

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE MEZCLAS
CEMENTADAS DE RELAVE**

SEBASTIÁN FRANCISCO MORGADO GARAY

Profesor Guía: Dra. Pamela Garrido Ruiz
Profesor Patrocinante: Dr. Francisco Vivanco Avaria

Trabajo de graduación presentado a la Facultad de Ciencia, en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Físico

Santiago – Chile

2014

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE MEZCLAS CEMENTADAS DE RELAVE

SEBASTIÁN FRANCISCO MORGADO GARAY

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión de la Dra. Pamela Garrido Ruiz, Directora de Estudios del Centro de Investigación JRI y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora:

Dr. Francisco Santibáñez

Dra. Yolanda Vargas

Dr. Francisco Vivanco

Profesor Patrocinante

Dra. Pamela Garrido

Profesor Guía

Dra. Yolanda Vargas

Directora del Departamento de Física

AGRADECIMIENTOS

A mi madre María Zulema, porque vio el comienzo de este camino y que con ansias esperaba ver el final. A pesar de no estar conmigo al término de esta etapa, sé que estaba acompañándome y deseándome éxito. Estás en una mejor vida, y desde aquí te doy las gracias por todo lo que entregó a nuestra familia. Prometo, por lo menos, ser la mitad de bueno que usted en la crianza de mi pequeña Laura.

Quiero agradecer a mi padre, Santiago, por darme la educación y valores que no se aprenden ni en la mejor de las universidades, por ser mi modelo a seguir, y por demostrarme que con esfuerzo se logran completar los objetivos.

A mi amor, Tamara, por estar en los momentos más difíciles que he vivido hasta el momento. Por levantarme cuando ya no tenía fuerzas para continuar con este trabajo y alentarme a continuar y mirar más allá.

Agradezco a todos los trabajadores del Centro de Investigación de JRI, que me ayudaron a hacer más ameno el trabajo de titulación, especialmente a Pía, Romina, José, y por supuesto, a mi amigo Octavio. También quiero darle las gracias a la Sra. Patricia Fernández, que con su ayuda pude solucionar más de un problema. Igualmente quiero agradecer a la srta. María Zandarín, por toda la paciencia en guiarme y aconsejarme, y en las numerosas correcciones a los avances de este trabajo, y por darme la oportunidad de trabajar en el proyecto. Y como no agradecer a la Sra. Pamela Garrido, que me guió durante todo el proceso de práctica y tesis. Ya que sin su ayuda no habría logrado este trabajo. Y por toda la preocupación que tuvo de mi situación familiar y por escucharme cuando lo necesitaba.

También quiero agradecer a todos mis amigos que hice en la universidad, en especial a Sergio Manzano, Carlos Riquelme, Natalia Salazar, Salvador Tamayo, José Miguel Mercado, Ignacio Calderon, y Cesar Aravena, quienes hicieron de mi estancia en la universidad una de las mejores etapas de mi vida.

Y por último, quiero agradecer todo el apoyo y compromiso por parte del profesor Francisco Vivanco, por todas las buenas conversaciones acompañadas de un estupendo café, y por creer desde un principio en este trabajo de tesis.

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS.....	I
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
NOMENCLATURA.....	XII
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	5
2.1. Antecedentes y estado actual del tema	5
2.2. Antecedentes de caracterización	6
2.2.1. Determinación de los límites de consistencia.....	6
2.2.2. Determinación del límite líquido	7
2.2.3. Distribución granulométrica.....	10
2.2.4. Caracterización reológica.....	12
2.3. Efecto del porcentaje de finos en el desarrollo de resistencia del relleno en pasta.....	14
2.4. Efecto del porcentaje de finos en el requerimiento de agua del relleno de pasta fresco	17
2.5. Efecto de la densidad del relave en el desarrollo de resistencia del relleno en pasta	18
2.6. Modelos predictivos de resistencia a la compresión.....	20
2.6.1. Efectos de los parámetros del modelo en el slump del relleno en pasta 23	
2.6.2. Efectos de los parámetros del modelo en el porcentaje de sólidos de la pulpa	25
2.6.3. Fundamento teórico de la dosificación	26
2.6.4. Ley de Abrams	31
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	32
3.1. Determinación del Límite líquido.....	33

3.1.1.	Materiales para determinación del límite líquido	34
3.1.2.	Procedimiento aplicado	35
3.2.	Determinación del límite plástico	35
3.2.1.	Materiales para determinación del límite plástico	36
3.2.2.	Procedimiento aplicado	36
3.3.	Caracterización granulométrica de la pulpa de relave	37
3.3.1.	Procedimiento aplicado	38
3.4.	Caracterización reológica de la pulpa de relave	38
3.4.1.	Procedimiento para mediciones reológicas	39
3.5.	Caracterización mineralógica del relave	40
3.6.	Caracterización por difracción de rayo X del relave.....	40
3.7.	Ensayo de concentración de sales solubles	41
3.8.	Caracterización mineralógica del cemento	41
3.9.	Caracterización granulométrica del cemento.....	41
3.9.1.	Procedimiento aplicado	42
3.10.	Caracterización reológica del CPB	42
3.10.1.	Procedimiento aplicado.....	43
3.11.	Selección de dosis para mezcla	45
3.11.1.	Dosificaciones para relave con agua industrial	46
3.12.	Fabricación de probetas de CPB.....	48
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	52
4.1.	Determinación de los límites de consistencia	52
4.1.1.	Límite líquido y límite plástico	52
4.2.	Caracterización granulométrica de RAI	54
4.3.	Caracterización reológica de la pulpa de relave	57
4.4.	Caracterización mineralógica de la pulpa de relave	59
4.5.	Caracterización físico-química de la pulpa de relave.....	62
4.6.	Caracterización mineralógica del cemento	63
4.7.	Caracterización granulométrica del cemento.....	64

4.8.	Caracterización reológica del CPB	65
4.8.1.	Reología para CPB RAI con homogeneización.....	67
4.8.2.	Reología para CPB RAI sin homogeneización	69
4.9.	Caracterización mecánica.....	72
4.9.1.	Resultados de ensayos de compresión simple de probetas de CPB con muestra RAI y cemento.....	72
4.9.2.	Relleno cementado con muestra RAI400 y cemento	89
4.9.3.	Relleno cementado con muestra RAI+FA	101
5.	CINÉTICA DE LA RESISTENCIA	112
5.1.	Comparación RAI y RAI+FA	112
5.2.	Comparación RAI y RAI400.....	113
6.	ANÁLISIS	116
7.	CONCLUSIONES.....	119
8.	BIBLIOGRAFÍA	120
9.	ANEXO.....	122
9.1.	Resultados de ensayos preliminares	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Diseño de las mezclas para la evaluación del efecto del %Fino en las propiedades del relleno en pasta.	16
Tabla 2.2 Diseño de las mezclas para la evaluación del efecto de la densidad del relave en las propiedades del relleno en pasta.	19
Tabla 2.3 Valores óptimos para mezclas de relaves cementados estudiados por M. Fall (2008).....	26
Tabla 3.1 Resumen de ensayos para cada material.....	33
Tabla 3.2 Dosificación para ensayos preliminares.....	46
Tabla 3.3 Dosificación para probetas y ensayos de reología.....	47
Tabla 3.4 Dosificación para probetas con aditivo y una RAI al 65%.	48
Tabla 4.1 Datos experimentales para calcular el límite líquido.	52
Tabla 4.2 Valores de límite líquido para la pulpa de relave en dos fechas distintas.....	54
Tabla 4.3 Diámetros característicos de la muestra RAI.	55
Tabla 4.4 Diámetros característicos de muestra RAI tamizado con malla Tyler #400.....	57
Tabla 4.5 Datos de tensión de fluencia para cada concentración de sólidos de la pulpa de relave con agua industrial	58
Tabla 4.6 Distribución Mineralógica del relave RAI.....	60
Tabla 4.7 Resumen de mediciones realizadas en la recepción de la muestra.	62
Tabla 4.8 Resumen de resultados de caracterización física-química relave RAI.	63
Tabla 4.9 Distribución de minerales para una muestra de cemento especial puzolánico.....	63
Tabla 4.10 Resultados de regresión no lineal para distintos días de curado de las muestras.....	86
Tabla 4.11 Resultados de nuevo ajuste con $K_2 = 1,37$	87
Tabla 4.12 Resultados de regresión no lineal para distintos días de curado de las muestras.....	99
Tabla 4.13 Resultados de nuevo ajuste con $K_2 = 1,48$	99
Tabla 4.14 Resultados de regresión no lineal para distintos días de curado de las muestras.....	109
Tabla 4.15 Resultados de nuevo ajuste con $K_2 = 1,56$	109
Tabla 5.1 Comparación de diámetros característicos de RAI y RAI400	113
Tabla 5.2 Porcentaje de finos (%fino<20µm) para muestra de RAI y RAI400	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 representación esquemática de Límites de consistencia para distintos contenidos de humedad. [9].....	7
Figura 2.2 Penetrómetro de cono para medición de límite líquido.	8
Figura 2.3 Equipo Casagrande para límite plástico. Imagen propia.....	9
Figura 2.4 Acanalador ASTM [11].....	9
Figura 2.5 Vibrador de tamices RO-TAP (CI-JRI).	10
Figura 2.6 Equipo de difracción láser Microtrac s3500 (CI-JRI).....	11
Figura 2.7 (A) Reómetro Haake RS6000. (B) Sensores Vane. (C) Sensor helicoidal y liso (CI-JRI).	13
Figura 2.8 Distribución de tamaño de partículas de los relaves usados en estudios de M. Fall et al. [3].....	14
Figura 2.9 Efecto del porcentaje de finos del relave en el desarrollo de resistencia del relleno de pasta cementado. [3].....	17
Figura 2.10 Influencia del contenido de partículas finas en la razón de W/C. [3]	18
Figura 2.11 Efecto de la densidad en la UCS de muestras de relave hechas del relave B[3].....	19
Figura 2.12 Relación del consumo de conglomerante con la densidad del relave usado. [3]	20
Figura 2.13 Perfil de predicción de la UCS a 28 días. [6]	21
Figura 2.14 Efecto de la razón W/C en la UCS a los 28 días del CPB para diferentes contenidos de aglomerantes (%Fino = 40%; densidad de relave, $\rho_t = 3,459\text{g/cm}^3$) [6].....	22
Figura 2.15 Diagrama del procedimiento para medir el slump. [12].....	23
Figura 2.16 Perfil de predicción de slump. [6].....	24
Figura 2.17 Efecto del tamaño de partículas del relave en el slump del CPB para diferentes contenidos de conglomerantes ($W/C = 7$; densidad de relave, $\rho_t = 3,459\text{g/cm}^3$) [6].....	25
Figura 2.18 Perfil de predicción del porcentaje de sólidos del CPB. [6].....	26
Figura 2.19 Relación entre la resistencia del concreto y el contenido de agua. [15].....	31
Figura 3.1 Homogenización de pulpa con agitador mecánico.	44
Figura 3.2 Proceso de homogeneización de pulpa y cemento.	50
Figura 3.3 Probetas de CPB con 70% de concentración de sólidos y 3, 5, 7% de cemento.	51

Figura 4.1 Límite líquido para una pulpa de relave con agua industrial.	53
Figura 4.2 Curva granulométrica para la pulpa de relave.	55
Figura 4.3 Comparación de RAI original con RAI sobre la malla Tyler #400. ...	56
Figura 4.4 Tensión de fluencia para distintas concentraciones de sólidos, para una muestra de pulpa de relave con agua industrial.....	58
Figura 4.5 Difractograma cualitativo de la muestra RAI.....	61
Figura 4.6 Curva granulométrica para una muestra de cemento puzolánico....	65
Figura 4.7 Diagrama de caracterización de CPB.	66
Figura 4.8 Tensiones de fluencia para mezcla de relaves con $C_p = 60\%$, y contenidos de cemento de 3, 5 y 7% en peso.	67
Figura 4.9 Tensiones de fluencia para mezclas de relave con $C_p 65\%$, y contenidos de cemento de 3, 5 y 7% en peso.	67
Figura 4.10 Promedio de tensiones de fluencia para mezclas de relave con $C_p 70\%$ y contenidos de cemento de 3, 5 y 7% en peso.	68
Figura 4.11 Promedio de tensiones de fluencia para 60% de concentración de sólidos, con 5 y 7% de cemento sin homogeneizar.	69
Figura 4.12 Promedio de tensiones de fluencia para 65% de concentración de sólidos, con 3, 5 y 7% de cemento sin homogeneizar.	70
Figura 4.13 Promedio de tensiones de fluencia para 70% de concentración de sólidos, con 3, 5 y 7% de cemento sin homogeneizar.	71
Figura 4.14 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 60% de sólidos con 7 días de curado.	73
Figura 4.15 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 60% de sólidos con 14 días de curado.	73
Figura 4.16 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 60% de sólidos con 28 días de curado.	74
Figura 4.17 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 65% de sólidos con 7 días de curado.	74
Figura 4.18 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 65% de sólidos con 14 días de curado.	75
Figura 4.19 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 65% de sólidos con 28 días de curado.	75
Figura 4.20 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 70% de sólidos con 7 días de curado.	76
Figura 4.21 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 70% de sólidos con 14 días de curado.	76
Figura 4.22 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 70% de sólidos con 28 días de curado.	77

Figura 4.23 Resistencia de RAI en función de contenido de cemento, para 7 días de curado.	78
Figura 4.24 Probetas de RAI antes y después del ensayo, con 7 días de curado.	79
Figura 4.25 Resistencia de RAI en función de contenido de cemento, para 14 días de curado.	79
Figura 4.26 Probetas de RAI antes y después del ensayo, con 14 días de curado.	80
Figura 4.27 Resistencia de RAI en función de contenido de cemento, para 28 días de curado.	80
Figura 4.28 Probetas de RAI antes y después del ensayo, con 28 días de curado.	81
Figura 4.29 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para 60% de sólidos.	82
Figura 4.30 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para 65% de sólidos.	82
Figura 4.31 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para 70% de sólidos.	83
Figura 4.32 Módulos de Young de RAI para 7 días de curado.	84
Figura 4.33 Módulos de Young de RAI para 14 días de curado.	85
Figura 4.34 Módulos de Young de RAI para 28 días de curado.	85
Figura 4.35 Resistencia vs W/C a 7 días.	88
Figura 4.36 Resistencia vs W/C a 14 días.	88
Figura 4.37 Resistencia vs W/C a 28 días.	89
Figura 4.38 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 60% de sólidos con 7 días de curado	90
Figura 4.39 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 60% de sólidos con 14 días de curado	90
Figura 4.40 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 60% de sólidos con 28 días de curado	91
Figura 4.41 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 65% de sólidos con 7 días de curado	91
Figura 4.42 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 65% de sólidos con 14 días de curado	92
Figura 4.43 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 65% de sólidos con 28 días de curado	92
Figura 4.44 Probetas con RAI400 con 60% Cp antes y después del ensayo para 7, 14 y 28 días de curado.	94

Figura 4.45 Resistencia de RAI400 en función de contenido de cemento, para 7 días de curado.	94
Figura 4.46 Resistencia de RAI400 en función de contenido de cemento, para 14 días de curado.	95
Figura 4.47 Resistencia de RAI400 en función de contenido de cemento, para 28 días de curado.	95
Figura 4.48 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para RAI400 60% de sólidos.....	96
Figura 4.49 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para RAI400 60% de sólidos.....	96
Figura 4.50 Módulos de Young de RAI400 para 7 días de curado.	97
Figura 4.51 Módulos de Young de RAI400 para 14 días de curado.	98
Figura 4.52 Módulos de Young de RAI400 para 14 días de curado.	98
Figura 4.53 Resistencia vs W/C para RAI400 con 60% de sólidos a 7, 14 y 28 días de curado.	100
Figura 4.54 Resistencia vs W/C para RAI400 con 65% de sólidos a 7, 14 y 28 días de curado.	100
Figura 4.55 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI+FA con 65% de sólidos con 7 días de curado	102
Figura 4.56 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI+FA con 65% de sólidos con 14 días de curado	103
Figura 4.57 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI+FA con 65% de sólidos con 28 días de curado	103
Figura 4.58 Probetas con RAI+FA con 65% Cp antes y después del ensayo para 7, 14 y 28 días de curado.	105
Figura 4.59 UCS para CPB fabricado con RAI+FA, para 7, 14 y 28 días de curado.....	106
Figura 4.60 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para 65% de sólidos.....	107
Figura 4.61 Módulos de Young para RAI+FA a 7, 14 y 28 días de curado.	108
Figura 4.62 Resistencia vs W/C para RAI+FA con 65% de sólidos a 7, 14 y 28 días de curado.	110
Figura 5.1 Comparación de UCS de RAI y RAI+FA con 65% de concentración de sólidos y a 7 (a), 14 (b) y 28 días (c) de curado.....	112
Figura 5.2 Comparación de UCS de RAI y RAI400 con 60% de concentración de sólidos y a 7 (a), 14 (b) y 28 días (c) de curado.....	114
Figura 5.3 Comparación de UCS de RAI y RAI400 con 65% de concentración de sólidos y a 7 (a), 14 (b) y 28 días (c) de curado.....	115

Figura 8.1 Muestras de CPB para reologías preliminares.	122
Figura 8.2 Muestras de CPB con diferentes consistencias luego de 3 horas.	123
Figura 8.3 Consistencia de CPB con 50% de concentración de sólidos, luego de 3 horas.	124
Figura 8.4 Consistencia de CPB con 60% de concentración de sólidos, luego de 3 horas.	125
Figura 8.5 Consistencia de CPB con 72% de concentración de sólidos, luego de 3 horas.	125
Figura 8.6 Muestras de CPB con diferentes consistencias luego de 18 horas.	126
Figura 8.7 Consistencia de CPB con 50% de concentración de sólidos, luego de 18 horas.	127
Figura 8.8 Consistencia de CPB con 60% de concentración de sólidos, luego de 18 horas.	128
Figura 8.9 Muestras de CPB con diferentes consistencias luego de 48 horas.	128
Figura 8.10 Consistencia de CPB con 50% de concentración de sólidos, luego de 18 horas.	129
Figura 8.11 Consistencia de CPB con 60% de concentración de sólidos, luego de 18 horas.	129
Figura 8.12 Gráfico de tensión de fluencia en función del tiempo, para 50% de concentración de sólidos.	130
Figura 8.13 Gráfico de tensión de fluencia en función del tiempo, para 60% de concentración de sólidos.	131
Figura 8.14 Gráfico de tensión de fluencia en función del tiempo, para 72% de concentración de sólidos.	132

NOMENCLATURA

<i>Bn</i>	Bornita
<i>Cc</i>	Calcosina
<i>CI – JRI</i>	Centro de Investigación JRI
<i>CORFO</i>	Corporación de Fomento de la Producción
<i>C_p</i>	Concentración de sólidos de la pulpa de relave
<i>Cpy</i>	Calcopirita
<i>CPB</i>	Relleno de pasta cementada (Cemented paste backfill)
<i>Cv</i>	Covelina
<i>FA</i>	Aditivo en reemplazo de cemento
<i>Gn</i>	No metálico
<i>Hem</i>	Hematita
<i>IP</i>	Índice de plasticidad
<i>K</i>	Porcentaje de cemento
<i>K₁ y K₂</i>	Constante de ecuación de Abrams
<i>LL</i>	Límite líquido
<i>LP</i>	Límite Plástico
<i>m_a</i>	Masa de agua de la pulpa de relave
<i>m_s</i>	Masa de sólidos de la pulpa de relave
<i>m_c</i>	Masa de cemento
<i>Mgt</i>	Magnetita
<i>N</i>	Número de golpes de la máquina de Casagrande

P_{irr}	Pirrotita
P_y	Pirita
RAI	Relave con agua industrial
$RAI + FA$	Relave con agua industrial con aditivo
$RAI400$	Relave con agua industrial con granulometría modificada
UCS	Resistencia a la compresión simple (Uniaxial compressive strength)
V_a	Volumen de agua de la pulpa de relave
V_c	Volumen de cemento de la mezcla de CPB
V_s	Volumen de sólidos de la pulpa de relave
V_t	Volumen total de mezcla de CPB
$w\%$	Porcentaje de humedad
W/C	Razón de agua-cemento
ρ_a	Gravedad específica del agua de la pulpa de relave
ρ_c	Gravedad específica de los sólidos del cemento
ρ_s	Gravedad específica de los sólidos de la pulpa de relave

RESUMEN

El trabajo experimental realizado consistió en determinar las propiedades reológicas, físicas, químicas, de los distintos componentes utilizados en los CPB (Cemented Paste Backfill), y las propiedades reológicas y mecánicas de la mezcla de relave, cemento y agua.

