text{ m}^2$  y %Abs = 4.0%; y otro con granos angulares proveniente de un proceso de trituración (BP) y una DTP continua, con  $\rho_{ssd} = 2.532 \text{ g/cm}^3$ ,  $\bar{D}_{max} = 0.22 \text{ mm}$ ,  $\bar{S}_T = 7.90 \text{ m}^2$  y %Abs = 3.5%. Es importante señalar que, la gradación discontinua de BS se debe a una mayor proporción de finos, lo cual se nota en la distribución bimodal de la gráfica granulométrica de BS (Figura 5.3), los cuales contribuyen al aumento del área superficial total ponderada de la arena natural.

Por otra parte, se seleccionaron los cementos con diferentes contenidos de ceniza volcánica, SA (42.6%) y AM (30.6). A continuación, se discuten los resultados obtenidos.

#### **5.4.6 Resultados del estudio de la concentración del aditivo Viscocrete en la formulación de los MEH.**

En la Figura 5.7 se presentan los resultados de las CFE de esfuerzo de corte ( $\tau$ ) vs. tasa de corte ( $\dot{\gamma}$ ) para los cementos SA y AM, w/c de 0.30, 0.35 y 0.40, a 2.0 % mc de aditivo con las arenas BS y BP. En términos generales, se puede observar para todas las CFE una disminución del límite de fluencia con el aumento de la a/c, siendo esta variación más marcada para la mezcla con cemento SA y la arena BS (SA\_BS\_2.0%AD). También, se observa que a medida que aumenta el contenido de agua en la mezcla hay un cambio ligero en el comportamiento de flujo del MEH. Este efecto es más marcado para la mezcla de cemento AM y la arena BS (AM\_BS\_2.0%AD). Mientras que, con relación al tipo de agregado empleado, se observan mayores límites de fluencia para el MEH SA\_BP\_2.0AD.

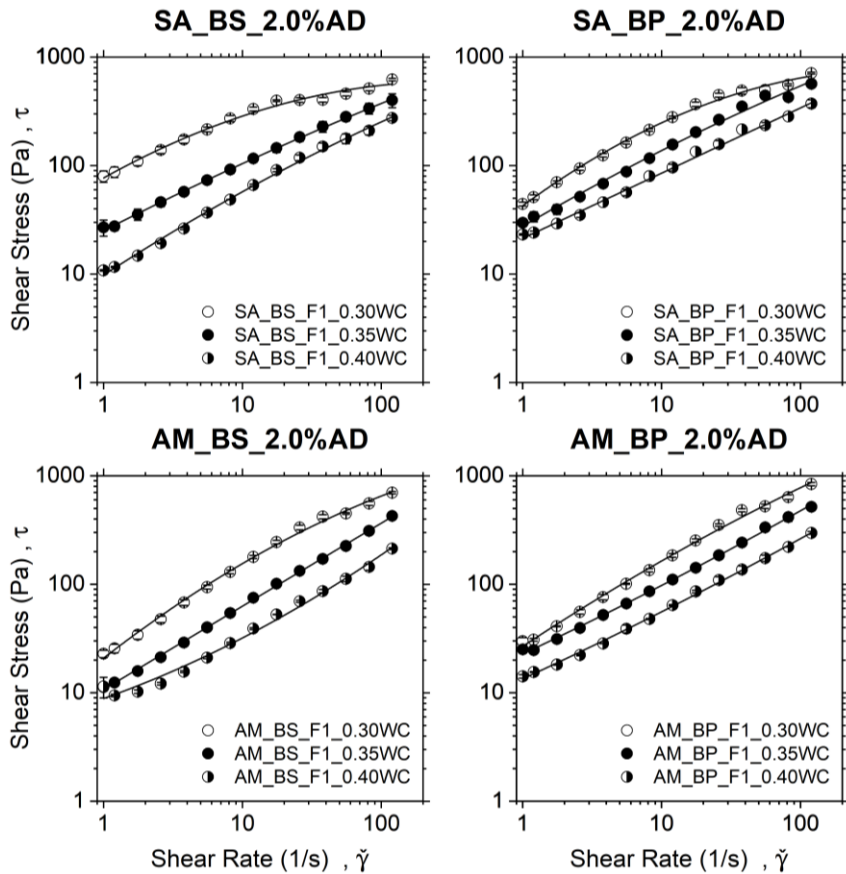


Figura 5.7. CFE para los MEH de SA y AM con BS y BP al 2.0 % mc de aditivo.

Con respecto a la viscosidad plástica, en la Figura 5.7 se puede apreciar que hay un cambio más pronunciado en las pendientes de las CFE cuando se emplea el cemento Armaduro.

En la Figura 5.8 se muestran las CFE ( $\tau$  vs.  $\dot{\gamma}$ ) para los cementos SA y AM, a/c de 0.30, 0.35 y 0.40, a 2.5 % mc de aditivo con las arenas BS y BP. Se observa una disminución del límite de fluencia con el aumento de la a/c, siendo esta variación más marcada para la mezcla con cemento AM y la arena BS (AM\_BS\_2.5%AD). Además, se observa que a medida que aumenta la a/c hay cambio en el comportamiento de flujo del MEH, desde adelgazamiento por cizalla (0.30), a pseudo-newtoniano (0.35), hasta espesamiento por cizalla (0.40). Este efecto es más marcado para la mezcla de cemento AM y la arena BS (AM\_BS\_2.5%AD). Mientras que, con relación al tipo de agregado empleado, se observan mayores límites de fluencia para el MEH SA\_BP\_2.5AD.



En las CFE de la Figura 5.8, se aprecia que la viscosidad plástica tiene cambio más pronunciado (mayor pendiente) cuando se emplea el cemento Armaduro y su valor aumenta cuando aumenta la concentración de aditivo de 2.0 % mc a 2.5 % mc. En general, no se observa un cambio muy marcado en el límite de fluencia cuando se aumenta la concentración de aditivo. Solo para el MEH AM\_BS\_2.5%AD cuando a/c es 0.40, se observa una disminución significativa en el límite de fluencia.

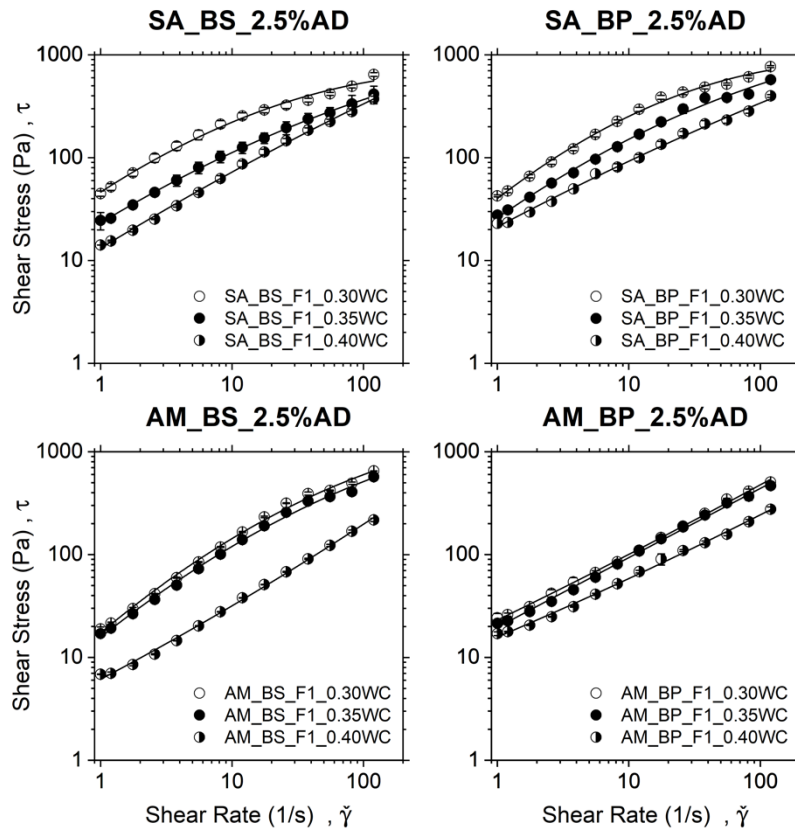


Figura 5.8. CFE para los MEH de SA y AM con BS y BP al 2,5 % mc de aditivo.

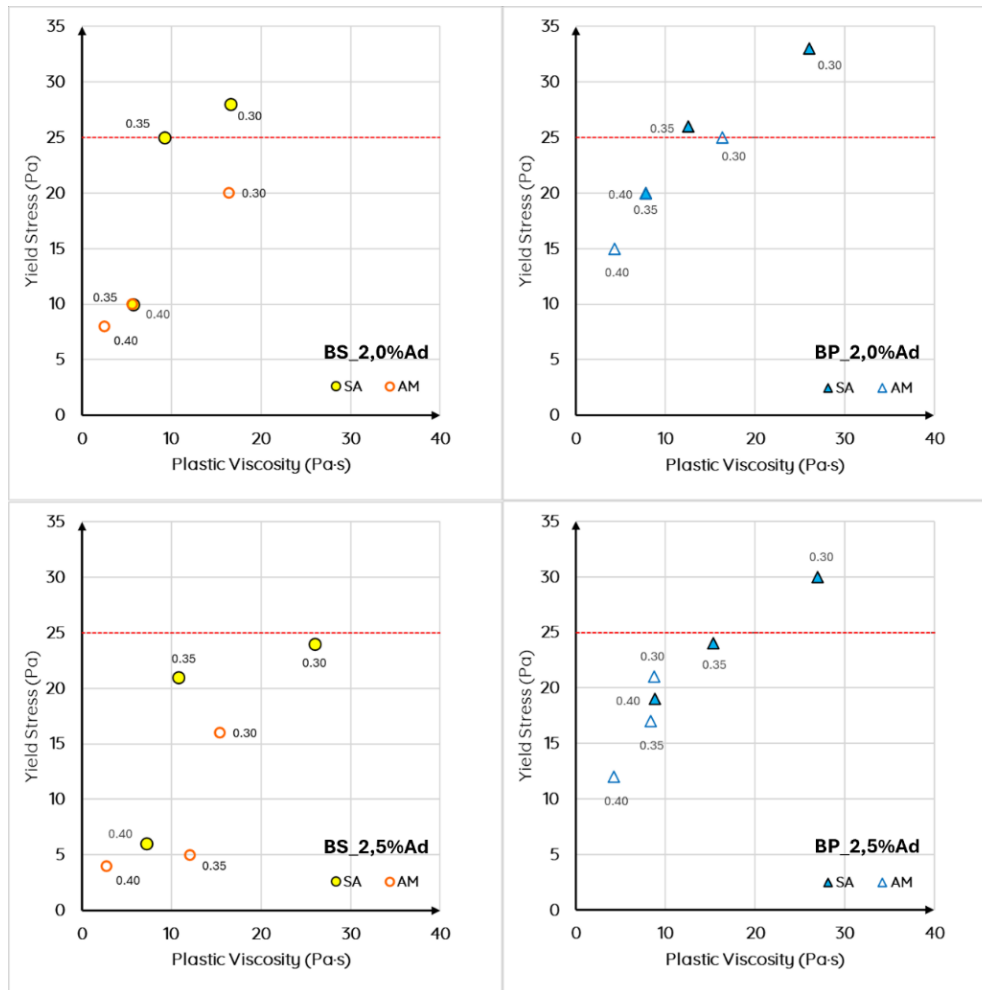


Figura 5.9. Cajas de trabajabilidad para los MEH de SA y AM con BS y BP.