En este documento se describe el estudio realizado en los siguientes capítulos:

En el capítulo 1 se hace una introducción a la problemática, detallando que existen estudios respecto a la tecnología de los CPB en la minería internacional, y que representa una oportunidad de innovación y negocio para las minas nacionales. En el Capítulo 2 se resumen los antecedentes teóricos y el estado del arte de las mezclas de relaves cementados. En el Capítulo 3 se explican los procedimientos para la caracterización de los distintos materiales del CPB. El Capítulo 4 contempla los resultados de las caracterizaciones de cada uno de los elementos utilizados en la fabricación de la mezcla. También presenta los resultados de la caracterización reológica del CPB fresco, considerando mediciones a distintos tiempos; se evalúan las tensiones de fluencia de la mezcla fabricada con distintos porcentajes de cemento y con distintos contenidos de sólidos de la pulpa de relave. Luego se presentan los resultados de la caracterización mecánica, de la que se obtienen las resistencias a la compresión simple de las probetas de CPB endurecidas a los 7, 14 y 28 días de curado, como también la resistencia de las probetas en función del contenido de cemento, concentración de sólidos y distintos días de curado.

En el capítulo 5 se presenta una comparación entre los resultados de la mezcla con cemento sin modificar, con una mezcla que tiene los sólidos del relave tamizados, y con una mezcla que reemplaza una porción de cemento por un aditivo obtenido como descarte de un proceso productivo.

Finalmente, en el capítulo 6 se presenta una discusión de los resultados, y en el capítulo 7, conclusiones y recomendaciones para estudios futuros.

Por último, se logra definir una dosis adecuada de cemento, relave y agua que logra cumplir con los objetivos planteados.

1. INTRODUCCIÓN

La minería subterránea consiste en explotar recursos mineros alojados debajo de la superficie del terreno. Al realizar este proceso minero inevitablemente se producen caserones, que corresponden a las excavaciones en la roca que quedan una vez finalizada la explotación de un sector de la mina.

La explotación de las minas subterráneas produce, además de la extracción de minerales valiosos, un descarte industrial denominado relave el que fundamentalmente corresponde a un material formado por partículas finas, 20 a 120 micrones aproximadamente, y agua formando una pulpa con contenido de sólido en el rango de los 55 a 70 % de sólido. Debido a que las leyes de los minerales valiosos son cada vez más bajas, el volumen de relaves generado por las plantas ha aumentado, caracterizados además por partículas aún más finas a causa del aumento en el grado de molienda con el fin de liberar las especies valiosas [1].

Durante la excavación de minas subterráneas, y dependiendo del método de extracción utilizado, se debe hacer uso de pilares que soporten los techos de los caserones. Por ejemplo, el método de explotación denominado "Room and Pillar" consiste en ir dejando pilares que luego podrían ser recuperados parcial o totalmente. El principal desafío asociado a la recuperación de pilares, se encuentra en mantener la estabilidad de la mina subterránea, evitando por ejemplo el hundimiento de los techos [1].

Una de las formas de lograr este objetivo es a través del uso de relleno, los que ayudan en la estabilización de la mina. Cuando estos rellenos consideran la utilización de descartes del proceso minero (por ejemplo relaves), su utilización es percibida como una manipulación amigable con el medio ambiente y como una opción económica de descarte permanente de desechos mineros. Utilizar los relaves de esta manera influye positivamente en la vida útil de los tranques

de relave, debido a que una parte de los desechos generados vuelven a los caserones [2], pero si el objetivo es la recuperación de los pilares, la mezcla generada para ser utilizada como relleno deberá cumplir con requisitos de fluencia y resistencia.

Como material de relleno se utilizan relaves convencionales, relaves en pasta, estéril de mina, mezclas de los anteriores y relaves o estéril cementados [1].

Los rellenos en pasta fueron desarrollados para utilizar estos desechos finos como rellenos subterráneos seguros y como una tecnología que maximiza la recuperación segura del mineral. Este tipo de relleno, asegura las excavaciones subterráneas, y disminuye la subsidencia (hundimiento progresivo en la superficie de la mina debido a su explotación) [3].

Dentro de las características de los rellenos en pasta, se encuentra que contienen por lo menos 15% de partículas bajo los 20 μm , cuando son colocados en la mina no producen agua sobrenadante, no sedimentan mientras se mueven por las tuberías, y su comportamiento puede ser descrito como un fluido no newtoniano [1] [4] [5], esto implica que a bajos esfuerzos de corte los rellenos en pasta se comportan como un cuerpo rígido, pero a altos esfuerzos fluye como un fluido viscoso.

Para explotar los pilares de una mina subterránea en condiciones seguras, es necesario rellenar los caserones, con rellenos cementados que desarrollen una resistencia a la compresión simple (UCS) mínima de 0,7 a 2 [MPa], según lo indicado por M. Fall, (2008) [6]. Para lograr estos valores de resistencia es necesario incorporar a la pasta de relaves pequeñas proporciones de cemento. Esta tecnología ha sido utilizada en la generación de rellenos (backfill) en la minería subterránea de oro y plata [7]. La mezcla es conocida como rellenos de pastas cementadas (CPB por sus siglas en inglés), donde el cemento actúa

como conglomerante, aumentando la resistencia de la mezcla, dando soporte a las partículas finas del relave y evitando la sedimentación.

Los rellenos en pasta cementadas generan resistencia a la compresión simple luego de un tiempo determinado de curado. El curado consiste en suplir el agua de la mezcla que se consume por la hidratación del cemento durante su fraguado.

La resistencia a la compresión simple de las mezclas cementadas se mide sometiendo una probeta endurecida de la mezcla a un esfuerzo de compresión uniaxial.

A pesar de todos los avances y estudios que se han hecho respecto a esta tecnología, no existen aplicaciones de rellenos a la minería subterránea del cobre ni mucho menos en Chile, por lo tanto, todos los estudios que se encuentran en la literatura referentes a características de las mezclas utilizadas como relleno con el fin de recuperar pilares, no son del todo válida para nuestros minerales ni para el comportamiento que tendrán nuestras mezclas de relave y cemento. Siendo en estos casos inciertos el adecuado contenido de cemento, la granulometría apropiada de la mezcla y el porcentaje de sólidos de los relaves, a utilizar entre otras cosas.

Es por lo anterior que el Centro de Investigación JRI (CI-JRI) postuló a un proyecto CORFO denominado “Estudio del comportamiento reológico de pastas de arenas de relave cementados para su utilización como relleno hidráulico de caserones abandonados” COD 13IDL1-25534, el que fue adjudicado en abril del 2014 y cuyo principal objetivo es evaluar la tecnología de generación de relleno de caserones a partir de relaves de cobre, para la recuperación del material valioso existente en los pilares de minas subterráneas.

Enmarcado dentro de este proyecto se desarrolla el presente trabajo de memoria, el que tiene como objetivo principal:

- Determinar la dosificación óptima de Relave-Cemento-Agua para obtener una pasta que pueda ser transportada hidráulicamente y que desarrolle una resistencia mecánica adecuada una vez endurecida.

Y los objetivos específicos:

- Revisar el estado del arte sobre pastas de relaves cementadas.
- Caracterizar física y químicamente las pulpas de relave de cobre.
- Obtener pastas de relaves cementadas con distintas dosificaciones de cemento.
- Estudiar el comportamiento mecánico de las pastas cementadas en el tiempo.
- Preparar probetas para ensayos de compresión simple a diferentes tiempos de curado.
- Analizar los resultados de ensayos de compresión simple.

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1. Antecedentes y estado actual del tema

En la literatura existen varios estudios sobre CPB realizados por diferentes autores (M. Fall, M. Benzaazoua, T. Belem, S. Ouellet, entre otros), Estos estudios han aportado conocimiento respecto a la función que cumplen las características físicas, químicas y mecánicas de los componentes de los CPB, logrando relacionar todo lo anterior con el desarrollo de la resistencia a la compresión y con la adecuada dosificación de los materiales necesarios para generar el relleno, todo lo anterior aplicado principalmente a la minas de oro y polimetálicas [3] [7] [8].

A través de numerosos ensayos M. Fall et al. (2004) determinaron la influencia de las propiedades físicas y químicas de los componentes del CPB en el comportamiento del relleno. Las variables que influyen principalmente el comportamiento mecánico de la mezcla generada son: El tipo de agua, los conglomerantes, y el tipo de pulpa de relave utilizada, la granulometría y densidad de la pulpa. En estos estudios se determina la influencia del tamaño de partículas de la pulpa, la densidad de la pulpa, las proporciones de agua-cemento (W/C por sus siglas en inglés), cantidad de cemento, cantidad de aditivo y tiempo de curado, entre otros, en el desarrollo de resistencia del relleno. [3] [7]

Referente a los relaves, en la actualidad son tratados en espesadores de distintos tipos (convencionales, HR o pasta entre otros) y luego la pulpa de relave concentrado (56 a 68% de sólidos en peso) es transportado hasta tranques o depósitos, donde se seca (evaporación) y en la mayoría de los casos también se recupera el agua sobrenadante.

Inicialmente estos procesos se llevaban a cabo sin mayores estudios científicos ni con un sentido medioambiental, pero debido a un aumento de la rigurosidad de las leyes medioambientales y lo escaso del recurso hídrico en la mayor parte de las zonas mineras, se ha incrementado el interés por la investigación y la innovación en temas relacionados con el tratamiento de relaves.

2.2. Antecedentes de caracterización

A continuación se presentan los antecedentes que se tienen que tener en cuenta para entender parte de la teoría de fondo que corresponde a la caracterización de los materiales utilizados en la fabricación de los rellenos en pasta cementadas.

2.2.1. Determinación de los límites de consistencia

Los relaves mineros pueden tener distinta consistencia, dependiendo de la concentración de sólidos de la pulpa. Si un relave tiene un alto contenido de agua, superior al 60% de su peso su comportamiento es similar a un fluido Newtoniano. A medida que la concentración de sólidos aumenta su consistencia cambia hasta llegar a una pasta (fluidos no newtonianos); cuando el contenido de humedad es inferior a un 20% el relleno pasará a tener un comportamiento más plástico, y si se sigue disminuyendo comenzará a comportarse como un semisólido. Si el contenido de humedad es cercano a cero, el relleno estará en un estado sólido, donde se podría observar un comportamiento granular, que no puede ser moldeado [1].

El límite líquido (LL) es el contenido de humedad en que una porción de suelo (relaves para este caso) muestra un comportamiento entre líquido y plástico. El límite plástico (LP) es el contenido de humedad que tiene una porción de suelo, y que muestra un comportamiento entre plástico y semisólido. Lo anterior se puede observar en la Figura 2.1

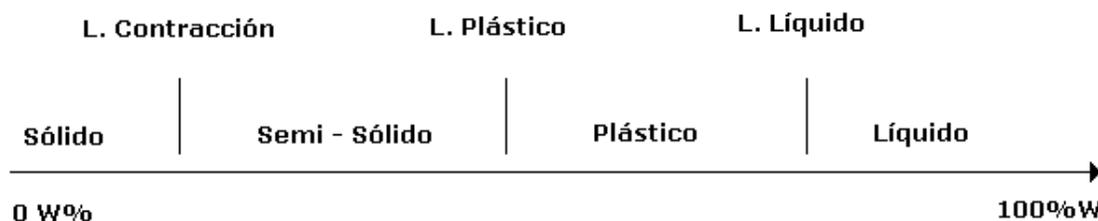


Figura 2.1 representación esquemática de Límites de consistencia para distintos contenidos de humedad. [9]

El índice de plasticidad es el rango de humedades en el que el suelo tiene un comportamiento plástico.

$$IP = LL - LP \quad \text{Ec. 2.1}$$

Un suelo con un índice de plasticidad bajo, tiene una gama muy estrecha de plasticidad, y por el contrario, un suelo con un índice de plasticidad alto tiene características plásticas muy elevadas.

En general, los suelos arcillosos, resbaladizos, que pueden remodelarse con facilidad y laminarse en tiras largas, tienen un índice de plasticidad elevado.

2.2.2. Determinación del límite líquido

Como se mencionó anteriormente, el límite líquido es el contenido de humedad en la frontera entre las fases plástica y líquida.

El límite líquido de una pulpa de relave puede ser estimado utilizando dos métodos diferentes. Un método utiliza un penetrómetro de cono [10], y el otro usa el equipo de Casagrande [9].

El penetrómetro de cono de la Figura 2.2, consiste de un cono de 60 gramos de peso con un ángulo de punta de 60°, se sumerge exactamente 10 a 20 mm (según el estándar utilizado) en una taza de suelos remodelados en un período

de 5 segundos. Este método es del tipo estático, ya que los resultados básicamente dependen de la resistencia al corte de suelo.



Figura 2.2 Penetrómetro de cono para medición de límite líquido.

El otro método para determinar el límite líquido, hace uso del equipo de Casagrande, que consiste de una cuchara de bronce que se deja caer por su propio peso desde una altura de 1 [cm] a una frecuencia de 2 golpes por segundo, controlados por una manivela, que se puede apreciar en la Figura 2.3.

Utilizando el equipo de Casagrande, el límite líquido corresponde a la humedad a la que se junta una ranura de 13 [mm] (hecha con el acanalador de la Figura 2.4) en 25 golpes de la cuchara de bronce.



Figura 2.3 Equipo Casagrande para límite plástico. Imagen propia.

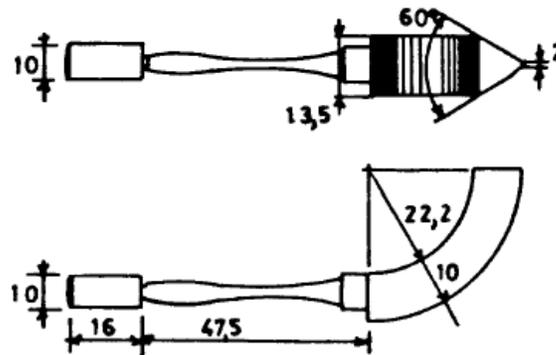


Figura 2.4 Acanalador ASTM [11]

Los resultados que se obtienen de este ensayo son el número de golpes y el porcentaje de humedad que posee la muestra al momento de juntarse la ranura. Este método introduce efectos dinámicos en la experimentación que son considerados errores sistemáticos. Dentro de éstos mayormente se encuentran la manipulación de la manivela, y el enrasado de la muestra.

2.2.3. Distribución granulométrica

El tamaño de partícula de los relaves varía desde arenas finas hasta tamaños de partículas de arcillas, y el tamaño final es dependiente del nivel de molienda llevado a cabo durante el procesamiento [1]. La forma más común de representar el tamaño de las partículas es a través de un gráfico de distribución acumulativa, también conocido como curva granulométrica.

Dentro de los instrumentos utilizados para la medición de los tamaños de partículas se encuentran los tamices y los equipos de difracción láser. El método de retención por tamiz es el más sencillo, y permite medir tamaños de partículas entre 38 y 8000 μm a través de una serie de tamices circulares. Cada uno de los tamices con distintos tamaño de poros, son ordenados desde el mayor a menor de forma consecutiva.

El equipo utilizado para realizar la caracterización de forma automática y minimizando los errores sistemáticos, es un vibrador de tamices (RO-TAP) como el que se observa en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Vibrador de tamices RO-TAP (CI-JRI).

Este equipo imita el golpeo y movimiento circular del método de tamizado manual.

Los equipos de difracción laser permiten medir un amplio rango de tamaños, presentando la ventaja de poder caracterizar los tamaños finos y ultra finos, con rango que fluctúan entre 0,02 a 2800 μm .

El equipo de difracción láser utilizado en este estudio corresponde al Microtrac S3500 que se observa en la Figura 2.6. Instrumento que hace uso de 3 diodos láser rojo.



Figura 2.6 Equipo de difracción láser Microtrac s3500 (CI-JRI).

Los resultados que se obtienen con una caracterización granulométrica son los diámetros característicos D10, D50, D80, etc., que corresponden al diámetro de la abertura del tamiz por el que pasa el 10%, 50%, 80%, etc., de la muestra ensayada.

También es posible determinar el porcentaje de finos (%Finos) que contiene la muestra y que corresponde a la cantidad de partículas que tienen un diámetro menor a 20 $[\mu\text{m}]$.

De la información que entregan los diámetros característicos, es posible calcular el coeficiente de uniformidad, que es expresado por la razón D60/D10.

Este coeficiente es una medida de la dispersión de la distribución de tamaños de partículas. Un C_u alto indica una curva granulométrica con una distribución más amplia e indica que el material es bien gradado, es decir, que tiene diversos tamaños de partículas. Los rellenos en pasta tienen C_u altos, desde 10 hasta 20 en algunos casos [1]

En mecánica de suelos, una muestra con una distribución de tamaños de partículas heterogéneas indica que es pobremente gradada, es decir, tiene un tamaño de partículas predominante. En el caso contrario, cuando una muestra tiene una distribución homogénea de tamaños de partículas, se dice que es bien gradada, es decir, que tiene diversos tamaños de partículas.

2.2.4. Caracterización reológica

La reología es una rama de la física de medios continuos que estudia el comportamiento de los fluidos. Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología pueden ser medidas mediante reómetros (ver Figura 2.7); que son instrumentos capaces de medir cómo fluye un líquido, mezcla o suspensión bajo la acción de fuerzas externas. Con estos instrumentos es posible medir la tensión de fluencia y la viscosidad del material en estudio.

La tensión de fluencia es un esfuerzo tangencial crítico. Es una medida importante en las aplicaciones de transporte de fluidos, ya que conociendo este valor es posible, por ejemplo, saber cuál es la tensión mínima para poder poner en movimiento un fluido que inicialmente estaba en reposo

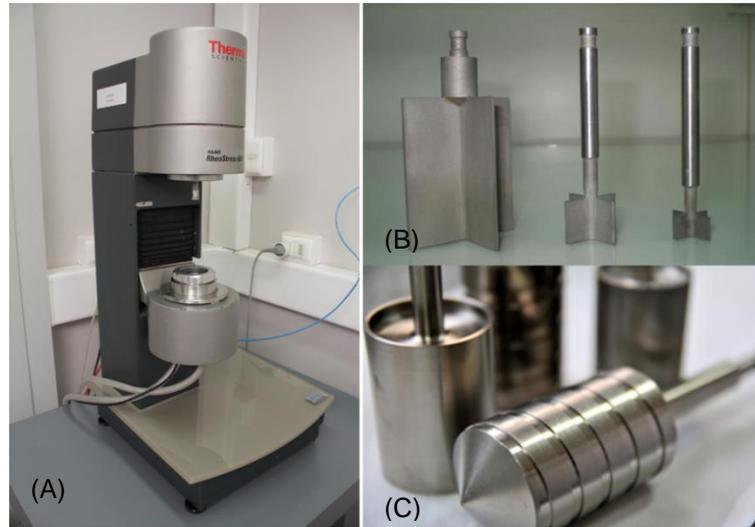


Figura 2.7 (A) Reómetro Haake RS6000. (B) Sensores Vane. (C) Sensor helicoidal y liso (CI-JRI).

Un reómetro funciona con diferentes tipos de sensores: vane, helicoidal, cilíndrico, entre otros, y el uso de cada uno depende de la medición que se quiera realizar y del tipo de solución que se quiera caracterizar. Algunos reómetros requieren para su correcto funcionamiento un compresor de aire, y para mediciones precisas se requiere un baño térmico que mantenga constante la temperatura de medición.

Para caracterizar reológicamente la pulpa de relave, se determina la tensión de fluencia a distintas concentraciones de sólidos utilizando los sensores Vane y helicoidal, con el objetivo de obtener el esfuerzo mínimo que se debe aplicar a la pulpa para que fluya.

El sensor empleado en la fase experimental fue el sensor Vane, que también es llamado método Vane, que es básicamente una técnica de mecánica de suelos usada para la medición de la tensión de fluencia de suelos cohesivos, in situ [12]. Según Sevimoghaddam, este método Vane ha sido establecido como una técnica simple y precisa para la medición directa de la tensión de fluencia.

2.3. Efecto del porcentaje de finos en el desarrollo de resistencia del relleno en pasta

En los estudios realizados por Yilmaz et al., 2006 y Fall et al. , 2005 se define que una partícula es fina cuando tiene un diámetro menor a $20\mu\text{m}$ [7] [13]. Con esta definición, los autores crearon distintas muestras de relaves con distintos porcentajes de partículas bajo $20\mu\text{m}$ para evaluar su influencia en la resistencia a la compresión de la pasta endurecida.

Los relaves estudiados por M. Fall et al., 2004 [3] tienen distinta distribución granulométrica, como se puede observar en la Figura 2.8. Para generar estas granulometrías, los relaves muestreados fueron reprocesados por medio de hidrociclones y tamices y las partículas gruesas fueron separadas de las finas, permitiendo la generación de distintas distribuciones de tamaño de partículas.

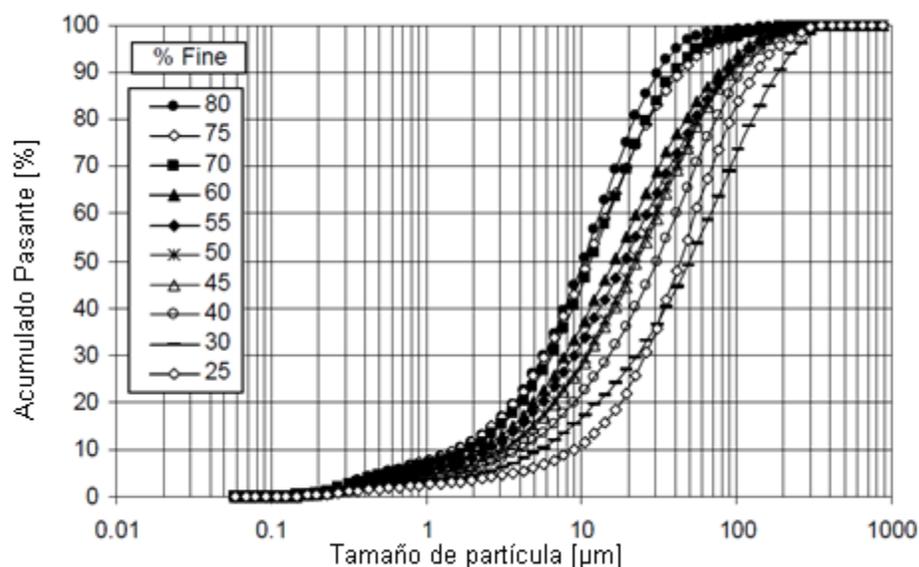


Figura 2.8 Distribución de tamaño de partículas de los relaves usados en estudios de M. Fall et al. [3]

La Tabla 2.1 muestra la dosificación utilizada en el estudio del efecto que tienen las partículas finas en el desarrollo de la resistencia a la compresión del relleno cementado. Los relaves utilizados en esta tabla pertenecen a minas del este de

Canadá, donde los relaves TA corresponden a una mina de oro y los relaves TB corresponden a una mina polimetálica.

Observando en más detalle la Figura 2.8, se puede ver que los relaves difieren casi solamente en la proporción de finos, esto se aprecia debido a que las curvas están trasladadas en el eje del tamaño de partículas. Lo que quiere decir que básicamente son los mismos relaves, que se diferencian únicamente en la proporción de partículas finas.

Tabla 2.1 Diseño de las mezclas para la evaluación del efecto del %Fino en las propiedades del relleno en pasta.

Nombre de mezcla	Conglomerante			Relaves			Tipo de agua	Slump [cm]
	Tipos	Razón	Cemento [%]	Nombre	Densidad [g/cm ³]	Fino [%]		
MTA-1-S	PCI/Slag	20/80	4,5	TA-1	2,8	75	Agua de llave	18
MTA-2-S	PCI/Slag	20/80	4,5	TA-2	2,8	60		18
MTA-3-S	PCI/Slag	20/80	4,5	TA-3	2,8	55		18
MTA-4-S	PCI/Slag	20/80	4,5	TA-4	2,8	40		18
MTA-5-S	PCI/Slag	20/80	4,5	TA-5	2,8	25		18
MTB-1	PCI/Slag	20/80	4,5	TB-1	3,4	80		18
MTB-2	PCI/Slag	20/80	4,5	TB-2	3,4	70		18
MTB-3	PCI/Slag	20/80	4,5	TB-3	3,4	60		18
MTB-4	PCI/Slag	20/80	4,5	TB-4	3,4	50		18
MTB-5	PCI/Slag	20/80	4,5	TB-5	3,5	30		18

En la Figura 2.9 se muestra el efecto que tienen las partículas finas (<20 μ m) en la resistencia a la compresión simple del relleno endurecido. Se puede observar que los relaves con menores porcentajes de partículas finas (relaves gruesos) desarrollan mayores resistencias a la compresión. Este comportamiento puede ser atribuido a que el tamaño de partículas influye en la superficie específica del relave, ya que al tener una mayor cantidad de partículas pequeñas, mayor es el área que se tiene que humedecer.

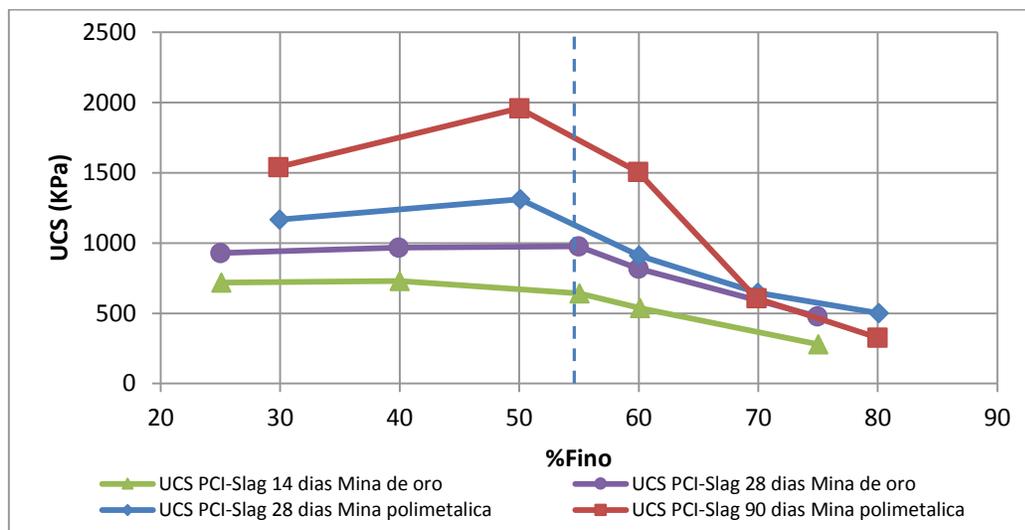


Figura 2.9 Efecto del porcentaje de finos del relave en el desarrollo de resistencia del relleno de pasta cementado. [3]

M. Fall et al. (2004) [3] indica que para las mezclas estudiadas, en los relaves más gruesos existe un desarrollo de altas resistencias en tiempos de curados menores. Por ejemplo, para un tiempo de curado de 28 días se observa que la resistencia a la compresión supera los 900 [kPa] para muestras de minas de oro y polimetálicas con contenidos de fino menores a 55%, mientras que para relaves con mayores concentraciones de finos no se desarrollan mejores resistencias para etapas tempranas del período de curado de las probetas. Entonces se concluye que las mezclas de relaves cementados en las que se utilizan pulpas de relaves con menor contenido de partículas finas generan resistencias a la compresión mayores que las mezclas realizadas con pulpas con mayor contenido de partículas finas

2.4. Efecto del porcentaje de finos en el requerimiento de agua del relleno de pasta fresco

Los resultados de los estudios realizados por M. Fall et al.(2004) [3] demuestran que para relaves con mayores porcentaje de finos es necesario

aumentar la razón W/C de la mezcla cementada. Esto implica que las mezclas requieren una mayor cantidad de agua para tener una mezcla con la misma consistencia. Esto se debe a que el cemento es un adhesivo, y por lo mismo debe cubrir la superficie de las partículas de los relaves, y tal como se explicó anteriormente, las partículas finas suponen una mayor superficie específica a humedecer. En la Figura 2.10 se puede observar el fenómeno descrito anteriormente, donde la línea segmentada representa un 55% de partículas finas.

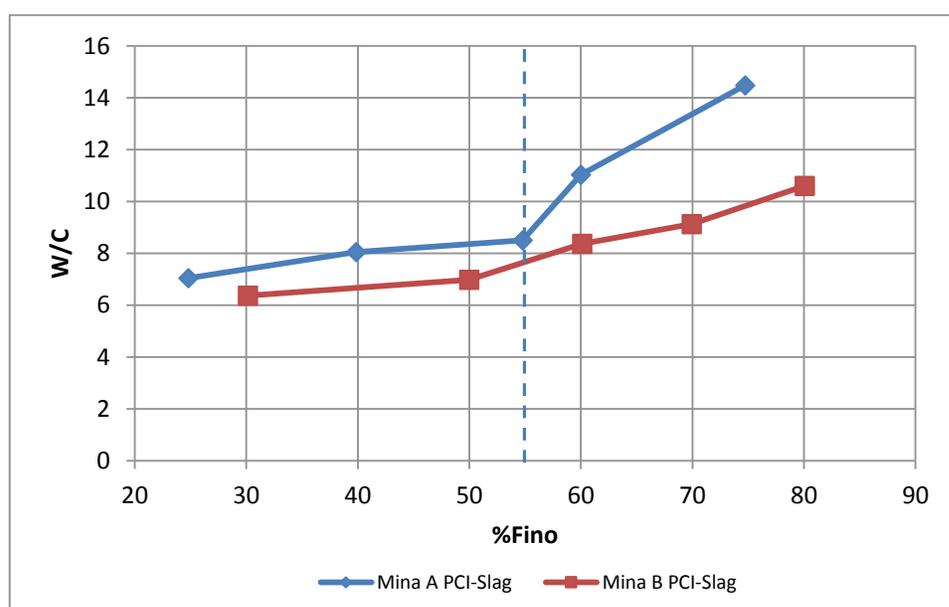


Figura 2.10 Influencia del contenido de partículas finas en la razón de W/C. [3]

2.5. Efecto de la densidad del relave en el desarrollo de resistencia del relleno en pasta

En el estudio de M. Fall et al. se varió la densidad de los relaves utilizando un proceso de flotación [14], en vista de que el relave considerado en el estudio la densidad dependía fuertemente de la cantidad de pirita (FeS_2) que contenía el relave [3], y al eliminar una porción controlada de ésta fue posible obtener distintas densidades.

La dosificación de las mezclas para evaluar el efecto de la densidad sobre la resistencia a la compresión del relleno de pasta se puede observar en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Diseño de las mezclas para la evaluación del efecto de la densidad del relave en las propiedades del relleno en pasta.

Nombre de mezcla	Conglomerante			Relaves			Tipo de agua	Slump [cm]
	Tipos	Razón	%peso	Nombre	Densidad [g/cm ³]	%Fino		
MTB-7	PCI/Slag	20/80	4,5	TB-7	3,1	45	Agua de llave	18
MTB-8	PCI/Slag	20/80	4,5	TB-8	3,2	45		18
MTB-9	PCI/Slag	20/80	4,5	TB-9	3,4	45		18
MTB-10	PCI/Slag	20/80	4,5	TB-10	4,2	60		18

En la Figura 2.11 se muestra como varía la resistencia a la compresión simple con la densidad específica de la pulpa de relave luego de 28 y 56 días de curado

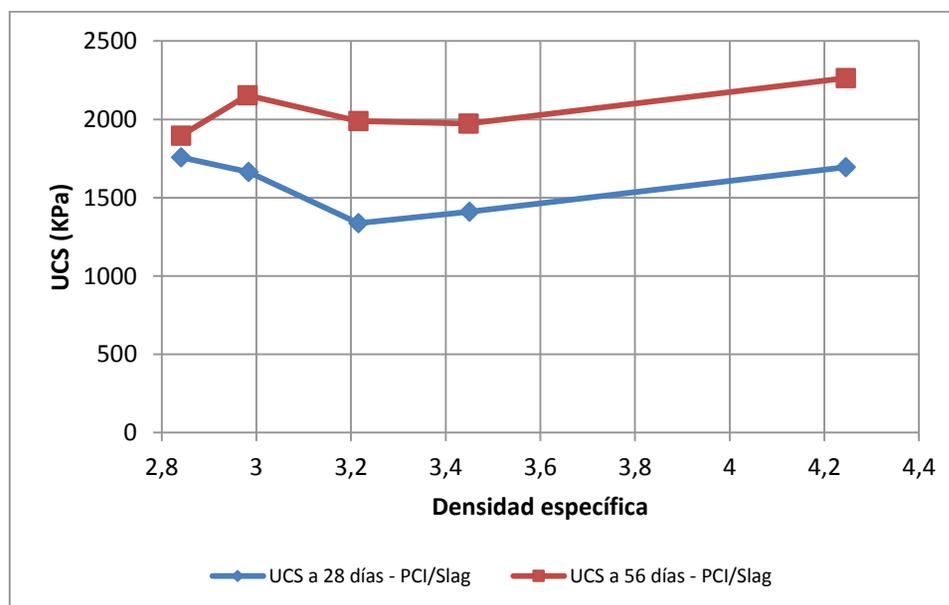


Figura 2.11 Efecto de la densidad en la UCS de muestras de relave hechas del relave B[3]

Este aumento en la resistencia a la compresión se debe a un mayor consumo de conglomerante como se muestra en la Figura 2.12. Lo anterior es un punto importante en la evaluación del costo del desarrollo de la mezcla, ya que a medida de que se tiene un relave con una alta cantidad de hierro (causante del aumento de densidad del relave), más caro se convierte el relleno. Es por esto que M. Fall et al. Indican que es importante utilizar relaves que tengan bajos contenidos de pirita (por el hierro), para asegurar que la mezcla no sea cara.

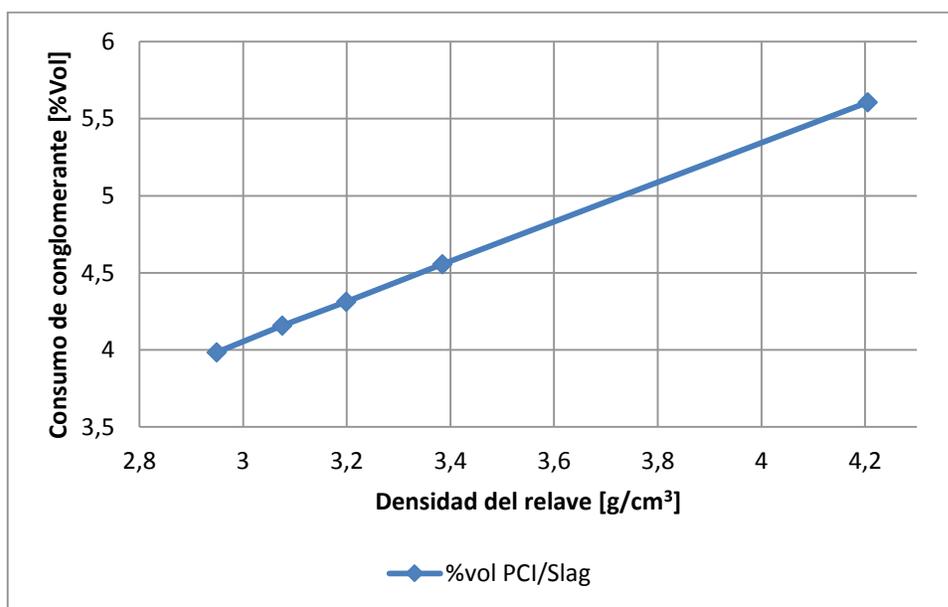


Figura 2.12 Relación del consumo de conglomerante con la densidad del relave usado. [3]

2.6. Modelos predictivos de resistencia a la compresión

Por medio de modelos predictivos es posible modelar los resultados presentados anteriormente y de esta forma realizar una menor cantidad de ensayos de dosificación de prueba para obtener resultados esperados en relación a la UCS, reologías, concentración de sólidos y costos [6].