Debido al volumen de datos que se ha presentado es mejor dilucidar las distintas tendencias y efectos observados empleando las cajas de trabajabilidad que resumen los resultados de esta sección.

En la Figura 5.9. se ha tomado como referencia (línea roja punteada) los datos para el MEH elaborado con cemento Armaduro (AM), la arena beige (BS), una a/c de 0.35 y una concentración de Viscocrete de 2.0 % mc. Se observan las siguientes tendencias:

- Al aumentar la a/c disminuye el límite de fluencia y la viscosidad plástica como es de esperarse.
- Al aumentar la a/c el cambio en viscosidad plástica es más pronunciado que el cambio en el límite de fluencia, mientras más agua tenga el MEH más fluida es la mezcla.

- Al aumentar el contenido de ceniza volcánica (CV) en el cemento, de AM a SA, se observa un aumento del límite de fluencia y la viscosidad plástica, siendo esta diferencia mayor a una baja a/c (0.30).
- Al aumentar la concentración de aditivo la viscosidad plástica aumenta más en particular a menor a/c en el caso de la arena BS. En contraste, un aumento en el %Ad de los MEH con la arena BP no afecta en gran medida los parámetros reológicos.
- Cuando se prepara los MEH con la arena BP (granos angulares) los valores de límite de fluencia son mayores que los obtenidos para la arena BS (granos redondeados).

Con respecto al tipo de cemento y los cambios en la a/c que constituyen los MEH, se concluye en base a los mismos efectos discutidos para las pastas de cemento Armaduro en el Capítulo III. La microestructura del cemento es más fuerte cuando se aumenta el contenido de ceniza volcánica o disminuye la a/c, por lo que los MEH formulados con las PC-SA tendrán mayores valores reológicos, los cuales pueden ser modulados preferiblemente cambiando el agregado fino (tamaño, forma, DTP) o variando la concentración de aditivo.

En estado estático, se observó segregación de los agregados y sangramiento para los morteros de cemento AM a una a/c de 0.40 (microestructura más débil), lo que lleva a suponer que el aumento de la fricción de las partículas a altas tasas de corte es el responsable de la distorsión de las líneas de flujo causando un efecto de espesamiento por cizalla aparente.

Por otra parte, con relación a la influencia de las características físicas de los agregados en las propiedades reológicas de los morteros preparados en esta sección, se discuten a continuación los efectos observados en las cajas de trabajabilidad (Figura 5.9).

Como vimos en la Sección 5.1, el área superficial ponderada de la arena BS, el volumen de los granos (menor densidad) y el valor de absorción de agua son mayores que los valores correspondientes para la arena BP, estos datos pudiesen llevar a pensar que la arena BS causaría un aumento en los valores reológicos de los MEH, lo cual no fue observado.

Sin embargo, el comportamiento reológico de los morteros analizados en la Figura 5.9 se puede explicar en función del tamaño y la morfología de los agregados minerales que lo constituyen. La arena beige (BS,  $\bar{D}_{max} = 0.42$  mm) posee un máximo de tamaño de partícula medio mayor que la piedra azul (BP,  $\bar{D}_{max} = 0.22$  mm); también, los granos de la arena BS son más redondeados que los de la arena BP. Esto lleva a concluir que, con los granos más grandes y redondeados la arena natural BS se producen morteros con menor límite de fluencia y menor viscosidad plástica con (Figura 5.9, izquierda).

En sentido opuesto, como observamos en la Figura 5.5, granos más angulares como los de la piedra triturada BP producen un aumento en los valores reológicos, sumado a que para cumplir con la condición del MEH, es decir, superficies equivalentes a la arena BS, se emplea una mayor cantidad en masa de la arena BP, lo cual aumenta su fracción volumétrica dentro de la mezcla fresca de la PC, causando un incremento adicional del límite de fluencia del mortero (Figura 5.9, derecha).

Finalmente, para los MEH con la arena BP, si aumentamos de 2.0 a 2.5 % mc la concentración de aditivo superplastificante disminuye la viscosidad plástica, siendo hasta un tercio menor para el cemento AM con una a/c = 0.30, produciendo un MEH con menor fluidez y trabajabilidad.

## 5.5 COMPOSICIÓN DE LOS MEHs.

La composición de los diferentes MEHs reológicamente probados en este estudio se muestra en [14] y en la Tabla 5.4. También se estudió el efecto de la finura de la arena en el comportamiento reológico de un determinado MEH, dividiendo la cantidad total de arena en tres tamaños máximos de partícula diferentes. Por lo tanto, F1 corresponde a la arena que pasa un tamiz de 2.36 mm, F2 incluye solo arena que pasa un tamiz de 0.30 mm y, finalmente, F3 contiene arena con un tamaño máximo de 0.149 mm (ver la última columna en la Tabla 5.4).

**Tabla 5.4.** Parámetro para el diseño de los MEH con las Fases 1, 2 y 3 de los agregados finos BS, BP y FS.

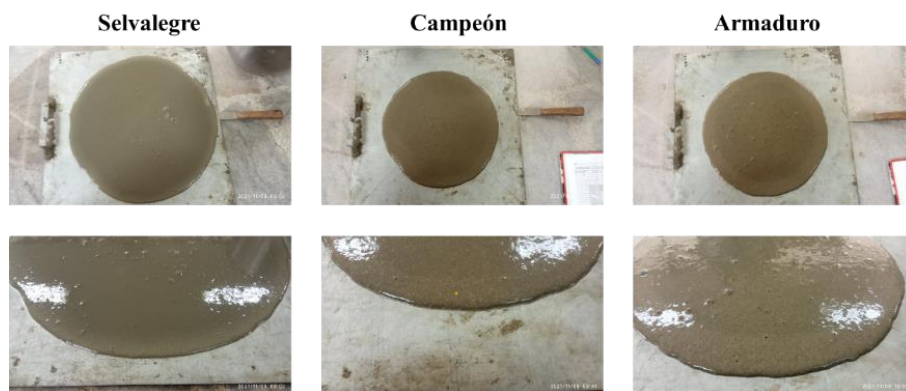
| Cemento | Arena | Arena/Cemento<br>(s/c) | Agua/Cemento<br>(a/c) | Aditivo<br>(%) | Fi/Cemento<br>(Fi/c) |
|---------|-------|------------------------|-----------------------|----------------|----------------------|
| SA      | BS    | 1.49                   | 0.30                  | 2.00           | 1.49 (F1)            |
|         |       |                        | 0.35                  |                | 1.03 (F2)            |
|         |       |                        | 0.40                  |                | 0.34 (F3)            |
|         | BP    | 1.75                   | 0.30                  |                | 1.75 (F1)            |
|         |       |                        | 0.35                  |                | 1.08 (F2)            |
|         |       |                        | 0.40                  |                | 0.49 (F3)            |
|         | FS    | 1.69                   | 0.30                  |                | 1.69 (F1)            |
|         |       |                        | 0.35                  |                | 0.99 (F2)            |
|         |       |                        | 0.40                  |                | 0.41 (F3)            |
| CO      | BS    | 1.49                   | 0.30                  | 2.00           | 1.49 (F1)            |
|         |       |                        | 0.35                  |                | 1.03 (F2)            |
|         |       |                        | 0.40                  |                | 0.34 (F3)            |
|         | BP    | 1.75                   | 0.30                  |                | 1.75 (F1)            |
|         |       |                        | 0.35                  |                | 1.08 (F2)            |
|         |       |                        | 0.40                  |                | 0.49 (F3)            |
|         | FS    | 1.69                   | 0.30                  |                | 1.69 (F1)            |
|         |       |                        | 0.35                  |                | 0.99 (F2)            |
|         |       |                        | 0.40                  |                | 0.41 (F3)            |
| AM      | BS    | 1.49                   | 0.30                  | 2.00           | 1.49 (F1)            |
|         |       |                        | 0.35                  |                | 1.03 (F2)            |
|         |       |                        | 0.40                  |                | 0.34 (F3)            |
|         | BP    | 1.75                   | 0.30                  |                | 1.75 (F1)            |
|         |       |                        | 0.35                  |                | 1.08 (F2)            |
|         |       |                        | 0.40                  |                | 0.49 (F3)            |
|         | FS    | 1.69                   | 0.30                  |                | 1.69 (F1)            |
|         |       |                        | 0.35                  |                | 0.99 (F2)            |
|         |       |                        | 0.40                  |                | 0.41 (F3)            |



### 5.5.1 Comportamiento reológico de los MEHs-F1.

Se estudio los efectos que causan sobre la curva de flujo estacionario (CFE) del MEH-F1, el tipo de cemento, la relación agua/cemento, y el tipo de arena. El modelo de Bingham Modificado se ajustó a los datos experimentales y los parámetros del modelo resultantes se muestran en la Tabla 5.5.

En la Tabla 5.5 se puede observar que el signo del coeficiente de segundo orden es negativo en todos los casos, lo que indica que la presencia de arena F1 elimina el comportamiento esperado de espesamiento por corte obtenido cuando se utilizó aditivo Viscocrete en las formulaciones de PC. Esto puede deberse a que posiblemente la presencia de arena F1 reduce la capacidad de adsorción de las moléculas de copolímero en las partículas de cemento. Por otro lado, el límite elástico disminuye cuando aumenta la relación  $a/c$ . Este es un resultado esperado porque un mayor contenido de agua debe dar lugar a un aumento de la fluidez del mortero. Por otro lado, se puede ver que no se obtuvieron diferencias significativas en los valores de límite elástico y viscosidad del plástico usando diferentes CPV. Por lo tanto, los MEH-F1 formulados con las tres CPV debería fluir y sangrar de manera similar. Esta conjetura podría confirmarse mediante la inspección de los resultados del minicono mostrados en la Figura 5.10 porque, como puede verse, no se pudieron detectar diferencias apreciables en el tamaño y el sangrado de las tres pruebas de asentamiento.



**Figura 5.10.** Resultados mini cono de Abrams MEH-F1. Arena BS.  $a/c = 0.30$ . 2%ca Viscocrete.

**Tabla 5.5.** Parámetros de la ecuación de Bingham Modificado. MEH-F1.

| Cemento    | Agregado | $a/c$ | $\tau_{MB} (Pa)$ | $\eta_p (Pa.s)$ | $c (Pa.s^2)$         | $R^2$  |
|------------|----------|-------|------------------|-----------------|----------------------|--------|
| Selvalegre | BS       | 0.30  | $28 \pm 2$       | $16.6 \pm 0.3$  | $-(0.43 \pm 0.08)$   | 0.9930 |
|            |          | 0.35  | $25 \pm 2$       | $9.2 \pm 0.5$   | $-(0.08 \pm 0.01)$   | 0.9979 |
|            |          | 0.40  | $10 \pm 2$       | $5.7 \pm 0.1$   | $-(0.047 \pm 0.002)$ | 0.9999 |
|            | BP       | 0.30  | $33 \pm 3$       | $26 \pm 1$      | $-(0.32 \pm 0.03)$   | 0.9983 |
|            |          | 0.35  | $26 \pm 1$       | $12.5 \pm 0.4$  | $-(0.091 \pm 0.009)$ | 0.9995 |
|            |          | 0.40  | $20 \pm 1$       | $7.8 \pm 0.2$   | $-(0.07 \pm 0.006)$  | 0.9994 |
|            | FS       | 0.30  | $30 \pm 1$       | $13.4 \pm 0.1$  | $-(0.146 \pm 0.002)$ | 0.9970 |
|            |          | 0.35  | $25 \pm 1$       | $8.2 \pm 0.1$   | $-(0.08 \pm 0.001)$  | 0.9980 |
|            |          | 0.40  | $12 \pm 1$       | $4.2 \pm 0.3$   | $-(0.033 \pm 0.006)$ | 0.9982 |
| Campeón    | BS       | 0.30  | $30 \pm 2$       | $17 \pm 1$      | $-(0.19 \pm 0.02)$   | 0.9988 |
|            |          | 0.35  | $25 \pm 1$       | $10 \pm 1$      | $-(0.089 \pm 0.008)$ | 0.9992 |
|            |          | 0.40  | $15 \pm 1$       | $7 \pm 1$       | $-(0.062 \pm 0.005)$ | 0.9994 |
|            | BP       | 0.30  | $35 \pm 2$       | $27 \pm 0.9$    | $-(0.29 \pm 0.02)$   | 0.9989 |
|            |          | 0.35  | $30 \pm 2$       | $13.2 \pm 0.8$  | $-(0.08 \pm 0.02)$   | 0.9979 |
|            |          | 0.40  | $20 \pm 1$       | $7.8 \pm 0.4$   | $-(0.07 \pm 0.01)$   | 0.9981 |
|            | FS       | 0.30  | $30 \pm 2$       | $14.3 \pm 0.7$  | $-(0.12 \pm 0.02)$   | 0.9985 |
|            |          | 0.35  | $20 \pm 1$       | $8.5 \pm 0.3$   | $-(0.072 \pm 0.006)$ | 0.9995 |
|            |          | 0.40  | $10 \pm 1$       | $4.4 \pm 0.2$   | $-(0.033 \pm 0.004)$ | 0.9993 |
| Armadero   | BS       | 0.30  | $20 \pm 1$       | $16.4 \pm 0.2$  | $-(0.151 \pm 0.003)$ | 0.9999 |
|            |          | 0.35  | $10 \pm 1$       | $5.6 \pm 0.2$   | $-(0.019 \pm 0.003)$ | 0.9980 |
|            |          | 0.40  | $8 \pm 1$        | $2.5 \pm 0.2$   | $-(0.007 \pm 0.002)$ | 0.9960 |
|            | BP       | 0.30  | $25 \pm 1$       | $16.3 \pm 0.4$  | $-(0.13 \pm 0.01)$   | 0.9995 |
|            |          | 0.35  | $20 \pm 1$       | $7.8 \pm 0.4$   | $-(0.032 \pm 0.004)$ | 0.9979 |
|            |          | 0.40  | $15 \pm 1$       | $4.3 \pm 0.2$   | $-(0.018 \pm 0.003)$ | 0.9974 |
|            | FS       | 0.30  | $25 \pm 1$       | $8.8 \pm 0.3$   | $-(0.08 \pm 0.007)$  | 0.9994 |
|            |          | 0.35  | $15 \pm 1$       | $4.3 \pm 0.3$   | $-(0.015 \pm 0.003)$ | 0.9966 |
|            |          | 0.40  | $7 \pm 1$        | $2.1 \pm 0.1$   | $-(0.007 \pm 0.001)$ | 0.9985 |

Para mejorar el rendimiento de los CPV como componentes básicos en las formulaciones de HAC, se probó la influencia de la finura de la arena en los parámetros del modelo de Bingham modificado, especialmente con el objetivo de detectar posibles cambios en el signo del coeficiente de segundo orden.

### **5.5.2 Comportamiento reológico de los MEHs-F2 y MEHs-F3.**

Se redujo la finura de las arenas manteniendo el tipo de arena y el total del área superficial específica como constantes. Por lo tanto, además de los MEH-F1, también se realizó el estudio de los Morteros Equivalentes al Hormigón etiquetados como MEH-F2 y MEH-F3. Si bien los MEH-F2 son equivalentes para morteros con un tamaño máximo de partícula de arena de 0.30 mm, los MEH-F3 corresponden a morteros equivalentes con un tamaño máximo de partícula de arena de 0.149 mm.

Los parámetros de la ecuación de Bingham modificada ajustada a los datos experimentales correspondientes a las CFE MEHs-F2 y MEHs-F3 se muestran en las Tablas 5.6 y 5.7. Como se puede observar, el signo del parámetro de segundo orden cambia de negativo a positivo cuando la finura de la arena disminuye. La conclusión general es que la efectividad del aditivo Viscocrete para mantener las partículas de cemento separadas aumenta cuando las partículas de arena son más pequeñas. De esta manera, se puede ver el comportamiento de espesamiento por corte a altas velocidades de corte con algunos MEHs-F3. Además, las partículas de menor tamaño deben favorecer el flujo del MEH, actuando como cojinetes efectivos. Esto es consistente con el hecho de que los límites elásticos son menores con los MEHs-F3 que con los con MEHs-F2 y, en este último caso, son inferiores que con los MEHs-F1.

**Tabla 5.6.** Parámetros de la ecuación de Bingham Modificado. MEH-F2.

| Cemento    | Agregado | $a/c$ | $\tau_{MB} (Pa)$ | $\eta_p (Pa.s)$ | $c (Pa.s^2)$         | $R^2$  |
|------------|----------|-------|------------------|-----------------|----------------------|--------|
|            | BS       | 0.30  | $15 \pm 2$       | $12 \pm 1$      | $-(0.11 \pm 0.02)$   | 0.9942 |
|            |          | 0.35  | $5 \pm 0.2$      | $4.3 \pm 0.08$  | $-(0.027 \pm 0.002)$ | 0.9998 |
|            |          | 0.40  | $5.4 \pm 0.4$    | $1.3 \pm 0.01$  | $-(0.004 \pm 0.001)$ | 0.9986 |
| Selvalegre | BP       | 0.30  | $3 \pm 0.2$      | $3.9 \pm 0.4$   | $\sim 0$             | 0.9941 |
|            |          | 0.35  | $0.8 \pm 0.2$    | $0.83 \pm 0.01$ | $0.021 \pm 0.001$    | 0.9998 |
|            |          | 0.40  | $0.9 \pm 0.3$    | $0.34 \pm 0.01$ | $0.007 \pm 0.001$    | 0.9993 |
|            | FS       | 0.30  | $10 \pm 2$       | $11.9 \pm 0.6$  | $-(0.12 \pm 0.01)$   | 0.9977 |
|            |          | 0.35  | $4 \pm 0.2$      | $3.8 \pm 0.1$   | $\sim 0$             | 0.9995 |
|            |          | 0.40  | $2.5 \pm 0.1$    | $1.03 \pm 0.05$ | $\sim 0$             | 0.9984 |
|            | BS       | 0.30  | $9 \pm 2$        | $9.5 \pm 0.5$   | $-(0.07 \pm 0.01)$   | 0.9976 |
|            |          | 0.35  | $6 \pm 0.3$      | $5.2 \pm 0.2$   | $-(0.025 \pm 0.005)$ | 0.9992 |
|            |          | 0.40  | $3 \pm 0.1$      | $1.2 \pm 0.05$  | $\sim 0$             | 0.9988 |
| Campeón    | BP       | 0.30  | $15 \pm 2$       | $18 \pm 1$      | $-(0.21 \pm 0.03)$   | 0.9957 |
|            |          | 0.35  | $5 \pm 0.2$      | $5.7 \pm 0.7$   | $\sim 0$             | 0.9919 |
|            |          | 0.40  | $3 \pm 0.1$      | $2.48 \pm 0.06$ | $\sim 0$             | 0.9994 |
|            | FS       | 0.30  | $12 \pm 1$       | $1.14 \pm 0.09$ | $0.025 \pm 0.003$    | 0.9972 |
|            |          | 0.35  | $6 \pm 0.2$      | $1.1 \pm 0.3$   | $-(0.025 \pm 0.009)$ | 0.9984 |
|            |          | 0.40  | $2.5 \pm 0.1$    | $0.97 \pm 0.03$ | $\sim 0$             | 0.9992 |
|            | BS       | 0.30  | $7 \pm 0.3$      | $5.8 \pm 0.1$   | $-(0.018 \pm 0.002)$ | 0.9994 |
|            |          | 0.35  | $2.5 \pm 0.1$    | $1.84 \pm 0.03$ | $0.004 \pm 0.001$    | 0.9998 |
|            |          | 0.40  | $2.5 \pm 0.1$    | $1.02 \pm 0.02$ | $\sim 0$             | 0.9998 |
| Armadero   | BP       | 0.30  | $6 \pm 0.2$      | $7 \pm 1$       | $\sim 0$             | 0.9866 |
|            |          | 0.35  | $2.5 \pm 0.1$    | $2.04 \pm 0.06$ | $0.008 \pm 0.001$    | 0.9993 |
|            |          | 0.40  | $2.4 \pm 0.2$    | $0.45 \pm 0.04$ | $\sim 0$             | 0.9967 |
|            | FS       | 0.30  | $5 \pm 0.3$      | $4.9 \pm 0.1$   | $-(0.007 \pm 0.001)$ | 0.9990 |
|            |          | 0.35  | $2.5 \pm 0.1$    | $1.58 \pm 0.03$ | $\sim 0$             | 0.9997 |
|            |          | 0.40  | $2.3 \pm 0.1$    | $0.63 \pm 0.04$ | $0.003 \pm 0.001$    | 0.9977 |