Es de vital importancia tener conocimiento de la dosificación del CPB, porque se tiene que cumplir con requisitos mínimos tanto técnicos como económicos, con el fin de satisfacer las demandas del diseño minero.

En la Figura 2.13 se muestra una correlación entre USC medida a los 28 días, contenido de cemento, relación agua/cemento (W/C), porcentaje de finos de la pulpa de relaves y densidad de la pulpa de relaves. Como es esperado, un aumento en la cantidad de cemento lleva a un aumento en la resistencia a la compresión del CPB.

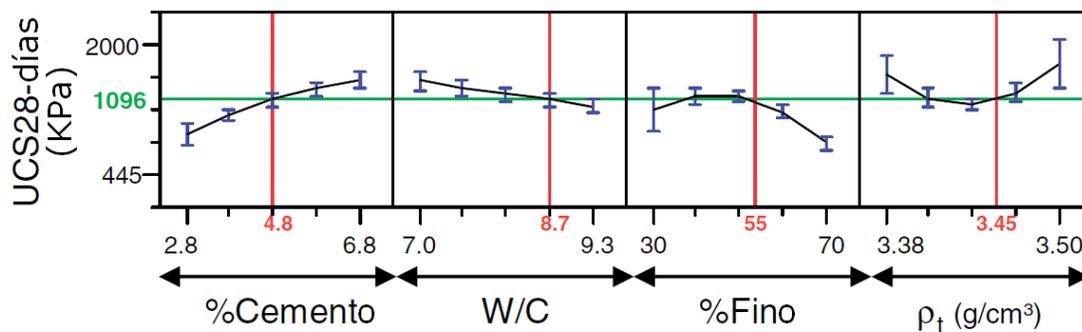


Figura 2.13 Perfil de predicción de la UCS a 28 días. [6]

De la Figura 2.13, se observa que, para el caso estudiado por los autores [6], los relaves con partículas de $20\mu\text{m}$ $>60\%$ en peso no generan la resistencia a la compresión necesaria para utilizarlos como relleno. Los relaves con contenidos partículas de $20\mu\text{m}$ entre 15 a -60% en peso desarrollan una resistencia a la compresión del CPB adecuada.

De la Figura 2.13 también se deduce que un contenido de finos entre el 40 a 50% en peso es la cantidad de finos adecuada para obtener la mayor resistencia a la compresión para los CPB estudiados (cuando el conglomerante usado es cemento Portland tipo I y escoria de alto horno mezclado en una razón 20/80).

En la Figura 2.13 se muestra que la densidad de los relaves afecta el desarrollo de la resistencia a la compresión del CPB, para valores de $3,40 \text{ g/cm}^3$ o superior, la UCS aumenta con el incremento de la densidad del relave. Este aumento es debido al alto consumo en volumen de conglomerante [7], generando mayores costos de producción del CPB.

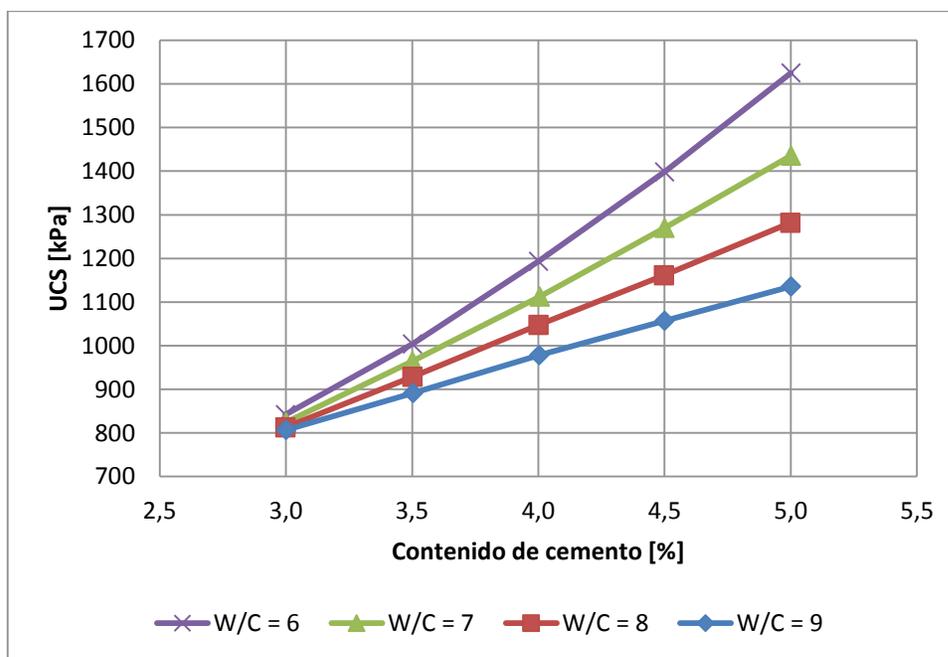


Figura 2.14 Efecto de la razón W/C en la UCS a los 28 días del CPB para diferentes contenidos de aglomerantes (%Fino = 40%; densidad de relave, $\rho_t = 3,459 \text{ g/cm}^3$) [6]

En la Figura 2.14 se puede observar que existe una relación entre el contenido de cemento y la razón agua/cemento (W/C) donde, para cualquier porcentaje de cemento estudiado, se cumple que para menores proporciones de W/C se generan mayores resistencias a la compresión.

2.6.1. Efectos de los parámetros del modelo en el slump del relleno en pasta

El ensayo de slump consiste en llenar un cilindro con el material a ser estudiado, luego este cilindro se levanta dejando que el material colapse bajo su propio peso. La altura final del material deformado es medida, y la diferencia entre la altura inicial y la final es la llamada slump (slump height). En la Figura 2.15 se muestra el procedimiento explicado anteriormente.

Este ensayo es ampliamente utilizado por ingenieros civiles para tener una idea de la trabajabilidad de la mezcla, como también para tener conocimientos previos de las propiedades de fluencia del material.

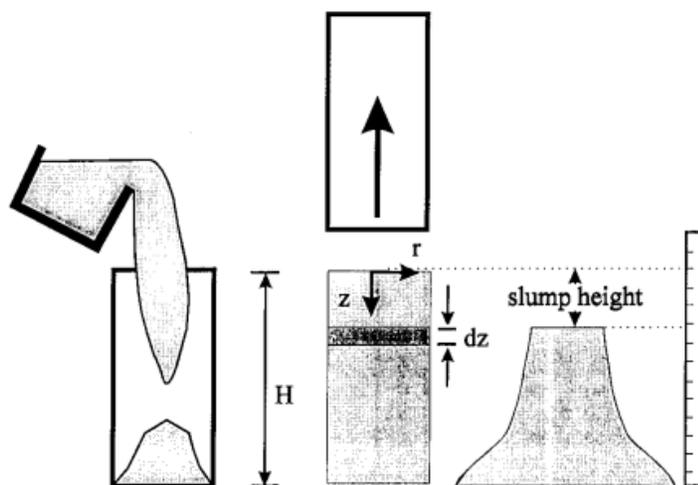


Figura 2.15 Diagrama del procedimiento para medir el slump. [12]

Los efectos de la proporción de conglomerante y tamaño de partículas de relave y densidad en el slump del CPB son presentados en la Figura 2.16. Como era de esperar, mayores proporciones de conglomerante confieren mayores slump al CPB, dado que aumentan la distancia promedio entre las partículas del relave, esto es reduciendo la fricción de partículas inter-relave, colisiones y subsecuente bloqueo. Sin embargo, el slump disminuye a medida que la

densidad del relave aumenta. Incluso el porcentaje de finos del relave tiene un efecto en el slump del CPB (Figura 2.17).

De la Figura 2.17 se logra rescatar que el porcentaje de partículas finas también tiene un efecto en el slump. Para relaves que contienen una gran cantidad de partículas finas, el slump va a corresponder a un valor menor, y cuando se tiene un relave más grueso el slump es mayor.

En efecto, CPB hechos de relaves más finos presentan un menor slump. Las razones más comunes para esta disminución del slump del CPB, para una razón de W/C dada, es que las partículas finas del relave aumentan la demanda de agua del CPB debido a un aumento en el área superficial y de la disponibilidad de espacios vacíos entre las partículas de relave.

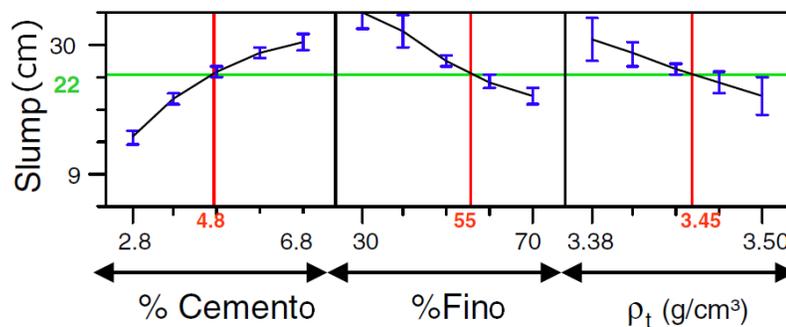


Figura 2.16 Perfil de predicción de slump. [6]

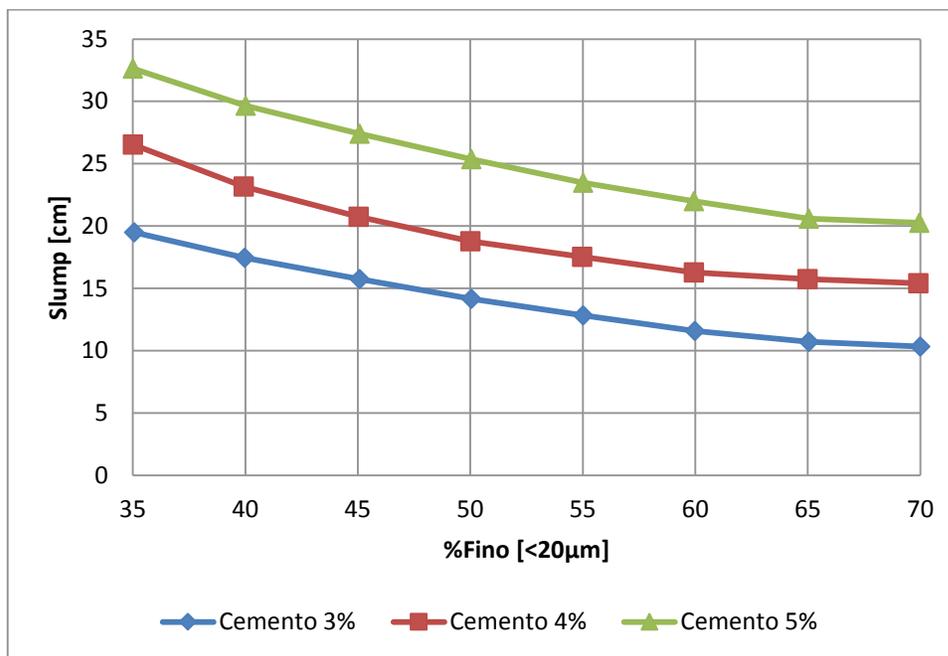


Figura 2.17 Efecto del tamaño de partículas del relave en el slump del CPB para diferentes contenidos de conglomerantes ($W/C = 7$; densidad de relave, $\rho_t = 3,459\text{g/cm}^3$) [6]

2.6.2. Efectos de los parámetros del modelo en el porcentaje de sólidos de la pulpa

En la Figura 2.18 se observa que la variación del porcentaje de sólidos del relave está relacionada al contenido de cemento, W/C , %Fino y densidad de relave. Como se anticipaba, se puede observar que la concentración de sólidos es muy sensible a las variaciones del contenido de cemento y a la razón W/C .

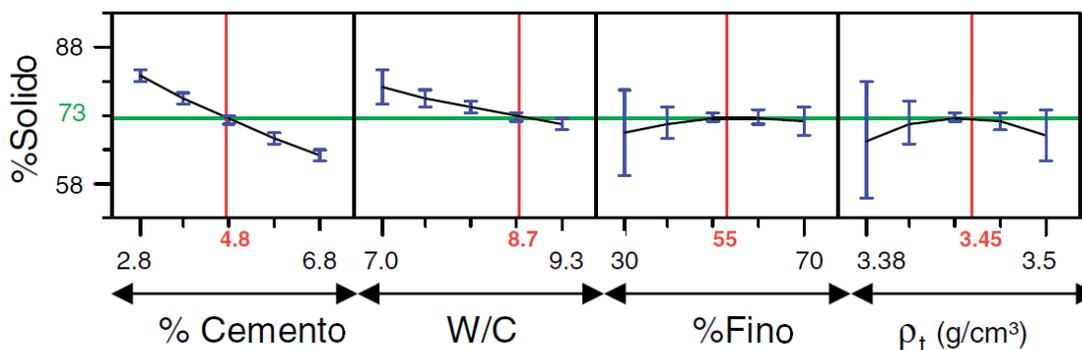


Figura 2.18 Perfil de predicción del porcentaje de sólidos del CPB. [6]

Por lo tanto, los valores óptimos para la dosificación de relaves para obtener valores de UCS de 1 [MPa] corresponden a los mostrados en la Tabla 2.3

Tabla 2.3 Valores óptimos para mezclas de relaves cementados estudiados por M. Fall (2008)

%Cemento	4,8%
Razón W/C	8,7
%Fino	55%
ρ_t (g/cm ³)	3,45

2.6.3. Fundamento teórico de la dosificación

La dosificación implica establecer las proporciones adecuadas de los materiales que componen una mezcla. Para el caso en estudio los componentes corresponden a cemento, sólidos de la pulpa de relave, agua y eventualmente aditivos.

Dentro de la dosificación es de vital importancia la relación que existe entre la masa de agua con la masa de cemento. Esta relación es conocida como la razón agua-cemento (A/C o W/C).

$$\frac{W}{C} = \frac{m_a}{m_c} = \frac{\rho_a V_a}{\rho_c V_c} \quad \text{Ec. 2.2}$$

En la ecuación anterior, m_c es la masa de cemento utilizada en la mezcla y m_a es la masa de agua.

La concentración de sólidos de la pulpa de relave (C_p) puede ser establecida por la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{m_s}{m_s + m_a} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde m_s es la masa de sólidos y m_a es la masa de agua en la mezcla.

Para la dosificación de las mezclas de pastas de relave cementadas se tienen que tener en cuenta distintos aspectos. Inicialmente se tiene que fijar una concentración de sólidos, con la que se elegirán distintas concentraciones de cemento, y como resultado se obtiene la relación de agua cemento antes mencionada.

La cantidad de cemento es un porcentaje del volumen total de la mezcla, y que para la aplicación de pastas cementadas es elegido 3%, 5% y 7% del volumen.

Los volúmenes comentados anteriormente se pueden expresar de la siguiente forma:

$$V_t = V_a + V_s + V_c \quad \text{Ec. 2.4}$$

Las variables V_t, V_a, V_s, V_c corresponden al volumen total de mezcla, de agua, de sólidos y de cemento, respectivamente.

Se debe tener en cuenta que no se consideran los poros y espacios vacíos, debido a que la mezcla con agua los elimina.

Considerando la ecuación Ec. 2.3, es posible determinar el volumen de sólidos de la pulpa.

$$C_p = \frac{\rho_s V_s}{\rho_s V_s + \rho_a V_a} \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$C_p \rho_s V_s + C_p \rho_a V_a = \rho_s V_s \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$C_p \rho_a V_a = (1 - C_p) \rho_s V_s \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$V_s = \frac{C_p}{(1 - C_p)} \frac{\rho_a}{\rho_s} V_a \quad \text{Ec. 2.8}$$

En la ecuación Ec. 2.8 se puede observar que el volumen de sólidos de la pulpa está en función del volumen de agua de la misma pulpa, además de las densidades (gravedades específicas) y la concentración de sólidos.

Como se dijo anteriormente, el volumen de cemento se considera como un porcentaje del volumen total:

$$V_c = K V_t \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde K es un porcentaje.

Para calcular el volumen de agua que debe contener la pulpa, se utiliza la relación W/C de la ecuación Ec. 2.2.

$$\frac{W}{C} = \frac{\rho_a V_a}{\rho_c V_c} = \frac{\rho_a V_a}{\rho_c K V_t} \quad \text{Ec. 2.10}$$

$$V_a = \left(\frac{W}{C}\right) \frac{\rho_c K V_t}{\rho_a} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Reemplazando los volúmenes en la ecuación Ec. 2.4, se obtiene lo siguiente:

$$V_t = V_a + \frac{C_p}{(1 - C_p)} \frac{\rho_a}{\rho_s} V_a + K V_t \quad \text{Ec. 2.12}$$

$$V_t(1 - K) = \left(1 + \frac{C_p}{(1 - C_p)} \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) V_a \quad \text{Ec. 2.13}$$

$$V_t(1 - K) = \left(1 + \frac{C_p}{(1 - C_p)} \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \left(\frac{W}{C}\right) \frac{\rho_c K V_t}{\rho_a} \quad \text{Ec. 2.14}$$

$$\frac{W}{C} = \frac{(1 - K)}{\frac{\rho_c K}{\rho_a} \left(1 + \frac{C_p}{(1 - C_p)} \frac{\rho_a}{\rho_s}\right)} \quad \text{Ec. 2.15}$$

El resultado de este desarrollo algebraico es la razón de agua-cemento en función de variables conocidas. Por lo que definiendo el volumen total de mezcla que se desea obtener, la concentración de sólidos que debe tener la

pulpa, y el porcentaje de cemento utilizado, en conjunto con las gravedades específicas de cada elemento, es posible determinar la relación agua-cemento de la mezcla, y los consecuentes volúmenes de cada material empleado para fabricar el relleno.

Con todas las ecuaciones calculadas se puede llevar a cabo la dosificación para una mezcla de pastas de relaves cementados.

Para una mayor facilidad de manipulación, se utilizan las masas de los elementos para la dosificación, ya que es ligeramente más complejo medir los volúmenes de cada uno.

2.6.4. Ley de Abrams

A través de una gran cantidad de ensayos de resistencia de probetas de hormigón, Duff Abrams logró establecer una relación empírica entre la resistencia a la compresión simple y la relación W/C. Este tipo de relación entrega información acerca de la correcta dosificación de las mezclas de concreto.