**Tabla 5.7.** Parámetros de la ecuación de Bingham Modificado. MEH-F3.

| Cemento    | Agregado | $a/c$ | $\tau_{MB} (Pa)$ | $\eta_p (Pa.s)$ | $c (Pa.s^2)$         | $R^2$  |
|------------|----------|-------|------------------|-----------------|----------------------|--------|
|            |          | 0.30  | $1 \pm 0.1$      | $1.1 \pm 0.2$   | $0.026 \pm 0.004$    | 0.9999 |
|            | BS       | 0.35  | $0.8 \pm 0.03$   | $0.32 \pm 0.02$ | $0.013 \pm 0.001$    | 0.9992 |
|            |          | 0.40  | $0.35 \pm 0.01$  | $0.15 \pm 0.01$ | $0.005 \pm 0.001$    | 0.9996 |
|            |          | 0.30  | $15 \pm 1$       | $20 \pm 2$      | $-(0.29 \pm 0.06)$   | 0.9904 |
| Selvalegre | BP       | 0.35  | $7 \pm 1$        | $8.4 \pm 0.8$   | $-(0.05 \pm 0.02)$   | 0.9925 |
|            |          | 0.40  | $4 \pm 1$        | $2.28 \pm 0.06$ | $-(0.005 \pm 0.001)$ | 0.9993 |
|            |          | 0.30  | $1.5 \pm 0.1$    | $0.98 \pm 0.09$ | $0.025 \pm 0.003$    | 0.9965 |
|            | FS       | 0.35  | $1.4 \pm 0.1$    | $0.42 \pm 0.02$ | $0.01 \pm 0.001$     | 0.9991 |
|            |          | 0.40  | $0.45 \pm 0.01$  | $0.13 \pm 0.01$ | $0.004 \pm 0.001$    | 0.9996 |
|            |          | 0.30  | $2.5 \pm 0.1$    | $2.8 \pm 0.2$   | $0.03 \pm 0.01$      | 0.9971 |
|            | BS       | 0.35  | $1.3 \pm 0.1$    | $0.64 \pm 0.06$ | $0.013 \pm 0.002$    | 0.9962 |
|            |          | 0.40  | $1 \pm 0.3$      | $0.27 \pm 0.01$ | $0.008 \pm 0.001$    | 0.9994 |
|            |          | 0.30  | $2.5 \pm 0.1$    | $1.12 \pm 0.05$ | $\sim 0$             | 0.9916 |
| Campeón    | BP       | 0.35  | $1.3 \pm 0.1$    | $0.6 \pm 0.01$  | $0.22 \pm 0.02$      | 0.9960 |
|            |          | 0.40  | $1 \pm 0.3$      | $0.24 \pm 0.03$ | $0.38 \pm 0.01$      | 0.9976 |
|            |          | 0.30  | $9.5 \pm 0.1$    | $10.9 \pm 0.7$  | $-(0.09 \pm 0.01)$   | 0.9961 |
|            | FS       | 0.35  | $1.3 \pm 0.1$    | $0.38 \pm 0.02$ | $0.01 \pm 0.001$     | 0.9990 |
|            |          | 0.40  | $0.4 \pm 0.1$    | $0.11 \pm 0.01$ | $0.004 \pm 0.001$    | 0.9997 |
|            |          | 0.30  | $0.92 \pm 0.03$  | $0.46 \pm 0.02$ | $0.012 \pm 0.001$    | 0.9994 |
|            | BS       | 0.35  | $0.85 \pm 0.02$  | $0.23 \pm 0.01$ | $0.007 \pm 0.001$    | 0.9996 |
|            |          | 0.40  | $0.25 \pm 0.01$  | $0.13 \pm 0.01$ | $0.004 \pm 0.001$    | 0.9998 |
|            |          | 0.30  | $1.03 \pm 0.03$  | $0.76 \pm 0.02$ | $0.019 \pm 0.001$    | 0.9997 |
| Armadero   | BP       | 0.35  | $1.01 \pm 0.04$  | $0.38 \pm 0.01$ | $0.007 \pm 0.001$    | 0.9989 |
|            |          | 0.40  | $0.31 \pm 0.01$  | $0.15 \pm 0.01$ | $0.004 \pm 0.001$    | 0.9998 |
|            |          | 0.30  | $0.85 \pm 0.01$  | $0.51 \pm 0.01$ | $0.011 \pm 0.001$    | 0.9999 |
|            | FS       | 0.35  | $0.4 \pm 0.01$   | $0.24 \pm 0.01$ | $0.005 \pm 0.001$    | 0.9999 |
|            |          | 0.40  | $0.37 \pm 0.01$  | $0.06 \pm 0.01$ | $0.003 \pm 0.001$    | 0.9991 |

### 5.5.3 Formulación de los HAC-CPV.

Se realizaron las pruebas de propagación con un mini cono de Abrams [2] con MEHs F1, F2 y F3 cuyos resultados se detallan en la Tabla 5.8. Como se puede observar, el diámetro de la propagación aumenta cuando disminuye el tamaño de grano de la arena utilizada para las formulaciones de MEH. Además, el tiempo de flujo  $T_{20}$ , es decir, el período entre el momento en que el mini cono sale de la placa base y el MEH toca el círculo de diámetro de 20 mm, se acorta cuando disminuye el tamaño de grano de la arena.

Los tres MEHs-F3 fueron los que mostraron los mejores resultados, es decir: menor tensión de fluencia, mayor viscosidad plástica, signo positivo del parámetro de segundo orden, mayor extensión y menor  $T_{20}$ . Las imágenes de las pruebas de propagación con los tres MEHs-F3 confirman esta afirmación, lo que se puede visualizar en la Figura 5.11. Es importante notar la ausencia de exudación. Por lo tanto, se seleccionaron estas tres formulaciones de MEHs-F3 para inferir las formulaciones de hormigón correspondientes.



**Figura 5.11.** Ensayos de minicono de MEH F3 seleccionados. Arena BS.  $aa/cc = 0,30$ . 2,0 % ca Viscocrete.

**Tabla 5.8.** Se seleccionaron los ensayos utilizando el mini cono Abrams de mortero equivalente detallado en las Tablas 5.5 – 5.7 con concreto normalizado según recomendación del Colegio Oficial de Ingenieros Civiles (Quito, Ecuador) (Tabla 5.1).

| Fase<br>MEH | Cemento<br>(kg) | Arena<br>(kg) | Agua/Cemento<br>(a/c) | 2%<br>Aditivo<br>(kg) | Absorción<br>agua<br>(kg) | T <sub>20</sub><br>(s) | d<br>(cm) |
|-------------|-----------------|---------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|-----------|
| F1          | SA              | BS            |                       |                       |                           |                        |           |
|             | 520.00          | 751.28        | 0.30                  | 10.40                 | 31.08                     | 15.54                  | 27.75     |
|             | CO              | BS            |                       |                       |                           |                        |           |
|             | 520.00          | 751.28        | 0.30                  | 10.40                 | 31.08                     | 13.25                  | 28.00     |
| F1          | AM              | BS            |                       |                       |                           |                        |           |
|             | 520.00          | 751.28        | 0.30                  | 10.40                 | 31.08                     | 8.12                   | 28.00     |
|             | SA              | BS            |                       |                       |                           |                        |           |
| F2          | 520.00          | 516.89        | 0.30                  | 10.40                 | 25.79                     | 7.45                   | 30.75     |
|             | CO              | BS            |                       |                       |                           |                        |           |
|             | 520.00          | 516.89        | 0.30                  | 10.40                 | 25.79                     | 5.10                   | 33.00     |
| F2          | AM              | BS            |                       |                       |                           |                        |           |
|             | 520.00          | 516.89        | 0.30                  | 10.40                 | 25.79                     | 4.17                   | 32.50     |
|             | SA              | BS            |                       |                       |                           |                        |           |
| F3          | 520.00          | 246.43        | 0.30                  | 10.40                 | 12.22                     | 3.48                   | 38.00     |
|             | CO              | BS            |                       |                       |                           |                        |           |
|             | 520.00          | 246.43        | 0.30                  | 10.40                 | 12.22                     | 3.91                   | 36.75     |
| F3          | AM              | BS            |                       |                       |                           |                        |           |
|             | 520.00          | 246.43        | 0.30                  | 10.40                 | 12.22                     | 3.21                   | 33.75     |

Las formulaciones de los hormigones se diseñaron conforme las recomendaciones dadas por el Colegio Oficial de Ingenieros Civiles (Quito, Ecuador) Tabla 5.1. Como se puede observar en la Tabla 5.9, el tiempo de escurrimiento T<sub>50</sub>, es decir, el período entre el momento en que el cono sale de la placa base y el hormigón toca el círculo de diámetro 500 mm, y el tamaño del esparcido confirman que son HAC cumplen las directrices europeas para la producción y uso de Hormigón Autocompactante, [15], [16], [17], [18].



Adicional, las imágenes de los ensayos de cono de Abrams esparcido con los tres hormigones confirman la ausencia de exudación Figura 5.12.

**Tabla 5.9.** Formulaciones de hormigón inferidas a partir de los MEH-F3 (Tabla 5.8) y las recomendaciones del Colegio Oficial de Ingenieros Civiles (Quito, Ecuador) (Tabla 5.1).

| Grava<br>(kg) | Cemento<br>(kg) | Arena (2.36 mm)<br>(kg) | Agua/Cemento<br>(a/c) | 2% Aditivo<br>(kg) | T <sub>20</sub><br>(s) | d<br>(cm) |
|---------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|-----------|
| 750.00        | 520.00          | 237.9                   | 0.30                  | 10.40              | 24.10                  | 86.3      |
| 750.00        | 520.00          | 237.9                   | 0.30                  | 10.40              | 17.83                  | 88.8      |
| 750.00        | 520.00          | 237.9                   | 0.30                  | 10.40              | 12.03                  | 93.0      |



**Figura 5.12.** Resultados del cono de Abrams correspondiente a los tres HAC-CPV inferidos a partir de los MEH-F3 correspondientes (arena BS, a/c = 0.30, 2.0 % ca aditivo Viscocrete).

## 5.6 REFERENCIAS.

- [1] I. Mehdipour, M. Vahdani, K. Amini, M. Shekarchi, Linking stability characteristics to material performance of self-consolidating concrete-equivalent-mortar incorporating fly ash and metakaolin, *Constr. Build. Mater.* 105 (2016) 206–217.
- [2] D. Sanchez de Guzmán, *Tecnología del concreto y del mortero*, Javeriana, Pontificia Universidad, 2001.
- [3] A. Schwartzentruber, C. Catherine, Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - a new tool to design concrete containing admixture, *Mater. Struct. Constr.* 33 (2000) 475–482.
- [4] R.J. Farris, Prediction of the Viscosity of Multimodal Suspensions from Unimodal Viscosity Data, *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*. 12 (1968) 281–301.
- [5] D. Jiao, C. Shi, Q. Yuan, X. An, Y. Liu, H. Li, Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review, *Cem. Concr. Compos.* 83 (2017) 146–159.
- [6] H. Brouwers, Self-compacting concrete: the role of the particle size distribution, in: *SCC'2005-China - 1st Int. Symp. Des. Perform. Use Self-Consolidating Concr.*, RILEM Publications SARL, 2005: pp. 109–118.
- [7] J.M. Tobes, A. Lopez, G. Giaccio, R. Zerbino, Diseño de Hormigón Autocompactante ( HAC ) con diferentes tipos de agregado grueso, *PHi-Planta Hormigón Int.* (2010).
- [8] A.C.P. Santos, J.A. Ortiz-Lozano, N. Villegas, A. Aguado, Experimental study about the effects of granular skeleton distribution on the mechanical properties of self-compacting concrete (SCC), *Constr. Build. Mater.* 78 (2015) 40–49.
- [9] T. Li, Y. Zhou, J. Zhu, J. Liu, Effect of fine aggregate gradation on the rheology of mortar, *Constr. Build. Mater.* 332 (2022) 127–362.
- [10] M. Westerholm, B. Lagerblad, J. Silfwerbrand, E. Forssberg, Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 274–282.
- [11] J. Hu, K. Wang, Effects of Size and Uncompacted Voids of Aggregate on Mortar Flow Ability, *J. Adv. Concr. Technol.* 5 (2007) 75–85.
- [12] M.Y. Yardimci, B. Baradan, M.A. Taşdemir, Effect of fine to coarse aggregate ratio

- on the rheology and fracture energy of steel fibre reinforced self-compacting concretes, *Proc. Eng. Sci.* 39 (2014) 1447–1469.
- [13] F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, L.M. Ordóñez-Belloc, Rheology of concrete: A study case based upon the use of the concrete equivalent mortar, *Mater. Struct. Constr.* 46 (2013) 587–605.
- [14] L.F. Naranjo-Herrera, N.M. Páez-Flor, F.J. Rubio-Hernández, Using Natural Raw Materials and CEM Approach for the Design of Andean Volcanic Self-Compacting Concretes, *Processes* 10 (2022) 1820.
- [15] N. Española, UNE-EN 12350-12 (Ensayos de hormigón fresco), (2011) 11–13.
- [16] S. Standard, B.S. Institute, Testing Fresh Concrete Part 2: Slump-Test, BS EN 12350-2 British Standard Institute London, UK, 2019, p. 12., (2005).
- [17] I. González-Taboada, B. González-Fonteboa, J. Eiras-López, G. Rojo-López, Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology, *J. Clean. Prod.* 156 (2017) 1–18.
- [18] G. Rodríguez de Sensale, L. Segura-Castillo, I. Rodríguez Viacava, R. Rolfi Netto, D. Miguez Passada, M.E. Fernández Iglesias, Hormigón autocompactante con fibras para premoldeados, *Hormigón y Acero* 69 (2018) 69–75.

## CAPÍTULO VI

### DISEÑO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES

#### 6.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presenta los estudios para definir la composición de los hormigones autocompactantes (HAC), tomando como base el método del mortero equivalente al hormigón (MEH) [1]. Además, se realiza el estudio en estado fresco y endurecido de los MEH y HAC, conforme el diseño definido [2], [3].

#### 6.2 DISEÑO TEÓRICO DE LOS HAC POR MEDIO DEL MÉTODO DEL MEH.

En el capítulo III, se describieron las ecuaciones necesarias para realizar los cálculos de la formulación de los MEH. Partiendo de éstas, se considera el cálculo inverso para determinar la masa de grava que debe tener el HAC, manteniendo siempre consistente el cálculo del área superficial total y por ende la correcta aplicación de la técnica del mortero equivalente [4].

Tomando los datos de referencia para la grava (Tabla 5.1 y Tabla 5.3) podemos calcular la superficie total ponderada que se obtiene al emplear 750 g del agregado grueso según la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$m_G \cdot \bar{S}_G (1 \text{ kg}) = 750 \text{ kg} \cdot 0.332 \text{ m}^2/\text{kg} = 249.95 \text{ m}^2$  . Aporte de los 750 kg de grava, referencia constante en todos los diseños HAC.

Para la Fase 1 de la BS según la ecuación 5.11, se tiene que:

$m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1} (BS) = 750 \text{ kg} \cdot 9.268 \text{ m}^2/\text{kg} = 6951.26 \text{ m}^2$  . Superficie ponderada total de referencia para los agregados BS, BP, FS y cada una de sus Fases.

Aplicando nuevamente la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** o la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede calcular las masas que se requiere de agregado o Fase necesarias para nuestro diseño del HAC manteniendo el concepto del MEH.

$$m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1} (BS) = m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1} (BP) = m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1} (FS) = 6951.26 \text{ m}^2 . \text{ Calcular las masas } m_{F1T} (BP) \text{ o } m_{F1T} (FS).$$

$$m_{F1T} \cdot \bar{S}_{F1} (BS) = m_{F2T} \cdot \bar{S}_{F2} (F2) = m_{F3T} \cdot \bar{S}_{F3} (F3) = 6951.26 \text{ m}^2 . \text{ Calcular las masas de cualquiera de las Fases } (m_{F2T} \text{ o } m_{F3T}) \text{ para una respectiva arena.}$$

Los cálculos de las cantidades de agua y aditivo teórico son los mismos que los empleados en el capítulo 3 para los MEH. A continuación, se presenta un modelo de cálculo para preparar un hormigón con Fase 3 de la arena beige.

$$m_c^\circ = 520 \text{ kg}; m_G = 750 \text{ kg}; R_{(a/c)} = 0.30; \%Ad = 2\% (m/m)$$

$$m_{F3T} \cdot \bar{S}_{F3} (F3) = 6951.26 \text{ m}^2 = m_{F3T} \cdot 28.033 \text{ m}^2 / \text{kg}$$

$$m_{F3T} = 246.96 \text{ kg de Fase 3 de la BS.}$$

### 6.3 DISEÑO PRÁCTICO DE LOS MEH Y LOS HAC PARA LOS ENSAYOS DE CONO DE ABRAMS Y/O ENSAYOS MECÁNICOS.

El diseño teórico de los MEHs se emplea directamente para preparar los ensayos reológico considerando una mezcla que se separa según sus tamaños de grano y que se seca por 24 h en un horno. Una extrapolación de esta metodología a una aplicación de campo sería inviable.

Por otra parte, el cálculo realizado en la sección anterior para los HACs presenta además del inconveniente del secado de la arena, una limitación en la selección de la grava según los distintos tamaños de encofrado que puedan surgir en una construcción de hormigón a gran escala donde se exija el comportamiento autocompactante para el hormigón.

A continuación, se describe el procedimiento para el diseño de los MEHs y los HACs, el cual sirve como preámbulo para los ensayos de Cono de Abrams [5].

### 6.3.1 Escalamiento del MEH y el HAC a casos prácticos.

En este ejemplo, se destaca el hecho de que el agregado fino se emplea tal como viene del saco del proveedor, ya sea muy húmedo o seco. Se considera poca variación en la granulometría del agregado fino.

Así, el operador de campo debe cernir la arena una sola vez para separar los granos mayores a 2.36 mm (Fase 1) o los granos correspondientes para producir las Fases 2 o Fase 3. Luego, se toman tres muestras del agregado resultante, se llevan a un horno a 110°C por 1 h y se calcula el porcentaje de agua de corrección para el saco (% H).

En la Tabla 6.1, se muestra un resumen del caso teórico y el caso práctico para el MEH y el HAC con la Fase 3 de la arena beige, una relación a/c de 0.30 y una concentración de aditivo del 2% mc.