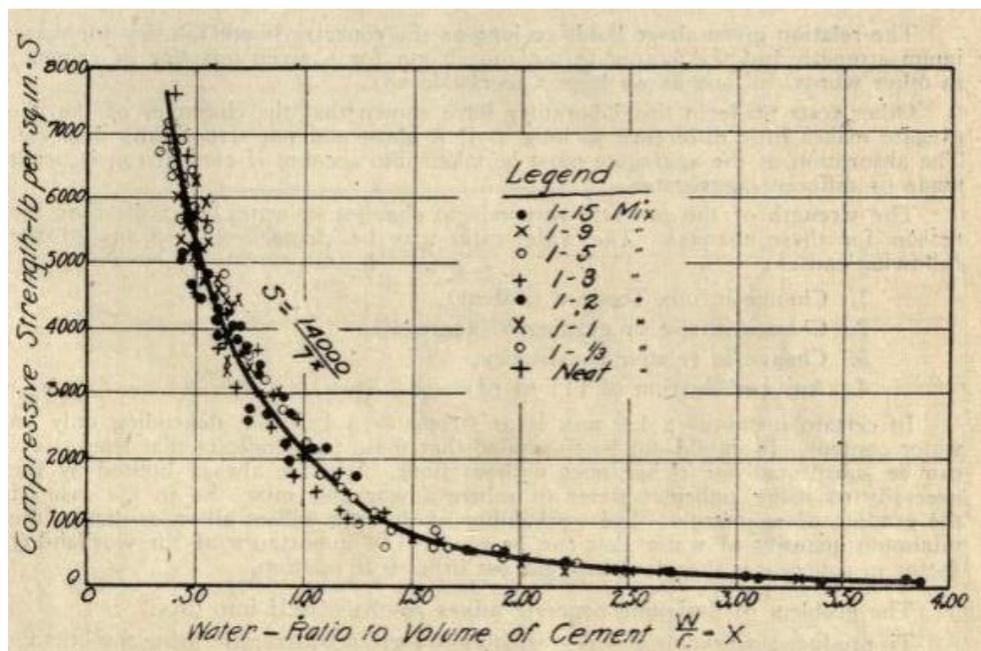


Figura 2.19 Relación entre la resistencia del concreto y el contenido de agua. [15]

La relación que obtuvo Abrams es la siguiente:

$$UCS = \frac{K_1}{K_2^{W/C}} \quad \text{Ec. 2.16}$$

Donde K_1 y K_2 son constantes, cuyos valores dependen de la calidad del cemento usado, la edad de la mezcla, condiciones de curado, entre otros.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Para determinar la dosificación óptima de una mezcla cementada para obtener una UCS específica medida a los 28 días de curado, se debe determinar las propiedades de los materiales que se mezclarán. Dado que no se sabe si los relaves de cobre se comportarán de la misma manera que los relaves estudiados en el estado del arte, no es posible predecir un valor de resistencia. La importancia radica en que luego de conocer que tipos de materiales se tienen, y las resistencias obtenidas, debería ser posible determinar cuáles de ellos influyen mayormente en el desarrollo de la resistencia de las pastas endurecidas.

Este tipo de caracterización puede clasificarse en tres propiedades principales: Física, Química y Mecánica.

La primera considera ensayos de densidad de sólidos (gravedad específica), distribución granulométrica, reología a distintas concentraciones de sólidos, pH, mineralogía, límite líquido y plástico, concentración de sales solubles, conductividad y potencial Z.

La caracterización mecánica considera los ensayos de compresión simple no confinada, y los ensayos reológicos.

En la siguiente Tabla 3.1 se resume los ensayos para la caracterización que se le realizarán a cada uno de los materiales que compone las mezclas estudiadas (relave, cemento, otros aditivos).

Tabla 3.1 Resumen de ensayos para cada material.

Material	Ensayos
Relave	Reología, granulometría, densidad de sólidos, pH, concentración de sólidos, conductividad, potencial Z, mineralogía.
Cemento	Mineralogía, granulometría.
Mezclas	Reología, ensayo compresión simple.
Aditivo	Granulometría, densidad de sólidos, concentración de sólidos.

En el caso de la caracterización mecánica de las probetas endurecidas de CPB, se considera la realización de ensayos de compresión simple a distintos días de curado, obteniendo los resultados de la resistencia a la compresión simple y el módulo de Young.

3.1. Determinación del Límite líquido

El procedimiento empleado está basado en la norma NCh1517/1 Of79, a la que se le hicieron algunos cambios con el objetivo de aumentar la rigurosidad en los ensayos, o de adecuarlos a los instrumentos con los que se cuenta.

Como primer cambio a la norma, se tiene que dado que el procedimiento para la determinación del límite líquido se aplicará a una pulpa de relave, no es necesario acondicionar la muestra agregando agua, al contrario, se debe retirar.

La norma indica que el procedimiento se debe repetir en por lo menos 2 pruebas adicionales. En este caso se ha cambiado en por lo menos 4 pruebas adicionales.

También se indica que los resultados deben ser presentados en un gráfico semilogarítmico, donde el eje X corresponde al número de golpes en escala logarítmica, y el eje Y a la humedad en escala aritmética. En el presente trabajo se optó por hacer un cambio de variable logarítmico, con la intención de obtener el límite líquido en una escala aritmética y con el error de la medición asociado.

3.1.1. Materiales para determinación del límite líquido

- Plato de evaporación. De porcelana, con diámetro aproximado de 120(mm).
- Espátula. Hoja flexible de aproximadamente 75(mm) de largo y 20(mm) de ancho.
- Equipo Casagrande (Aparato de límite líquido).
- Acanalador ASTM. Combinación de acanalador y calibre.
- Vidrio de reloj. Para determinar contenido de humedad.
- Balanza. Con una precisión de 0,01(g).
- Probeta. Con una capacidad de 25(ml).
- Estufa de secado.

3.1.2. Procedimiento aplicado

En forma general el procedimiento utilizado considera los siguientes pasos:

1. Espesar y filtrar la pulpa hasta obtener una concentración de sólidos de aproximadamente 80%.
2. Cortar la pulpa en 3 vasos de precipitado para realizar el ensayo en triplicado.
3. Tarar como mínimo 7 vidrios de reloj para la medición de humedad con el control de peso constante de las muestras.
4. Seguir el procedimiento descrito en la norma NCh 1517/1.Of79 [11].

Repetir las operaciones precedentes por lo menos en cuatro pruebas adicionales empleando el material reunido en el plato de evaporación. El ensayo se debe efectuar de la condición más húmeda a la más seca. Para tal efecto la pasta se bate con la espátula de modo que se vaya secando homogéneamente hasta obtener una consistencia que requiera de 15 a 35 golpes para cerrar la ranura.

3.2. Determinación del límite plástico

El procedimiento empleado está basado en la norma NCh 1517/2.Of79 [16], a la que se le hicieron algunos cambios con el objetivo de aumentar la rigurosidad en los ensayos, o de adecuarlos a los instrumentos con los que se cuenta.

Para este caso, la norma considera que se debe registrar la humedad de la porción de muestra analizada como un solo valor. En este caso se hace el

mismo procedimiento, pero contemplando la medición en duplicado, para determinar el límite plástico con mayor exactitud.

3.2.1. Materiales para determinación del límite plástico

- Plato de evaporación. De porcelana, con un diámetro de aproximadamente 120 mm.
- Espátula. Con una hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.
- Superficie de amasado. Placa de vidrio esmerilado.
- Juego de vidrios de reloj.
- Balanza. Con una precisión de 0,01 g.
- Patrón de comparación. Alambre o plástico de 3 mm de diámetro.

3.2.2. Procedimiento aplicado

En caso de haber realizado anteriormente el procedimiento para determinar el límite líquido, se utiliza la muestra remanente para determinar el límite plástico.

En forma general el procedimiento utilizado considera los siguientes pasos:

1. Amasar una porción de muestra lo suficientemente plástica como para moldearla como una esfera. El amasado se debe realizar en una superficie de vidrio esmerilado que sirva para retener la humedad de la muestra, se debe hacer rodar con la palma de la mano o la base del pulgar formando un cilindro.
2. Realizar el procedimiento hasta que el cilindro se disgregue al llegar a un diámetro de aproximadamente 3 mm y no pueda ser reamasado ni reconstituido.

3. Tomar una muestra de relave para determinar el contenido de humedad. Por medio de una estufa, secar la muestra. y controlar el peso hasta que sea constante.

3.3. Caracterización granulométrica de la pulpa de relave

Dentro de la caracterización de la pulpa de relave, se realiza una medición de tamaño de partículas. Debido a que generalmente las pulpas contienen un mayor porcentaje de partículas finas se hace uso de un equipo de difracción de rayos láser. El instrumento utilizado es un Microtrac S3500 que utiliza 3 diodos láseres rojos con un sistema patentado llamado Tri-Laser System.

La muestra que entra en el sistema debe estar diluida en agua desmineralizada, que previamente fue secada en una estufa y disgregada, de acuerdo a los protocolos del CI-JRI S.A.

Ya que dentro de los objetivos de estudio se encuentra determinar una dosis adecuada para realizar el transporte de la mezcla de CPB, se decide por cambiar la distribución granulométrica de la muestra RAI, con el fin de evaluar la participación que tiene el tamaño de partículas en la resistencia a la compresión del CPB.

El proceso se realiza utilizando el vibrador de tamices de la Figura 2.5, cortando la muestra sólida con un tamiz Tyler con una malla N°400 (38 [µm]). Debido a la lentitud del proceso de tamizado, se realiza este procedimiento a una fracción de los sólidos necesarios para fabricar las probetas, que luego se mezclan con la fracción restante de sólidos sin tamizar. El objetivo de este procedimiento sólo es cambiar la distribución granulométrica sin tener una distribución de tamaño de partículas objetivo.

El sólido que queda sobre la malla es el que se utiliza, ya que se pretende obtener un relave con una distribución de partículas más gruesas.

3.3.1. Procedimiento aplicado

Debido que la pulpa de relave se encuentra con una cierta cantidad de agua, debe ser sacada para tener preparada la muestra. La porción de sólidos de relave debe ser homogeneizada minuciosamente para asegurar que la mayor parte del espectro de partículas se mantenga en el recipiente.

En forma general el procedimiento considera:

1. Preparar muestra en duplicado.
2. Humedecer la muestra con agua desmineralizada y cargarla en el equipo de medición.
3. Por medio del software Microtrac FLEX registrar las curvas granulométricas obtenidas.

3.4. Caracterización reológica de la pulpa de relave

Para evaluar el comportamiento en transporte de las mezclas cementadas generadas, se realizan mediciones de la tensión de fluencia, utilizando un reómetro Rheometer RS6000, descrito en la sección 2.2.4.

Las distintas concentraciones a las que se estudia la pulpa, dependen de la concentración a la que se usará en la aplicación del CPB, pero para una completa caracterización se considera como procedimiento la determinación de la tensión de fluencia para cinco concentraciones de sólido entre 50 y 70% de sólidos.

3.4.1. Procedimiento para mediciones reológicas

En forma general el procedimiento utilizado considera los siguientes pasos:

Encender los equipos (reómetro, baño térmico y compresores de aire) de acuerdo a orden establecido en procedimiento CDI-LAB-PR-003 del CI-JRI.

Una vez preparado el equipo, abrir el software HAAKE Rheowin Job Manager y selecciona la rutina “Constante FL22.rwj”.

Verificar que el brazo que sujeta los vasos de precipitado está en la posición más baja. De no ser así seleccionar el ícono de engranaje “administrador de dispositivo”, luego “diagnóstico” y elegir “Iniciar elevador”.

Mantener homogeneizada la mezcla y posicionar el vaso de tal forma que el sensor vane quede en el centro.

Iniciar el programa y esperar a que termine la rutina (aproximadamente 60 s).

Una vez terminada la rutina, guardar el archivo resultante en una carpeta, indicando el nombre de la muestra, la concentración de sólidos de la pulpa utilizada, el porcentaje de cemento administrado, el tiempo t correspondiente (t_0 , t_1 , etc.).

Finalmente, en la sección “control de elevación” presionar el botón “separar elevador”. Luego, presionar en “administrador del dispositivo”, seleccionar “Diagnóstico” y seleccionar “Iniciar elevador”, dejando preparado el dispositivo para la siguiente medición.

3.5. Caracterización mineralógica del relave

Se realiza la caracterización mineralógica del relave en la empresa externa MAM Ltda con el fin de conocer la composición mineral de la pulpa. Los resultados entregados contemplan la distribución de minerales de acuerdo al grado de liberación, y la composición mineralógica.

Este tipo de caracterización se realiza utilizando una briqueta, y se emplea el método estadístico de conteo de puntos por medio de una placa de integración.

Para este ensayo es necesario 200 g de muestra de relave seco. Los resultados obtenidos en este estudio indican las especies que componen la muestra de relave.

3.6. Caracterización por difracción de rayo X del relave

Dado que el tamaño de partículas del relave es pequeño, se sugiere realizar ensayos de difracción de rayos X (DRX). Para tales efectos, se debe disponer de una cierta cantidad de muestra seca del relave en cuestión.

Para este ensayo es necesario 5 g de muestra de relave seco. Los resultados obtenidos en este estudio indican en forma aproximada las especies que componen la muestra de relave.

3.7. Ensayo de concentración de sales solubles

Se requiere de aproximadamente 100 g de relave seco.

Con este ensayo se pretende obtener la concentración de sales solubles, indicando en qué porcentaje se encuentran los cloruros y sulfatos.

Este ensayo se realiza por medio del lavado de las partículas de la pulpa de relave. El agua utilizada para este procedimiento es almacenada y posteriormente secada, para luego realizar el estudio de las sales que quedan después del secado.

3.8. Caracterización mineralógica del cemento

Dentro de los ensayos se pueden considerar difracción de rayos X (DRX). Para tales efectos, se debe disponer de una cierta cantidad de muestra seca del relave en cuestión.

Para este ensayo es necesario 5 g de muestra de cemento.

Los resultados obtenidos en este estudio indican en forma aproximada las especies que componen la muestra de cemento.

3.9. Caracterización granulométrica del cemento

El análisis granulométrico del cemento no se puede realizar por medio de difracción de rayos láser, sólo por medio de tamices. Esto se debe a que en el equipo de difracción de rayos láser la muestra debe entrar como líquido. Si el

cemento es humedecido inmediatamente comienza su proceso de hidratación, lo que cambiaría sus propiedades físicas.

3.9.1. Procedimiento aplicado

1. Considerar en el proceso de tamizado consecutivamente, desde abajo hacia arriba, el tamiz más fino hasta uno suficientemente grueso como para que pase completamente el cemento.
2. Para realizar la granulometría por tamizado seguir el procedimiento elaborado por el centro de investigación CI-JRI (CDI-LAB-PR-007).

Este ensayo está considerado que se realice en triplicado, y la cantidad de cemento es de 500 g para cada uno.

Como resultado de estos ensayos se obtiene una curva granulométrica para el cemento, para tamaños entre 38 y 3350 micras. En estos resultados faltará información de las partículas más finas, debido a las limitaciones que tiene el procedimiento al utilizar tamices.

3.10. Caracterización reológica del CPB

El objetivo de realizar esta caracterización, es determinar el comportamiento reológico de la mezcla a medida que pasa el tiempo. Para cada dosificación utilizada para generar los CPB, se debe realizar este estudio.

Con el fin de simular el comportamiento del CPB en la mezcla y posteriormente en el traslado por las tuberías, se realiza un procedimiento que consta de dos etapas.

La primera consiste en un proceso de homogeneización continuo, llevado a cabo por agitadores mecánicos. Este proceso tiene una duración de 2 horas y se lleva a cabo a 50 rpm. El segundo proceso corresponde a dejar estática la mezcla, inmediatamente después de la homogeneización.

En todo este transcurso se realizan mediciones de la tensión de fluencia de las mezclas cada 1 hora. La primera medición se realiza inmediatamente realizada la mezcla.

3.10.1. Procedimiento aplicado

El procedimiento general contempla:

1. Disponer de todos los componentes para realizar el ensayo en duplicado, de acuerdo a la dosificación establecida.
2. Agitar la mezcla mediante agitadores, debido a que las primeras 2 horas luego de realizada la mezcla el CPB se debe mantener en movimiento (Figura 3.1).



Figura 3.1 Homogenización de pulpa con agitador mecánico.

El procedimiento para generar la mezcla consiste en:

1. Homogeneizar la pulpa de relave.
2. En caso de utilizar aditivos en la mezcla, verter en recipiente y homogeneizar por 5 min a 200 rpm. Si no se hace uso de aditivos, agregar directamente el cemento y homogeneizar a 200 rpm, una vez que no se vean grumos bajar las revoluciones a 50 rpm por 5 min. Pasado el tiempo de mezclado, se llena un vaso de precipitado con aproximadamente 200 ml de CPB para medir el límite de fluencia.
3. Medir reología a una muestra representativa de la mezcla.
4. Una vez realizada la medición, devolver la mezcla al recipiente de homogeneización para continuar la agitación.
5. Repetir pasos 3 y 4 cada una hora hasta completar las 2 horas de agitación, establecidas anteriormente.

6. Una vez completadas las 2 horas y medida la tensión de fluencia, dejar la mezcla en un vaso de precipitado de plástico, donde se mantendrá quieta.

A la mezcla que está quieta también se le mide el límite de fluencia cada 1 hora, procurando no intervenir demasiado la mezcla. Es importante destacar que inevitablemente se va a alterar la muestra estática con cada medición. Lamentablemente, no es posible realizar una metodología más exhaustiva, ya que contemplar una muestra distinta para cada medición estática consideraría una gran cantidad de pulpa de relave, que al momento de la experimentación era escasa.

3.11. Selección de dosis para mezcla

Tal como se ha mencionado en las secciones anteriores, dentro de los ensayos que se realizan a la mezcla de pastas de relave cementado, está la caracterización reológica, este estudio es considerado de carácter dinámico, ya que se tendrá en cuenta como variable el tiempo de curado de las muestras.

En una primera etapa se realizan pruebas preliminares con el fin de determinar un rango de concentraciones de sólidos en las pulpas de relave adecuado para ser utilizado para la generación de las mezclas para relleno.

Teniendo en cuenta la dosificación establecida en las ecuaciones anteriores (Ec. 2.8, Ec. 2.9, Ec. 2.11, Ec. 2.15), se fijan 3 concentraciones de sólidos para la pulpa de relave, 50%, 60% y 72% y 3 dosis de cemento, 3%, 5% y 7%. El objetivo fue evaluar en la mezcla cementada el efecto de la concentración de sólidos de la pulpa de relaves, el contenido de cemento y el tiempo de curado.

En la Tabla 3.2 se resume las dosificaciones utilizadas en los ensayos preliminares, para cada una de las concentraciones de sólidos de la pulpa.

Tabla 3.2 Dosificación para ensayos preliminares.

Cp (%)	Cemento (%)	W/C	Masa de agua (g)	Masa de cemento (g)	Masa de sólidos (g)	Masa de pulpa (g)
50	3	7,9	143	18	143	286
50	5	4,7	140	30	140	280
50	7	3,3	137	42	137	274
60	3	7	126	18	189	315
60	5	4,1	124	30	185	309
60	7	2,9	121	42	181	302
72	3	5,6	101	18	260	361
72	5	3,3	99	30	254	353
72	7	2,3	97	42	249	346

3.11.1. Dosificaciones para relave con agua industrial

Las dosificaciones definitivas contemplan pulpa de relave con agua industrial (de ahora en adelante RAI) y cemento puzolánico. Las mezclas de relaves cementados son consideradas para realizar reologías en función del tiempo, donde se mide la tensión de fluencia en el proceso de homogeneización y también para muestras estáticas. También se llenan con la mezcla moldes cilíndricos de acero, con el fin de estudiar la resistencia a la compresión simple de probetas de CPB.

Con la información obtenida gracias a los ensayos preliminares detallados en el anexo 9.1, se pudo determinar una concentración de sólidos con la que comenzar el estudio. Se observará el comportamiento de mezclas de relaves cementados con un $C_p = 60, 65$ y 70% . Los contenidos de cementos se mantienen en 3, 5 y 7% en peso.

Se considera que cada molde puede contener alrededor de 2000 ml de mezcla, por lo que para considerar los ensayos a 7, 14, y 28 días de curado se deben fabricar 3 probetas, lo que da como resultado un volumen total de 6000 ml de CPB, para una concentración de sólidos y un porcentaje de cemento.

En total se tendrán 27 probetas de CPB con distintas concentraciones de sólidos y distintos contenidos de cemento.

Tabla 3.3 Dosificación para probetas y ensayos de reología.

Volumen (cm ³)	Cp (%)	Cemento (%)	W/C	Masa de cemento (g)	Masa de sólidos (g)	Masa de pulpa (g)
6000	60	3	7,0	540	5678	9463
6000	60	5	4,1	900	5561	9267
6000	60	7	2,9	1260	5443	9072
6000	65	3	6,5	540	6489	9983
6000	65	5	3,8	900	6355	9777
6000	65	7	2,7	1260	6222	9572
6000	70	3	5,9	540	7395	10565
6000	70	5	3,4	900	7243	10347
6000	70	7	2,4	1260	7090	10129
500	60	3	7,0	45	473	789
500	60	5	4,1	75	463	772
500	60	7	2,9	105	454	756
500	65	3	6,5	45	541	832
500	65	5	3,8	75	530	815
500	65	7	2,7	105	519	798
500	70	3	5,9	45	616	880
500	70	5	3,4	75	604	862
500	70	7	2,4	105	591	844

En los ensayos de caracterización se evaluará el comportamiento de un aditivo en conjunto con el cemento, y también se cambiará la granulometría de la muestra RAI. Estos cambios en los componentes del CPB son con el objetivo

de estudiar el efecto del aditivo y el porcentaje de finos en el desarrollo de la resistencia de la mezcla endurecida.

La dosificación para la pulpa RAI con distinta granulometría es la misma que la mostrada en la Tabla 3.3, pero sólo se consideran pulpas con concentraciones de sólidos de 60 % y 65 %.

Para evaluar el comportamiento del aditivo se contempla utilizar una muestra de RAI al 65 % de concentración de sólidos. Para el conglomerante utilizado se tiene que la razón entre cemento y aditivo es 4:1. En la Tabla 3.4 se muestran las distintas dosificaciones empleadas.

Tabla 3.4 Dosificación para probetas con aditivo y una RAI al 65%.

Volumen (cm ³)	Cemento (%)	W/C	Masa de cemento (g)	Masa de Aditivo (g)	Masa de conglomerante (g)	Masa de pulpa (g)
6000	3	6,5	432	108	540	9983
6000	5	3,8	720	180	900	9777
6000	7	2,7	1008	252	1260	9572

3.12. Fabricación de probetas de CPB

El procedimiento general contempla:

1. Identificar y seleccionar cada uno de los componentes que formarán parte de la mezcla de pastas de relaves cementadas por separado.
2. Pesarse cada uno de los componentes con anterioridad, de acuerdo al tipo de dosificación objetivo.
3. Homogeneizar la pulpa con agitadores mecánicos. Esto siempre se debe realizar debido a que las partículas sólidas de las pulpas de relave van a sedimentar en un tiempo determinado, dependiendo de la concentración

de sólidos y de la granulometría de los mismos. El uso de estos instrumentos asegura que todo el contenido de un balde esté homogéneo.

El procedimiento para fabricar las probetas consiste en:

1. Homogeneizar la pulpa de relave.
2. Tomar muestras para distintos baldes que se utilizarán para trabajar a distintas condiciones de dosificación.
3. Tomar las muestras por incrementos, es decir, en cucharadas sucesivas, homogeneizando manualmente entre cada una. Este procedimiento se realiza hasta obtener la muestra necesaria para cada dosificación.
4. Para el caso de las mezclas que consideran aditivos, agregarlos y realizar una homogeneización por 5 minutos para asegurar que se han mezclado correctamente. Si sólo se considera cemento como conglomerante, omitir este paso.
5. Adicionar el cemento y aplicar el paso 3 de homogeneización del procedimiento general.
6. Una vez obtenida la mezcla de pasta de relaves cementados llenar los moldes para construir las probetas. Es importante que en el proceso de llenado se realice con vibrado manual de las probetas, golpeando los moldes con el suelo. Este vibrado se realiza con el fin de eliminar burbujas de aire que puedan crearse dentro de la probeta, y que al momento de realizar el ensayo de compresión simple, pueden disminuir la resistencia. Realizar un vibrado en cada incremento con que se llenan los moldes.

7. Almacenar en una habitación con temperatura y humedad ambiental controlada a 20°C y 50% de humedad hasta el cuarto día, para enviar a ensayar al IDIEM, donde se someten las probetas a 7, 14 y 28 días de curado.

Cabe señalar que las probetas no son almacenadas inmediatamente en una cámara húmeda debido a que no pueden ser trasladadas antes de 4 días. Luego de esos 4 días, es posible manejar las probetas, pero de todas maneras se debe tener sumo cuidado evitando romperlas antes de realizar los ensayos de compresión.



Figura 3.2 Proceso de homogeneización de pulpa y cemento.

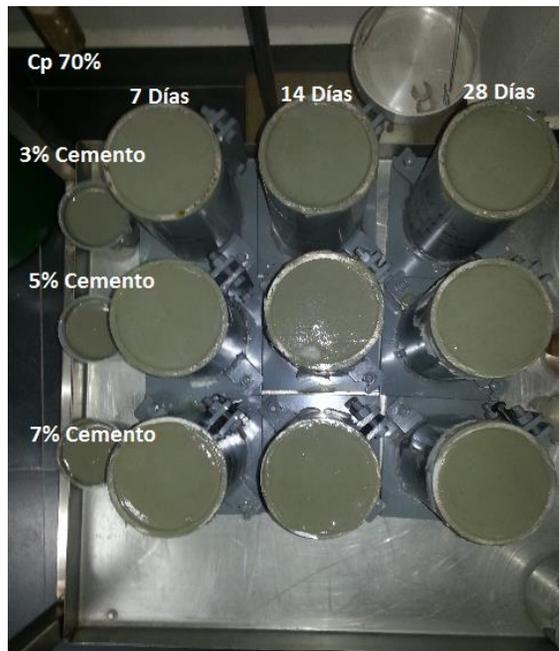


Figura 3.3 Probetas de CPB con 70% de concentración de sólidos y 3, 5, 7% de cemento.

En la Figura 3.2 se puede observar el proceso de homogeneización explicado en el punto 3 del procedimiento general. Las mezclas frescas, que llenan los moldes, se pueden observar en la Figura 3.3, que son almacenadas por 4 días según el procedimiento de fabricación de probetas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Determinación de los límites de consistencia

4.1.1. Límite líquido y límite plástico

De los ensayos mencionados en el capítulo anterior, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 4.1 Datos experimentales para calcular el límite líquido.

08-07-2014		09-07-2014	
N	Cp [%]	N	Cp [%]
9	80,1	5	79,79
12	80,9	8	80,83
17	81,2	12	81,00
23	82,3	18	82,20
32	82,5	26	82,99

Donde N corresponde al número de golpes de la máquina de Casagrande, y Cp a la concentración de sólidos de la pulpa de relave.

Según la norma NCh 1517/1.Of79, los resultados deben ser expresados en un gráfico semilogarítmico, donde se representa la humedad (w%) en el eje de las Y como escala aritmética, y el número de golpes en el eje de las X como escala logarítmica. Pero dado que es mucho más sencillo encontrar los resultados para un gráfico con sus dos ejes en escala aritmética, se procede a realizar una rectificación.

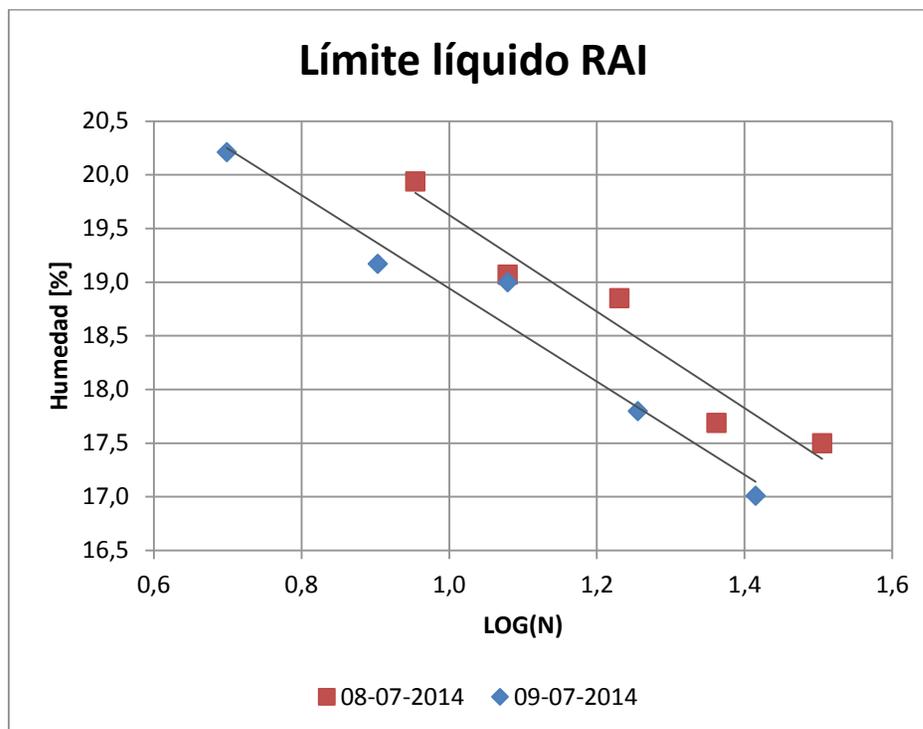


Figura 4.1 Límite líquido para una pulpa de relave con agua industrial.

Dado que la ecuación que rige el comportamiento es:

$$w = -F \log N + C \quad \text{Ec. 4.1}$$

Se hace un cambio de variable, definiendo:

$$X = \log N \quad \text{Ec. 4.2}$$

Obteniendo una ecuación lineal de primer grado:

$$w = -F X + C \quad \text{Ec. 4.3}$$

Lo que implica que si se grafica w vs X sería posible determinar la pendiente e intercepto de esta ecuación lineal, por medio de mínimos cuadrados.

Cada uno de los valores para el límite líquido está calculado a través de mínimos cuadrados, no así el límite plástico, que solamente corresponde a la humedad en que se resquebraja el cilindro de material, por lo que no son necesarios otros cálculos. Dado que los procedimientos utilizados en el CI-JRI miden directamente la concentración de sólidos, el porcentaje de humedad para cada muestra estará determinada como $100 - C_p$.

Los resultados que se obtuvieron para el límite líquido son:

Tabla 4.2 Valores de límite líquido para la pulpa de relave en dos fechas distintas.

Límite líquido	
08-07-2014	18±1
09-07-2014	17±1

Realizando el procedimiento para calcular el límite plástico, no fue posible formar un cilindro del material, lo que indica que la pulpa de relave no es plástica.

4.2. Caracterización granulométrica de RAI

El perfil granulométrico para la pulpa de relave estudiada se puede apreciar en la Figura 4.2 obtenida a través de granulometría por difracción láser.

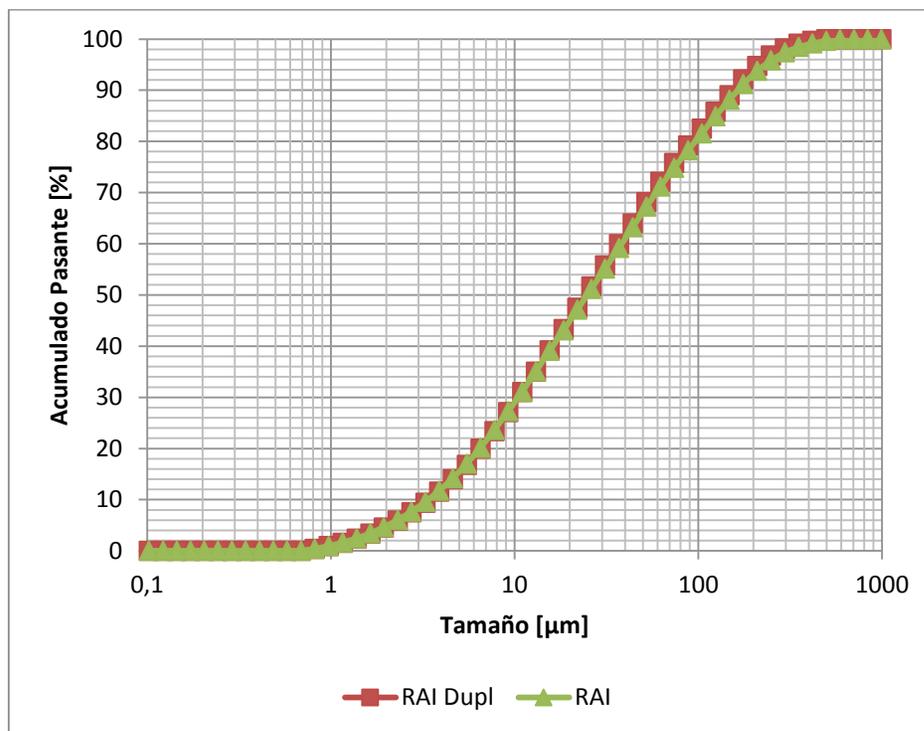


Figura 4.2 Curva granulométrica para la pulpa de relave.

Tabla 4.3 Diámetros característicos de la muestra RAI.

Muestra	D10 [μm]	D50 [μm]	D80 [μm]
RAI original	3,43	24,41	96,31
RAI duplicado	3,39	24,87	91,78

Del gráfico de la Figura 4.2 se puede observar que las partículas con un tamaño menor a 20 [μm] corresponden a aproximadamente un 45% de la muestra, lo que se traduce en que según la nomenclatura adoptada [3] la muestra RAI tiene un %Fino = 45%. Comparando con la Figura 2.9, se puede ver que este valor está bajo el porcentaje límite de 55%.

Con los resultados de la Tabla 4.3 es posible calcular el coeficiente de uniformidad que corresponde a D_{60}/D_{10} . El diámetro característico D_{60} puede

ser calculado por interpolación de los datos de la curva granulométrica. De estos datos se obtiene que el coeficiente de uniformidad es $C_u = 11$.

Los resultados del proceso de tamizado de la muestra RAI se observan en la Figura 4.3.

Es importante observar que la curva RAI+#400 corresponde a la muestra RAI original mezclada con la muestra RAI que quedó sobre la malla N°400. De la Figura 4.3 se puede ver que la muestra RAI+#400 efectivamente tiene un mayor contenido de partículas gruesas que la muestra RAI original, que queda reflejado al comparar la Tabla 4.3 y la Tabla 4.4., donde el D50 y D80 son valores que se diferencian entre las dos muestras.

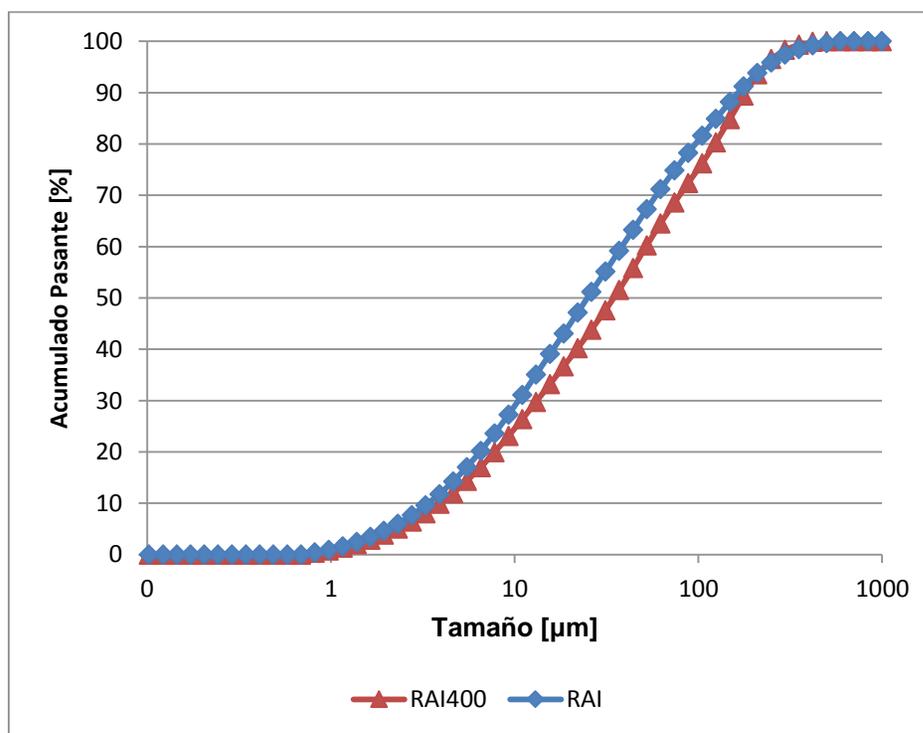


Figura 4.3 Comparación de RAI original con RAI sobre la malla Tyler #400.

Tabla 4.4 Diámetros característicos de muestra RAI tamizado con malla Tyler #400

D10 [μm]	D50 [μm]	D80 [μm]
3,93	34,63	122,9

Para este caso se tiene que alrededor del 38% de la muestra RAI tamizada tiene un tamaño de partículas de 20 [μm]. Entonces se puede decir que la muestra tiene un %Fino = 38%.