**Tabla 6.1.** Escalamiento de las formulaciones MEH y HAC. Caso práctico.

| Mezcla. F3, BS                                    | MEH       |          | HAC       |          |
|---|-----------|----------|-----------|----------|
|   | Teórico   | Práctico | Teórico   | Práctico |
| <b>Cantidad</b>                                   |           |          |           |          |
| Cemento, $m_C^\circ$ (g)                          | 520.0     | 520.0    | 520.0     | 520.0    |
| Grava, $m_G$ (g)                                  | 0         | 0        | 750.0     | 750.0    |
| Agua, $m_A^\circ$ (g); $R_{(a/c)} = 0,30$         | 156.0     | 156.0    | 156.0     | 156.0    |
| Aditivo, $m_{AAd}$ (g); %Ad = 2,0%                | 10.4      | 10.4     | 10.4      | 10.4     |
| BS, $m_{F3T}$ (g) $\rho$ ssd                      | 256.9     | 256.9    | 248.0     | 248.0    |
| $m_{AF3}$ (g); %Abs (F3, BS) = 4,76%              | 12.2      | 12.2     | 11.8      | 11.8     |
| %Humedad Saco (%H)                                | 0         | 0.73     | 0         | 0.73     |
| BS saco, $m_{TF3}^*$ (g)                          | 256.9     | 246.4    | 248.0     | 237.9    |
| Masa Corregida (g) = $m_{F3T} - m_{TF3}^*$        | $m_{WAd}$ | 104      | $m_{WAd}$ | 10.1     |
| Agua Tota (g) = $m_A^\circ + m_{F3T} - m_{TF3}^*$ | 168.2     | 166.4    | 167.9     | 166.1    |



Los datos de masas resaltados en azul en la Tabla 6.1 representan las masas que se deben emplear para realizar una formulación a escala real de los MEH (ensayo de cono) y los HAC (ensayos a cualquier escala). Mientras, el dato de porcentaje de humedad resaltado en anaranjado es el dato crítico en este diseño de las mezclas.

De la tabla anterior se observa, una mayor cantidad de arena para el MEH debido a que ésta contiene la masa que reemplaza la grava, por lo que la masa de agua debida a la absorción natural de la arena también varía.

### 6.3.2 Selección del tamaño de grava para el HAC.

En el caso de la mezcla HAC en el apartado anterior, se considera toda la grava para su fórmula, pero dicha formulación no se ajusta a las especificaciones de un hormigón autocompactante [6], [7].

La Norma Europea EN12620 [8] contiene las especificaciones técnicas de los tamaños nominales para las partículas de la grava que debe tener un HAC. En este contexto, el diámetro de mencionadas partículas se debe encontrar entre 11.0 y 12.5 mm.

En la Figura 6.1 se observan las especificaciones técnicas para la selección de los tamices necesarios para gradar la grava para un HAC. El recuadro verde, indica el límite mínimo del diámetro de apertura de tamiz ( $d = 11.2$  mm) y la relación de éste con respecto al límite máximo (Ratio  $D/d = 4.0$ ) para obtener un hormigón autocompactante. Se recomienda usar entre el 25 y 70% de la grava que pase por el tamiz de mayor diámetro y se retenga en el menor diámetro, con una tolerancia de  $\pm 17.5\%$  para una aplicación práctica.

| Ratio $D/d$ | Size/<br>Mid size | Value of $d$   |                |                  |              |                   |               |               | Overall limits and tolerances at mid-size sieves (Percentage passing by mass) |   |            |
|-------------|-------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|---|---|------------|
|             |                   | 2              | 4              | 5,6              | 8            | 11,2              | 16            | 22,4          | Overall limits  | Tolerances on producer's declared typical grading |            |
|             |                   | mm             | mm             | mm               | mm           | mm                | mm            | mm            |   | $G_7,15$  | $G_7,17,5$ |
| 2,8         | Size<br>Mid-size  | 2/5,6<br>-     | 4/11,2<br>-    | 5,6/16<br>11,2   | 8/22,4<br>16 | 11,2/31,5<br>22,4 | 16/45<br>31,5 | 22,4/63<br>45 | 25 to 70  | ± 15  | -          |
| 4,0         | Size<br>Mid-size  | 2/8<br>-       | 4/16<br>8      | 5,6/22,4<br>11,2 | 8/31,5<br>16 | 11,2/45<br>22,4   | 16/63<br>31,5 |               | 25 to 70  | -   | ± 17,5     |
| 5,6         | Size<br>Mid-size  | 2/11,2<br>5,6  | 4/22,4<br>11,2 | 5,6/32<br>16     | 8/45<br>22,4 | 11,2/63<br>31,5   |               |               | 25 to 70  | -   | ± 17,5     |
| 8,0         | Size<br>Mid-size  | 2/16<br>8      | 4/31,5<br>16   | 5,6/45<br>22,4   | 8/63<br>31,5 |                   |               |               | 25 to 70  | -   | ± 17,5     |
| 11,2        | Size<br>Mid-size  | 2/22,4<br>11,2 | 4/45<br>22,4   | 5,6/63<br>31,5   |              |                   |               |               | 25 to 70  | -   | ± 17,5     |

NOTE 1 The shaded box area indicates sizes not normally used.  
NOTE 2 When a dash is shown against the mid-size there is no mid-size sieve applicable.

Figura 6.1. Selección de tamices para obtener una grava apropiada para la preparación de los HAC según la Norma EN12620.

Empleando la granulometría inicial de la grava se puede identificar los tamices que se encuentran entre los límites anteriores resultando la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Selección de tamices y tamaño de partícula de la grava para preparar el hormigón autocompactante.

| Tamiz (mm)   | Diámetro de Partícula, $D_n$ (mm) | Acumulado Pasante (%) | Masa Retenida (g) | Superficie de Partícula, $S_n$ (m <sup>2</sup> ) | Superficie Ponderada (m <sup>2</sup> /Kg) |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------|--|---|
| <2.36        | 1.18                              | 0.00                  | 0.00              | 2.097  | 0.000                                     |
| 2.36         | 3.56                              | 0.00                  | 604.1             | 0.695  | 0.073                                     |
| 4.76         | 7.14                              | 10.51                 | 3253.9            | 0.347  | 0.196                                     |
| 9.51         | 11.01                             | 67.15                 | 1887.3            | 0.225  | 0.074                                     |
| 12.5         | 15.75                             | 100.00                | 0.00              | 0.157  | 0.000                                     |
| 19.0         | 22.20                             | 100.00                | 0.00              | 0.111  | 0.000                                     |
| 25.4         | 31.75                             | 100.00                | 0.00              | 0.078  | 0.000                                     |
| 38.1         | 19.05                             | 100.00                | 0.00              | 0.130  | 0.000                                     |
| <b>TOTAL</b> |                                   |                       | <b>5745.3</b>     |  | <b>0.343</b>                              |

Antes de construir la Tabla 6.2, se dedujo que los diámetros de las partículas deben ser menores a  $D_n = 11,01$  mm (acorde a la norma), estos se encuentran entre los tamices 3/8" (9.51 mm) y N° 8 (2.36 mm). Estos producen una relación  $D/n = 9.51/2.36 = 4.03$  apropiada para las mezclas HAC.

Por otra parte, como se observa en la Tabla 6.2, se puede seleccionar la grava que este por debajo de 9.51 mm. Seleccionar un solo tamaño de grano no es práctico y como se observa en la fila de totales, necesitamos diferentes tamaños de grano para asegurar que la superficie ponderada de la fracción seleccionada ( $0.343 \text{ m}^2/\text{Kg}$ ) sea aproximada a la de la grava del diseño teórico ( $0.332 \text{ m}^2/\text{Kg}$ ).

También, si se seleccionan distintos tamaños de grano para la grava se asegura un mejor empaquetamiento de las partículas cuando se evalúen las propiedades mecánicas de la mezcla en estado endurecido.

Finalmente, se separaron los tres tamaños de grano de la grava según sus masas retenidas (Tabla 6.2), los cuales se recombinaron siempre en la misma proporción para formular los HACs destinados a los ensayos de cono de Abrams y los ensayos mecánicos, con el único objetivo de correlacionar estos resultados con los obtenidos del análisis reológico de los MEHs.

#### **6.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONO Y MINI-CONO DE ABRAMS.**

Debido al gran volumen de los materiales (valores Tabla 6.1 en kg), se ejecutó esta actividad solo dos veces para preparar un total de 6 pruebas de Cono de Abrams [9], [10] con el cemento Selvalegre y la arena Beige. Se evaluó el desempeño de las formulaciones desde el punto de vista de su trabajabilidad práctica para luego realizar los ensayos de mini-cono [11].

Una vez ajustado los parámetros de relación agua/cemento a emplear, la grava y el agregado fino, se emplean las masas en gramos de los materiales como se obtienen de la Tabla 6.1, caso práctico para preparar los MEHs y los HACs destinados a las pruebas de mini-cono.

## 6.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS EN PROBETAS DE MEH Y HAC EN ESTADO ENDURECIDO.

Para realizar los ensayos mecánicos en estado endurecido se utilizó el procedimiento que consta en la norma NTE INEN 488: Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la Compresión de MEH en cubos de 50 mm de arista [12]. Se preparó probetas (Figuras 6.2 y 6.3) conforme las mezclas de materiales que se utilizaron para los ensayos en estado fresco, tanto para MEH como para HAC [13], y que se describe en la Tabla 6.3 y Tabla 6.4 respectivamente.



Figura 6.2. Probetas de los MEHs conformadas para los ensayos de esfuerzo de compresión.

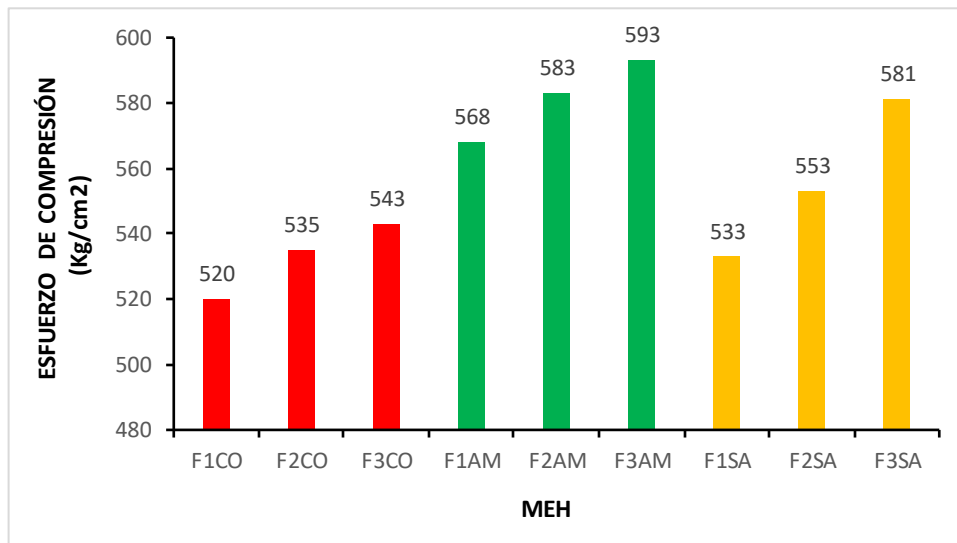


Figura 6.3. Probetas de los HACs conformadas para los ensayos de esfuerzo de compresión.