El coeficiente de uniformidad de esta muestra modificada es $C_u = 13$.

Nuevamente comparando con el criterio de la Figura 2.9, se puede observar que está bajo el porcentaje límite de 55%, lo que según los estudios de M.Fall [3] sería un relave capaz de desarrollar altas resistencias a la compresión.

En los dos casos se puede observar que el coeficiente de uniformidad es mayor a 10, lo que implica que son valores altos. Esto se traduce en que la distribución granulométrica es más amplia e indica que el material es bien gradado, es decir, que tiene diversos tamaños de partículas.

4.3. Caracterización reológica de la pulpa de relave

La caracterización reológica de la pulpa de relave se lleva a cabo a 55%, 60%, 65%, 67% y 70% de concentración de sólidos.

Como se puede apreciar en la Figura 4.4, la caracterización se realizó a distintas concentraciones de sólidos, dando como resultado la tensión de fluencia respectiva.

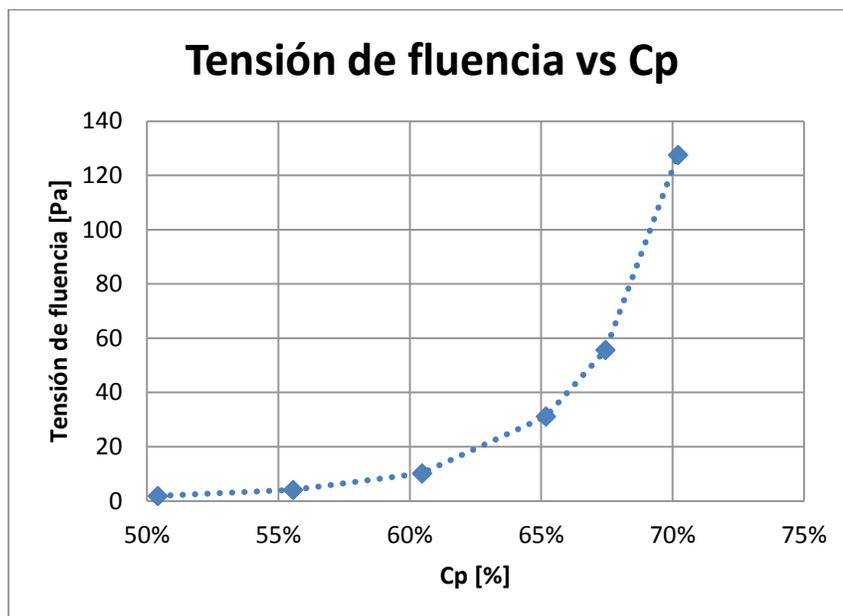


Figura 4.4 Tensión de fluencia para distintas concentraciones de sólidos, para una muestra de pulpa de relave con agua industrial.

Tabla 4.5 Datos de tensión de fluencia para cada concentración de sólidos de la pulpa de relave con agua industrial

Cp real [%]	Tensión de fluencia [Pa]
50,42	1,8
55,56	4,1
60,46	10,2
65,18	31,2
70,21	127,5

De los resultados de la caracterización reológica, se puede observar que para una pulpa de relave con agua industrial a una concentración cercana a 70% es necesario un esfuerzo de cizalle de aproximadamente 130 [Pa] para poner en movimiento una pulpa previamente estática. Este resultado puede ser contrastado con los criterios de diseño para el transporte hidráulico, con valores

de tensión de fluencia inferiores a 200 [Pa] [Benchmarking JRI]. Entonces el resultado de la tensión de fluencia de la pulpa RAI indica que a altas concentraciones aún es posible realizar transporte hidráulico.

A menor tensión de fluencia de un fluido menos costoso es su transporte mediante tuberías

4.4. Caracterización mineralógica de la pulpa de relave

Los análisis mineralógicos para la pulpa de relave fueron realizados por los laboratorios de MAM Ltda. La composición mineralógica del relave se indica en la Tabla 4.6.

Se debe destacar que el procedimiento de medición de la distribución mineralógica fue por medio de una briqueta a través de un microscopio. Se empleó un método estadístico de conteo de puntos.

Tabla 4.6 Distribución Mineralógica del relave RAI

Minerales	Fórmulas	% Peso
Calcopirita	Cu Fe S 2	0,12
Calcosina	Cu ₂ S	0,01
Covelina	Cu S	0,01
Bornita	Cu 5 Fe S 4	0,01
Cobre nativo (atacamita, malaquita)		0,06
Pirita	Fe S 2	0,41
Magnetita	Fe ₃ O ₄	0,07
Hematita	Fe ₂ O ₃	0,05
Limonita		0,02
Rutilo	Ti O ₂	0,04
Arcilla	Al 4 (Si 4 O 10) (OH) 3	7,89
Clorita	(Mg, Al) 3 (Al Si 3 O 10) (OH) 2 Mg 3 (OH) 6	3,36
Sericita	K Al ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (OH) ₂	15,61
Plagioclasa	(Ca, Na) (Al, .Si) Al Si 2 O 8	14,33
Feldespato	K Al Si 3 O 8	9,86
Turmalina		1,66
Biotita	K (Mg, Fe) 3 (Al Si 3 O 10) (OH, F) 2	6,82
Anhidrita		6,12
Cuarzo	Si O ₂	31,73
Calcita	Ca C O ₃	1,81
Total		100

Observando los resultados de la Tabla 4.6 se puede apreciar que la cantidad de cobre es mínimo, y que era de esperar, ya que el proceso productivo de la mina es la extracción de cobre. También se puede apreciar que el cuarzo se

encuentra en una alta concentración, y esto se debe a que la mina tiene vetas y vetillas de cuarzo.

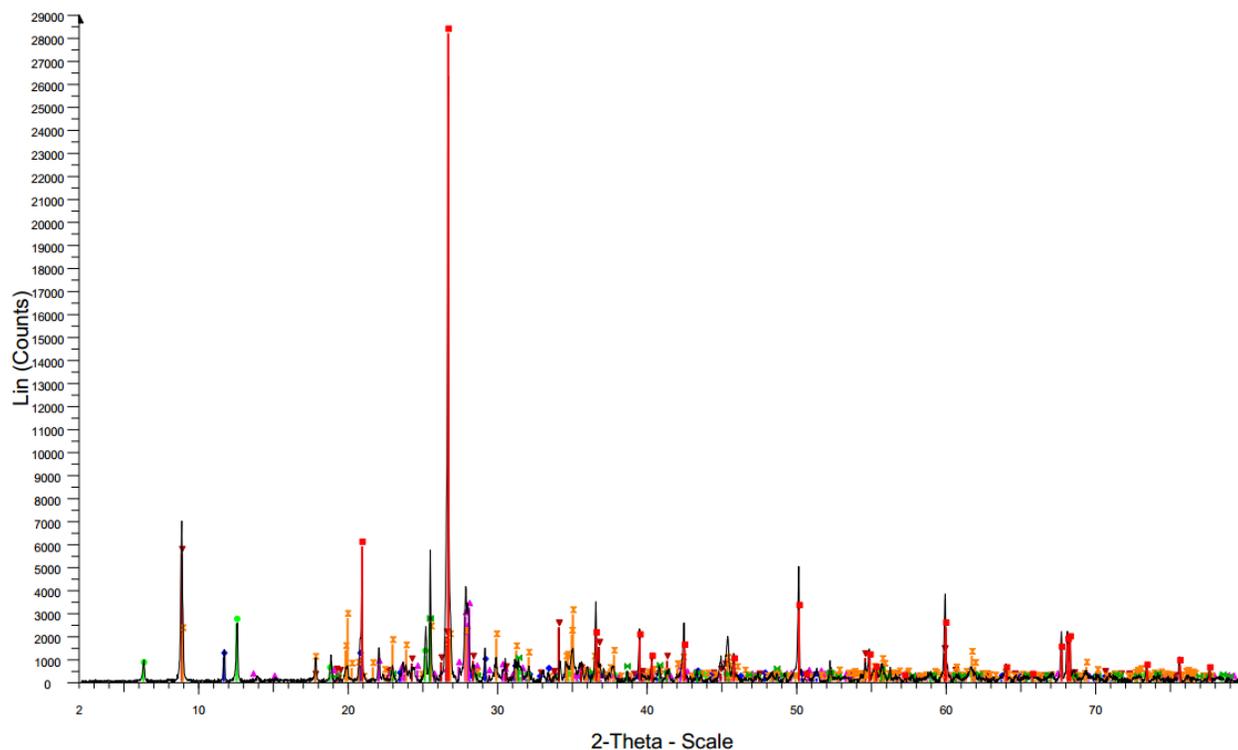


Figura 4.5 Difractograma cualitativo de la muestra RAI.

Donde la leyenda es la siguiente:

- ☒ 01-072-0916 (C) - Anhydrite - $\text{Ca}(\text{SO}_4)$
- ☒ 01-078-2315 (C) - Quartz - SiO_2
- ☒ 00-033-0311 (*) - Gypsum, syn - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- 00-022-0712 (I) - Nimitite-1MIIb - $(\text{Ni}, \text{Mg}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
- ☒ 00-041-1486 (*) - Anorthite, ordered - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
- ☒ 00-042-1413 (I) - Annite-1M - $\text{KFe}_3 + 2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- ☒ 01-084-1302 (C) - Muscovite 2M1 - $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

En la Figura 4.5 se puede observar el difractograma para la muestra RAI. Es importante señalar que el ensayo realizado es meramente cualitativo, por lo que solamente se puede saber las especies incluidas en el relave, no así la cantidad en que se encuentran. De todas maneras está en concordancia con los resultados de la mineralogía de la **Tabla 4.6**, ya que también encuentra una fase cristalina de Cuarzo.

4.5. Caracterización físico-química de la pulpa de relave

En la recepción de la pulpa de relave con agua industrial se realizan mediciones de las muestras inmediatamente, las que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4.7 Resumen de mediciones realizadas en la recepción de la muestra.

Cp [%]	pH	Temp. [°C]	Densidad de sólidos [g/cm ³]
50	9,17	17	2,79±0,02

El proceso de concentración de minerales en las mineras chilenas es puramente físico, ya que se depositan los relaves en las celdas de flotación, donde se hacen flotar las partículas a través de agitación y de inyección de aire para generar burbujas. Para ayudar en el proceso, se hace uso de colectores y espumantes, y ambos corresponden a compuestos orgánicos.

Con el objetivo de suprimir la oxidación del relave y deprimir la pirita se hace uso de Cal, que regula el pH de la muestra. Esta Cal ayuda a que el relave tenga un pH básico.

Con los resultados de la tabla **Tabla 4.7** se puede avalar lo anterior, ya que el pH de la muestra recién obtenida es básico.

Los resultados de la caracterización físico-químico se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 4.8 Resumen de resultados de caracterización física-química relave RAI.

Pulpa de relave con agua industrial	
Potencial Z [mV]	-11
Conductividad [mS/cm]	8,31
Cloruro Cl ⁻ [mg/L]	167
Sulfato SO ₄ ⁻² [g/L]	1,34

Según el decreto 46 [17] que regula la emisión de contaminantes en aguas subterráneas, los límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua subterráneas para cloruros y sulfatos son 250 Mg/L y 250 Mg/L respectivamente. Lo que lleva a pensar que en caso de filtración del agua del CPB, no existe riesgo medioambiental, dados los límites de las normas gubernamentales.

4.6. Caracterización mineralógica del cemento

El análisis de mineralogía para el cemento fue realizado en un laboratorio externo al del centro de investigación, y los resultados se observan en la siguiente tabla.

Tabla 4.9 Distribución de minerales para una muestra de cemento especial puzolánico.

Distribución de minerales [%]	
Gypsum	2,82
Brownmillerite	1,95
Calcium Silicate Oxide	19,80

Calcium Silicate	3,25
Periclase	>0,5
Calcium Aluminum Oxide	1,66
Andesine	0,66
Quartz	1,47
Anorthite	2,14
Lizardite-1T	>0,5
Albite	2,26
Amorfo	63,46

4.7. Caracterización granulométrica del cemento

El método empleado para realizar el ensayo de granulometría para el cemento, es por medio de tamices. Éstos se disponen en un vibrador mecánico de tamices (ROTAP) proporcionado por el CI-JRI, que aseguran un procedimiento más sistemático y minimiza los errores al disminuir la operación manual. Los resultados obtenidos para la distribución granulométrica del cemento se muestran en la Figura 4.6.

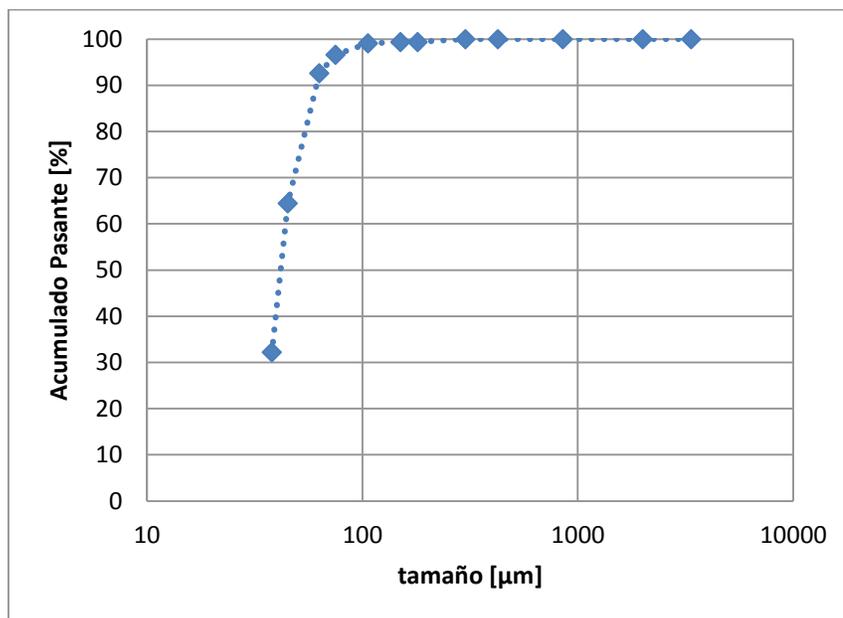


Figura 4.6 Curva granulométrica para una muestra de cemento puzolánico.

4.8. Caracterización reológica del CPB

Los resultados presentados en este capítulo tienen ensayos preliminares detallados en el anexo 9.1. Los estudios presentados en el anexo 9.1 fueron realizados con el objetivo de tener una primera aproximación a los fenómenos involucrados en la experimentación. Luego, fue posible determinar una metodología más adecuada para el manejo de la mezcla de CPB al momento de medir su tensión de fluencia, al igual que permitió definir la concentración de sólidos de la pulpa de relave con la que se trabajará, como también facilitó entender la noción del endurecimiento del cemento como función del tiempo.

Las tensiones de fluencia de la mezcla cementada se obtuvieron para dos etapas distintas. Cada una de las etapas se realiza utilizando el procedimiento de la sección 3.10.1.

La caracterización reológica y mecánica de las mezclas de CPB se resumen en el diagrama de la Figura 4.7.

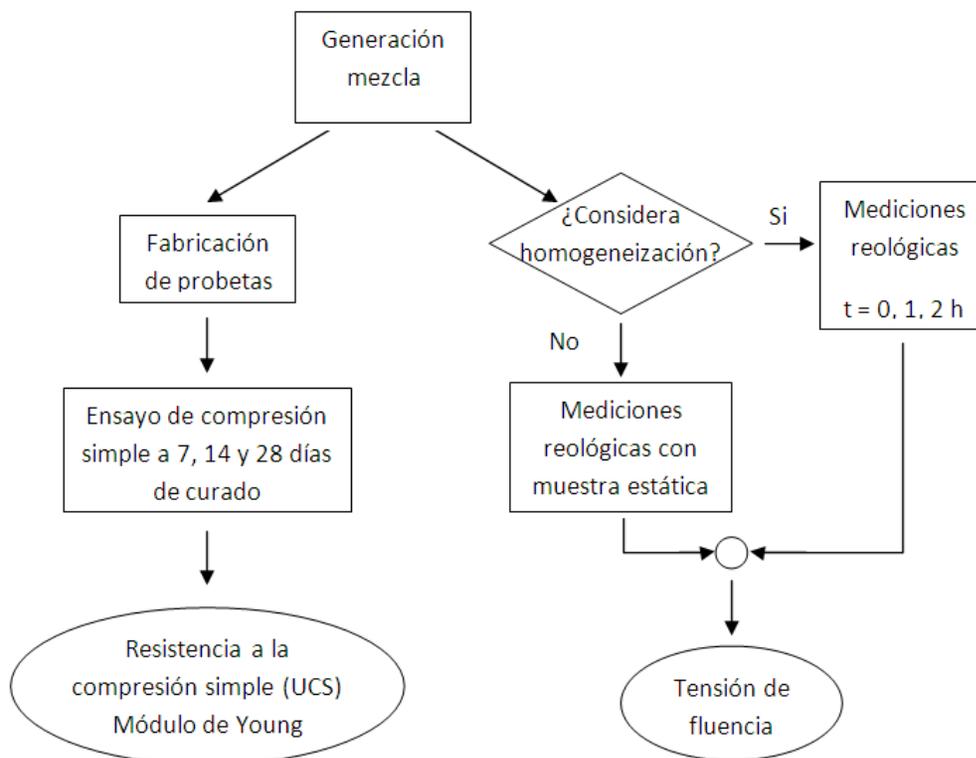


Figura 4.7 Diagrama de caracterización de CPB.

4.8.1. Reología para CPB RAI con homogeneización

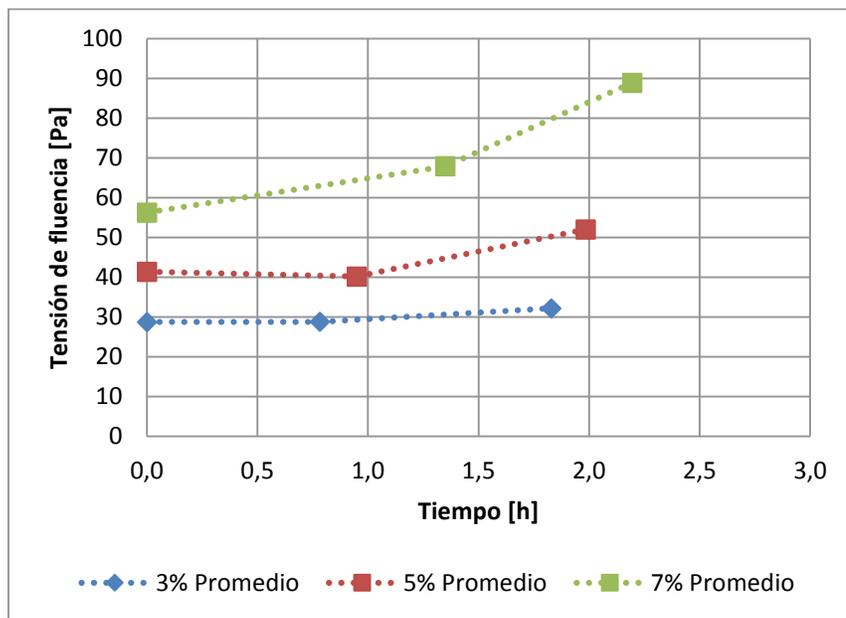


Figura 4.8 Tensiones de fluencia para mezcla de relaves con $C_p=60\%$, y contenidos de cemento de 3, 5 y 7% en peso.