Los resultados de los ensayos mecánicos (esfuerzo de compresión) aplicados a las probetas de los MEHs y HACs, se muestran en las Tablas 6.3 y 6.4.

**Tabla 6.3.** Ensayo mecánico en estado endurecido de los MEHs seleccionados.

| MEH  | Fuerza (Kg) | Área Efectiva (cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) |
|------|-------------|----------------------------------|--------------------------------|
| F1CO | 12995       | 25                               | 520                            |
| F2CO | 13365       | 25                               | 535                            |
| F3CO | 13576       | 25                               | 543                            |
| F1AM | 14212       | 25                               | 568                            |
| F2AM | 14567       | 25                               | 583                            |
| F3AM | 14834       | 25                               | 593                            |
| F1SA | 13319       | 25                               | 533                            |
| F2SA | 13821       | 25                               | 553                            |
| F3SA | 14514       | 25                               | 581                            |



**Figura 6.4.** Valores máximos de esfuerzo de compresión aplicados a los diferentes MEHs.

De los resultados obtenidos y que se muestran en la Tabla 6.3 y Figura 6.6, se puede observar que los MEHs conformados con cemento Armaduro son los más resistentes a las pruebas de compresión, con un incremento progresivo desde los MEHs conformados con

F1, MEH con F2 y MEH con F3, siendo estos últimos los que presentan mayor resistencia a los esfuerzos de compresión.

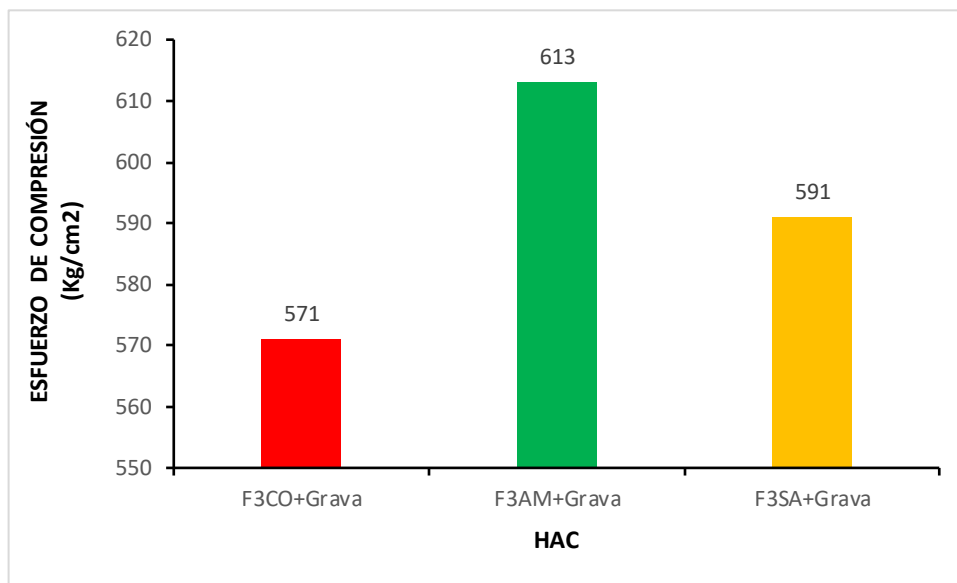
También se evidencia que los MEHs conformados con los diferentes cementos (Campeón, Armaduro y Selvalegre) pero con la misma fase (F3) son los más resistentes en su grupo, razón por la cual, se puede indicar que a medida que disminuye el tamaño de la partícula del agregado fino (BS) aumenta la resistencia al esfuerzo de compresión, debido a varias razones:

- Mayor área de superficie: Las partículas más pequeñas tienen una mayor área de superficie en comparación con las partículas más grandes. Esto permite una mejor interacción y adhesión entre el cemento y el agregado fino, lo que resulta en una matriz más densa y cohesiva.
- Mejor llenado de vacíos: Las partículas finas pueden llenar los espacios vacíos entre las partículas más grandes del agregado grueso. Esto reduce la porosidad del MEH, lo que a su vez mejora su resistencia, ya que hay menos espacios vacíos que pueden debilitar la estructura.
- Aumento de la compactación: Con partículas más pequeñas, es más fácil lograr una mayor compactación del MEH. Una mezcla más compacta tiene menos poros y, por lo tanto, es más resistente a la compresión.
- Reacción química: Las partículas finas pueden participar en reacciones químicas con el cemento, lo que puede contribuir a la formación de productos de hidratación que mejoran la resistencia del MEH.
- Distribución del estrés: Las partículas más pequeñas pueden ayudar a distribuir mejor las tensiones dentro del MEH, lo que reduce la concentración de tensiones en puntos específicos y mejora la resistencia general.
- Menor cantidad de agua: En mezclas con partículas finas, a menudo se puede utilizar menos agua para lograr la trabajabilidad deseada, lo que resulta en una menor relación agua-cemento. Una relación agua-cemento más baja generalmente conduce a un aumento en la resistencia del MEH.

En resumen, al disminuir el tamaño de las partículas del agregado fino, se mejora la cohesión, se reduce la porosidad y se optimiza la distribución de tensiones, lo que contribuye a un aumento en la resistencia del MEH.

**Tabla 6.4.** Ensayo mecánico en estado endurecido de los HACs seleccionados

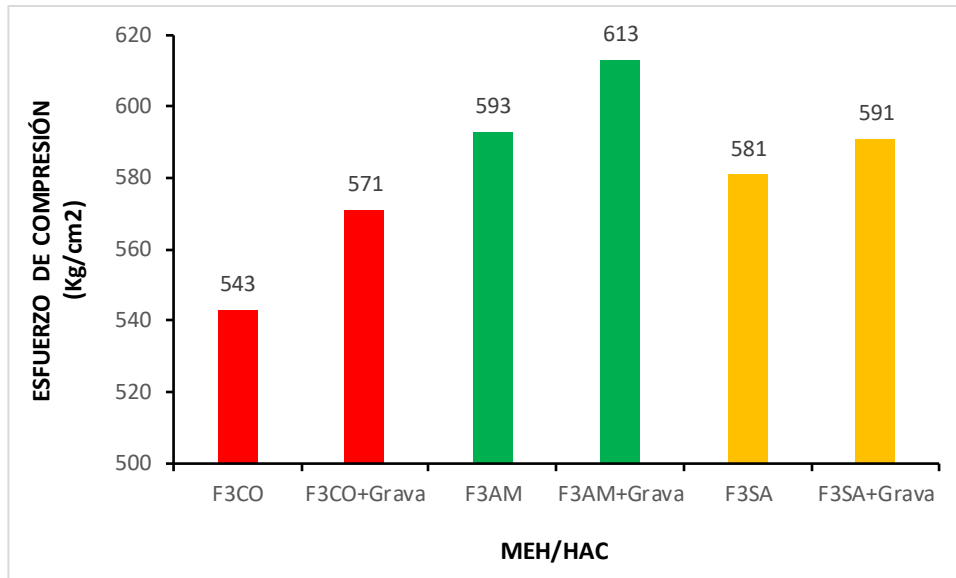
| HAC        | Fuerza (Kg) | Área Efectiva (cm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> ) |
|------------|-------------|----------------------------------|--------------------------------|
| F3CO+Grava | 14283       | 25                               | 571                            |
| F3AM+Grava | 15314       | 25                               | 613                            |
| F3SA+Grava | 14779       | 25                               | 591                            |



**Figura 6.5.** Valores máximos de esfuerzo de compresión aplicados a los diferentes HAC.

Para el caso de los HACs [14], cuyos resultados de resistencia a los esfuerzos de compresión se muestran en la Tabla 6.4 y Figura 6.7, se evidencia que los HACs conformados por F3AM y grava, son los más resistentes, lo que indica que es la mezcla más eficiente en términos de resistencia a la compresión.

Es importante mencionar que, al realizar una comparación de los MEH, conformados con F3 para los diferentes cementos (Tabla 6.3) y los HACs conformados con F3 y los diferentes cementos (Tabla 6.4) tal como se muestra en la Figura 6.8, se evidencia que estos últimos son más resistentes al esfuerzo de compresión, lo cual se puede sustentar sobre la base de las siguientes razones:



**Figura 6.6.** Comparación de los valores máximos de esfuerzo de compresión aplicados a los MEH y HAC conformados con F3 de árido fino.

- Ausencia de agregados gruesos en el mortero: La composición del MEH: generalmente no contiene agregados gruesos (grava o piedra), mientras que el HAC sí los incluye. Los agregados gruesos refuerzan la matriz del HAC, aportando mayor resistencia mecánica, especialmente en compresión.
- Distribución de cargas: En el HAC, los agregados gruesos ayudan a distribuir las cargas de compresión de manera más eficiente, lo que reduce las tensiones en la matriz cementicia. En el MEH, sin esos agregados, toda la carga se concentra en la matriz, lo que provoca una mayor debilidad en su resistencia.
- Mayor cantidad de pasta y finos en el MEH: El mortero tiene una mayor proporción de pasta (cemento y agua) y agregados finos en comparación con el HAC, lo que puede generar más microfisuras y porosidad. Esta porosidad reduce la resistencia a compresión, ya que las zonas de vacío o microfisuras se convierten en puntos débiles cuando se aplica una carga [15].
- Diferente estructura interna: La ausencia de agregados gruesos en el MEH genera una estructura interna más homogénea, pero con menor capacidad de resistencia. Los agregados gruesos del HAC refuerzan la estructura global, creando una mezcla más densa y resistente. Aunque ambos materiales puedan usar aditivos para mejorar la

cohesión y fluidez, el MEH carece del refuerzo físico que brindan los agregados gruesos.

- **Contracción y fisuración:** El MEH, al tener más proporción de pasta, es más propenso a la contracción por secado. Esto puede inducir microfisuras, que a su vez debilitan la resistencia a compresión. El HAC, con una mejor distribución de agregados y una matriz más equilibrada, es menos susceptible a estos efectos, lo que aumenta su resistencia.
- **Efecto del contenido de aditivos en el MEH:** Aunque el MEH puede tener los mismos aditivos que el HAC, su efecto no es el mismo. En el HAC, los superplastificantes optimizan la compactación de una mezcla con agregados gruesos, mientras que en el MEH solo mejoran la cohesión de una mezcla sin estos agregados. Esto implica que, aunque los aditivos mejoran la trabajabilidad, no compensan la falta de agregados gruesos que refuerzan la resistencia a compresión en el HAC.
- **Relación agua/cemento y porosidad:** Aunque la relación agua/cemento pueda ser similar en ambos casos, el MEH tiene una mayor tendencia a la porosidad debido a la ausencia de agregados gruesos. En el HAC, los agregados grandes ayudan a reducir el espacio vacío y a eliminar el exceso de agua, lo que resulta en una mezcla más densa y menos porosa. Esta menor porosidad es crucial para la resistencia a compresión, ya que los poros son puntos de debilidad.

En resumen, el menor esfuerzo a compresión en el MEH en comparación con el HAC, aun con el uso de aditivos similares, se debe principalmente a la ausencia de agregados gruesos, que proporcionan un refuerzo mecánico crucial en el HAC. Además, la mayor proporción de pasta en el MEH aumenta la probabilidad de contracción, fisuración y porosidad, factores que reducen la resistencia a compresión. La presencia de aditivos mejora ciertas propiedades del MEH, pero no puede compensar la falta de agregados gruesos que aportan una mayor capacidad de resistencia en el hormigón autocompactante.

## 6.6 REFERENCIAS.

- [1] F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, L.M. Ordóñez-Belloc, Rheology of concrete: A study case based upon the use of the concrete equivalent mortar, *Mater. Struct.* 46 (2013) 587–605.
- [2] M. Geiker, S. Jacobsen, Self-compacting concrete (SCC), in: *Dev. Formul. Reinf. Concr.*, 2nd ed., Sidney Mindess, Vancouver, 2019: pp. 229–256.
- [3] I. Rodrigo, I. Pedraza, I.D. Sfer, I.S.E. Gutiérrez, I. De Estructuras, A.M. Guzmán, U. Nacional, Analisis experimental de placas de hormigon, *Jornadas Argentinas Ing. Estructural* 23 (2014) 1–14.
- [4] J.M. Tobes, A. Lopez, G. Giaccio, R. Zerbino, Diseño de Hormigón Autocompactante ( HAC ) con diferentes tipos de agregado grueso, *PHi-Planta Hormigón Int.* 1 (2010) 66–71.
- [5] J. Rigueira Victor, Estudio de la sensibilidad e influencia de la composición en las propiedades reológicas y mecánicas de los hormigones autocompactantes, Universidad Politécnica de Valencia, 2007.
- [6] S. Cremades Escrig, Estudio de la robustez en el hormigón autocompactante con bajo contenido de finos, Universidad Politécnica de Valencia, 2011.
- [7] I. González Taboada, B. González Fonteboa, F. Martínez Abella, G. Rojo López, Influencia de las variaciones en los materiales sobre la reología de hormigones autocompactantes reciclados, *V Congr. Iberoam. Hormigón Autocompactante y Hormigones Espec.* (2018) 65–74.
- [8] Norma Española: Árido, 2009. [www.aenor.es](http://www.aenor.es).
- [9] D. Sanchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, Javeriana, Pontificia Universidad, 2001.
- [10] J.T. Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, Diseño y control de mezclas de concreto, *Portl. Cem. Assoc.* 1 (2004) 449.
- [11] D. Kantro, Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test, *Cem. Concr. Aggregates* 2 (1980) 95–102.
- [12] NTE INEN 488. Cemento Hidráulico: Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50mm de arista. Quito: INEN., (2009) 16.

- [13] V. Dils, J., De Schutter, G. & Boel, Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review, *Mater. Struct.* 45 (2012) 1673–1683.
- [14] L. García, Propiedades mecánicas y reológicas de hormigones autocompactantes sometidos a carga a edades muy tempranas y tempranas, Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
- [15] V. Boel, G. De Schutter, Porosity of superplasticised cement paste containing limestone filler, *Adv. Cem. Res.* 18 (2006) 97–102.

# CAPÍTULO VII

## CONCLUSIONES

### 7.1 CONCLUSIONES.

Sobre la base de los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación doctoral, se llegó a las siguientes conclusiones:

- El estudio del comportamiento viscoso transitorio y estable de las pastas conformadas por cemento Portland y cemento volcánico permitió establecer que:

La presencia de una cierta cantidad de plastificante en las formulaciones de pasta de cemento cambió sus comportamientos viscosos estables de adelgazamiento por cizalla a espesamiento por cizalla.

Los estudios transitorios confirmaron el comportamiento tixotrópico de las pastas de adelgazamiento por cizalla, pero contrariamente a lo esperado, se obtuvo un comportamiento tixotrópico aparente para las pastas de espesamiento por cizalla.

El aparente comportamiento tixotrópico de las pastas de cemento de espesamiento por cizalla podría conciliarse con el comportamiento antitixotrópico al plantear la hipótesis de la ocurrencia de un mecanismo de atasco (o desbloqueo) rápido desarrollado por partículas de cemento no agregadas (o agregadas) seguido de una erosión progresiva (o agregación) del estado atascado (o desbloqueado) debido a la acción constante de las fuerzas de cizallamiento.

- La investigación realizada para obtener la mejor composición de los MEHs y el consecuente escalonamiento para la obtención de los HACs, permitió determinar que el enfoque MEH se puede utilizar para inferir formulaciones HAC-CPV.

- Para el estudio de los MEHs se utilizaron para su conformación, tres tipos de áridos finos (uno natural y dos obtenidos por trituración), tres tipos de cemento, la misma relación agua/cemento y el mismo tipo de aditivo. Cabe mencionar que, para cada uno de los áridos finos se conformaron tres fases según el tamaño de la partícula.
- Los resultados de la investigación realizada sobre los MEHs diseñados, permitió demostrar que: al disminuir el tamaño de las partículas del agregado fino, se mejora la cohesión, se reduce la porosidad y se optimiza la distribución de tensiones, lo que contribuye a un aumento en la resistencia del MEHs; lo cual, se evidenció en cada uno de los MEHs diseñados.
- Para el estudio de los HACs, se manejó un material cementante apropiado equivalente al hormigón; para ello, se utilizó el método MEH que fue desarrollado en el año 2000, lo que permitió diseñar un HAC-CPV utilizando cementos Portland volcánicos, arenas, grava, agua y aditivo comercializados en Ecuador.
- Se probó el comportamiento de flujo de los morteros equivalentes de hormigón (MEH) con un reómetro absoluto, controlando que se cumplan los indicadores que permitían demostrar que se podía escalar a un hormigón autocompactante (HAC); estos indicadores son: menor rendimiento la tensión, mayor viscosidad plástica y el comportamiento de espesamiento por cizalla a alto esfuerzo cortante.
- Se formularon tres HAC-CPVs a partir de los MEHs que lograron mejores características de autocompactación., los mismos que son válidos para ser utilizados en actividades de construcción y edificación en zonas sísmicas. Los HACs fueron conformados con cementos Portland volcánicos, agua, aditivos y áridos (finos y grueso) comercialmente distribuidos en Ecuador.
- Los resultados de las pruebas de segregación del cono Abrams realizadas con los HACs coincidieron con la norma europea para HACs, que se utilizó como prueba independiente de la validez de los resultados basados en MEH.

- Los resultados de los ensayos mecánicos demostraron que existió un menor esfuerzo a compresión en el MEH en comparación con el HAC, aun con el uso de aditivos similares, esto debido principalmente a la ausencia de agregados gruesos, que proporcionan un refuerzo mecánico crucial en el HAC. Además, la mayor proporción de pasta en el MEH aumenta la probabilidad de contracción, fisuración y porosidad, factores que reducen la resistencia a compresión. La presencia de aditivos mejora ciertas propiedades del MEH, pero no puede compensar la falta de agregados gruesos que aportan una mayor capacidad de resistencia en el hormigón autocompactante.

## 7.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

- El descubrimiento inesperado del comportamiento tixotrópico en pastas de cemento que normalmente muestran espesamiento por cizalla sugiere que hay fenómenos reológicos aún por explorar, lo que justificaría estudios adicionales. Así mismo, la hipótesis sobre un posible mecanismo de atasco y desbloqueo en las partículas de cemento bajo fuerzas de cizallamiento plantea interrogantes que requieren investigación experimental para comprender mejor estos procesos. Además, la influencia del plastificante en la alteración de estos comportamientos abre la posibilidad de investigar y optimizar nuevas formulaciones de cemento, lo que podría tener aplicaciones industriales significativas.
- Una posible línea de investigación podría centrarse en analizar los límites óptimos del tamaño de las partículas para maximizar la resistencia del mortero equivalente al hormigón (MEH). Además, se podrían investigar cómo diferentes tipos de agregados finos, bajo diversas condiciones ambientales o de carga, afectan estas propiedades, con el fin de diseñar morteros con mejor comportamiento a largo plazo y en distintas aplicaciones.
- Explorar la incorporación de sustitutos de los agregados gruesos, analizar el comportamiento de nuevos aditivos que puedan compensar la falta de estos agregados, estudiar la evolución a largo plazo de los efectos de contracción y

fisuración en el mortero equivalente al hormigón (MEH), así como realizar estudios comparativos de su durabilidad y resistencia bajo diversas condiciones ambientales. Estas investigaciones podrían contribuir al desarrollo de materiales más resistentes y optimizados para su uso en la construcción moderna, abordando las limitaciones observadas en el MEH.