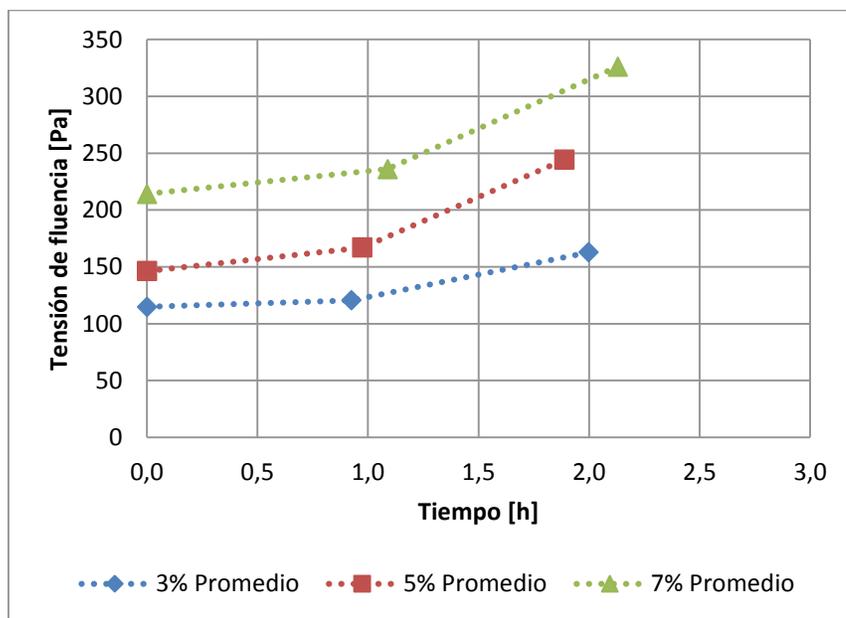


Figura 4.9 Tensiones de fluencia para mezclas de relave con $C_p=65\%$, y contenidos de cemento de 3, 5 y 7% en peso.

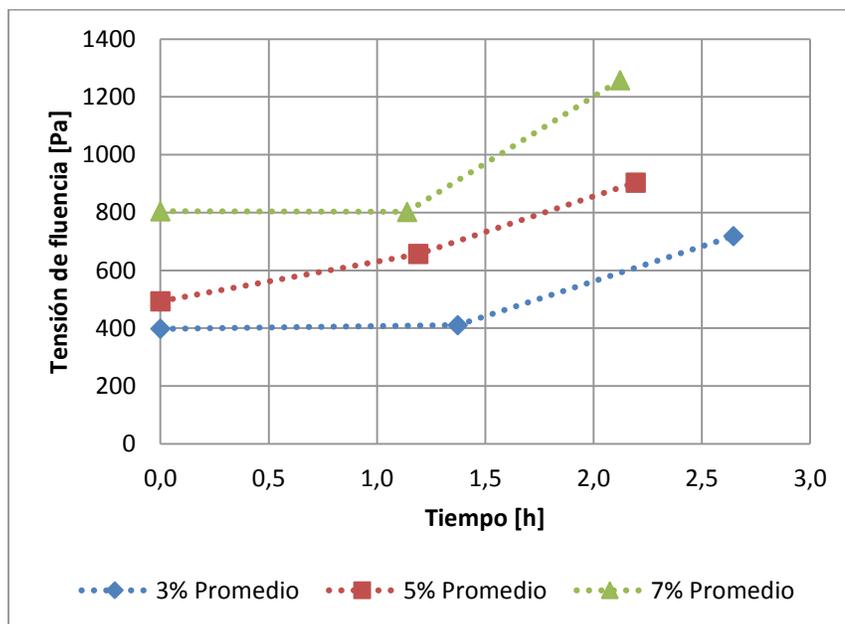


Figura 4.10 Promedio de tensiones de fluencia para mezclas de relave con Cp 70% y contenidos de cemento de 3, 5 y 7% en peso.

En las Figura 4.8, 4.9 y 4.10 se observa que a medida que aumenta la concentración de sólidos en la pulpa, mayores son las tensiones de fluencia medidas, esto incluye a las tensiones iniciales y al aumento en el tiempo. Este tipo de incremento es un inconveniente al momento de analizar la posibilidad de transportar la mezcla de CPB, debido a que a mayor tensión de fluencia, más caro es el transporte, debido a la tecnología de las bombas que se deben utilizar.

También se puede ver que la tensión de fluencia es de carácter dinámico, ya que a medida que pasa el tiempo se produce un aumento de esta magnitud. Este tipo de comportamiento demuestra cómo se va endureciendo la mezcla debido a la adición de conglomerante, y como era de esperar, las muestras con mayor contenido de cemento son las que alcanzan mayores tensiones de fluencia.

4.8.2. Reología para CPB RAI sin homogeneización

Es importante destacar que estos resultados no representan fielmente el real comportamiento que deberían exhibir las muestras al endurecer. Esto se debe a que el procedimiento de medición de la tensión de fluencia para las muestras estáticas no es el idóneo, tal y como se explicó en la sección 3.10.1.

Por lo tanto, el objetivo de estas mediciones solamente es observar el aumento de la tensión de fluencia de una muestra estática, y comparar con las tensiones de fluencia de las muestras que se mantienen en constante agitación, de la sección 4.8.1

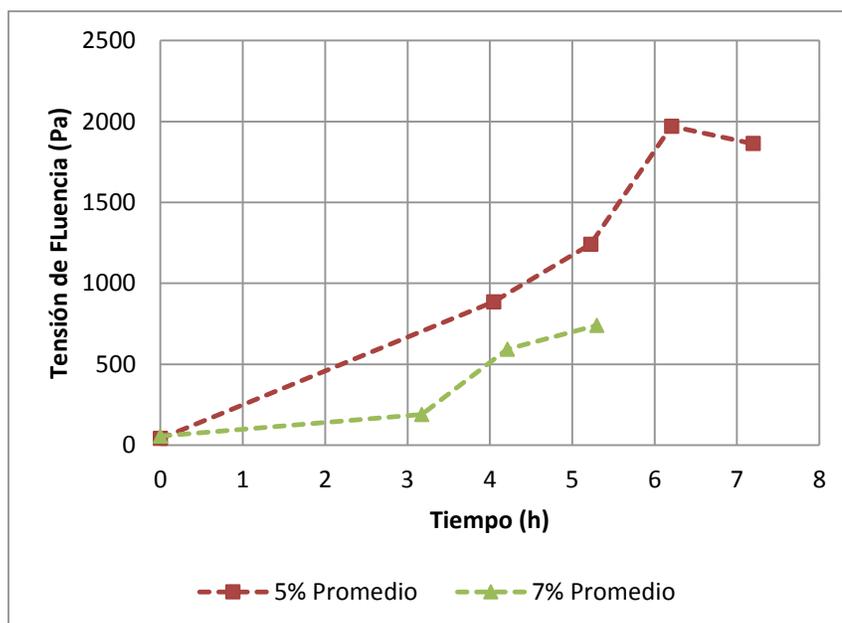


Figura 4.11 Promedio de tensiones de fluencia para 60% de concentración de sólidos, con 5 y 7% de cemento sin homogeneizar.

En la Figura 4.11 no se tienen valores de tensión de fluencia para muestras con 3% de cemento, debido a que solamente se tomaron mediciones que contemplan la tensión de fluencia inicial, y las de luego de 3 horas (explicado en la sección 3.10), no así en la Figura 4.12 y Figura 4.13, donde se tienen por lo

menos 2 puntos en cada una de las curvas, lo que indica que se midió la tensión de fluencia inicial, y la de luego de 3 horas de experimentación (2 horas que corresponden a la homogeneización y 1 correspondiente al proceso estático).

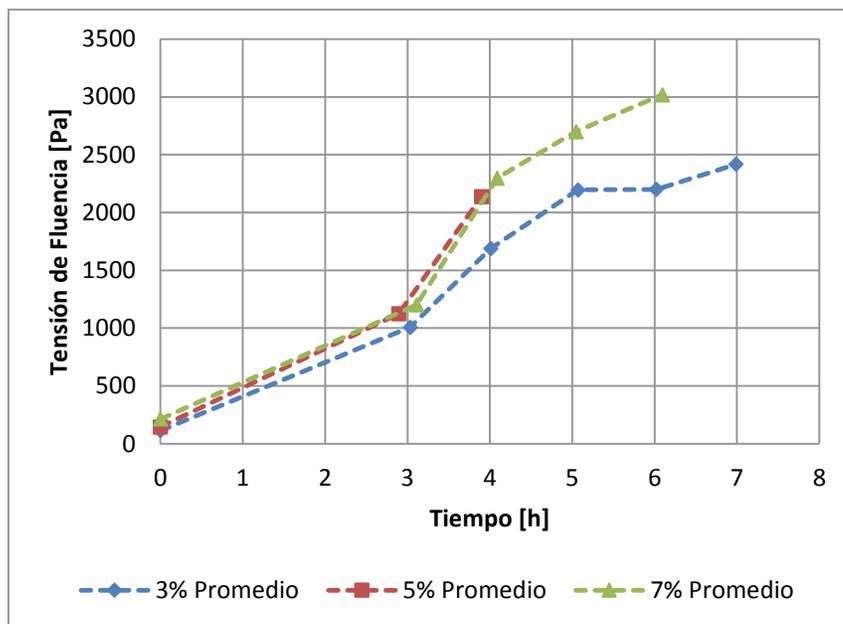


Figura 4.12 Promedio de tensiones de fluencia para 65% de concentración de sólidos, con 3, 5 y 7% de cemento sin homogeneizar.

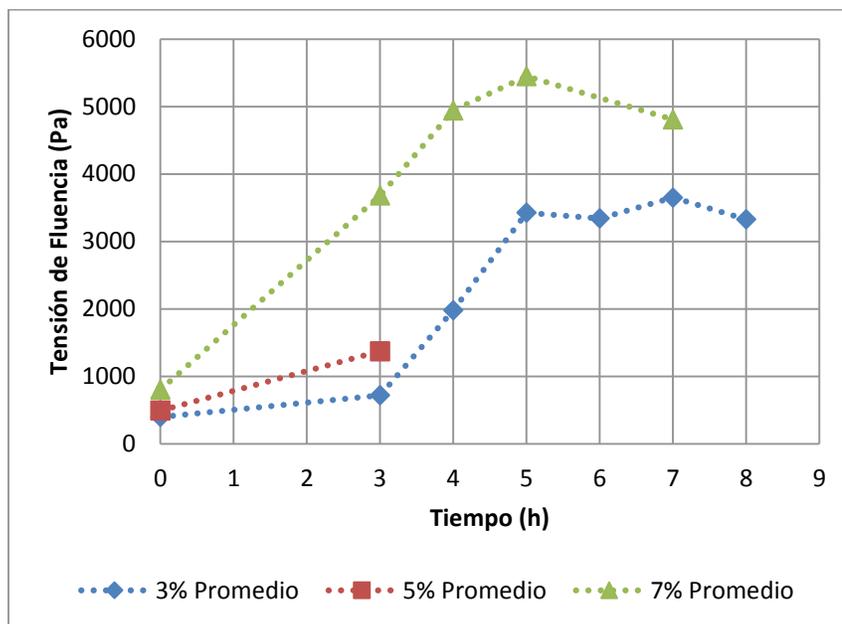


Figura 4.13 Promedio de tensiones de fluencia para 70% de concentración de sólidos, con 3, 5 y 7% de cemento sin homogeneizar.

A pesar de que la metodología de medición para este tipo de ensayos no era adecuada, es importante señalar que estos datos aún pueden ser útiles para hacer una comparación con los datos de la sección 4.8.1. En la sección mencionada anteriormente, se tienen los datos de una muestra de CPB en constante agitación, donde se observa que las tensiones de fluencia alcanzadas son considerablemente menores que las presentadas en esta sección. Esta observación entrega información que da cuenta de la importancia del tiempo de transporte necesario para depositar el CPB en la mina subterránea, ya que luego de una hora de dejar de agitar la mezcla, las tensiones de fluencia aumentan abruptamente.

Por lo tanto, se tiene como dato preliminar, que luego de 1 hora de dejar de suministrar el CPB, es posible que las tuberías se tapen producto del repentino endurecimiento, ya que las tensiones de fluencia para todas las muestras son mayores o iguales a 190 [Pa], que está en el límite de transporte establecido

por un benchmarking de JRI, que corresponde a 200 [Pa] como valor máximo de tensión de fluencia para movilizar una pulpa por tuberías, utilizando bombas.

4.9. Caracterización mecánica

Los ensayos de compresión simple entregan información de la resistencia que tienen las probetas. A través de un gráfico de esfuerzo- deformación, se puede obtener la presión axial máxima que es el valor de UCS como también el módulo de Young o de elasticidad que es la pendiente a una línea tangente a la curva. También se hizo un estudio de la variación de la UCS con los días de curado de la probeta y con la razón W/C para establecer regresiones con la ley de Abrams.

También se midió como influye la granulometría de las muestras y la adición de un aditivo como conglomerante, en la UCS y el módulo de Young

4.9.1. Resultados de ensayos de compresión simple de probetas de CPB con muestra RAI y cemento

De los ensayos de compresión simple, cada una de las probetas muestra un comportamiento en función de la deformación axial unitaria. Los resultados se pueden observar en las siguientes figuras.

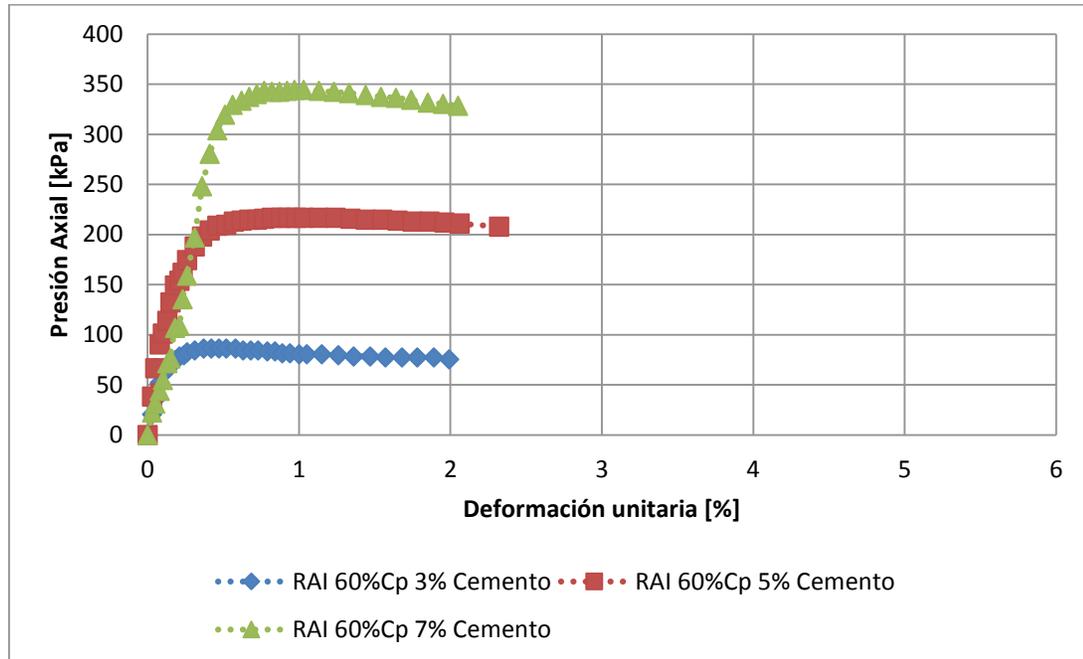


Figura 4.14 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 60% de sólidos con 7 días de curado.

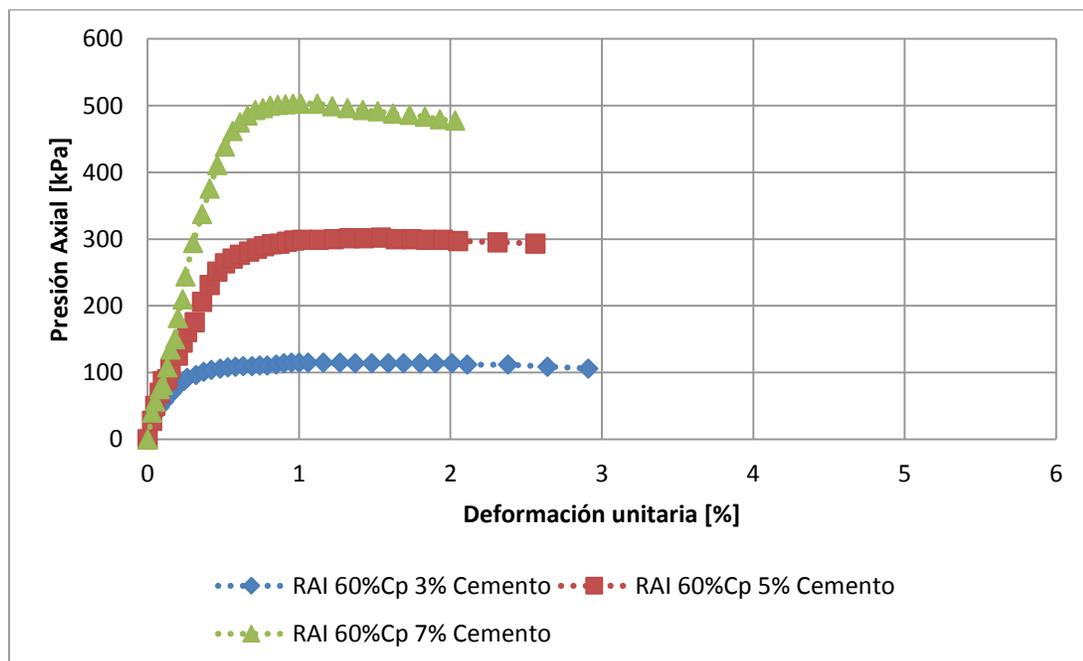


Figura 4.15 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 60% de sólidos con 14 días de curado.

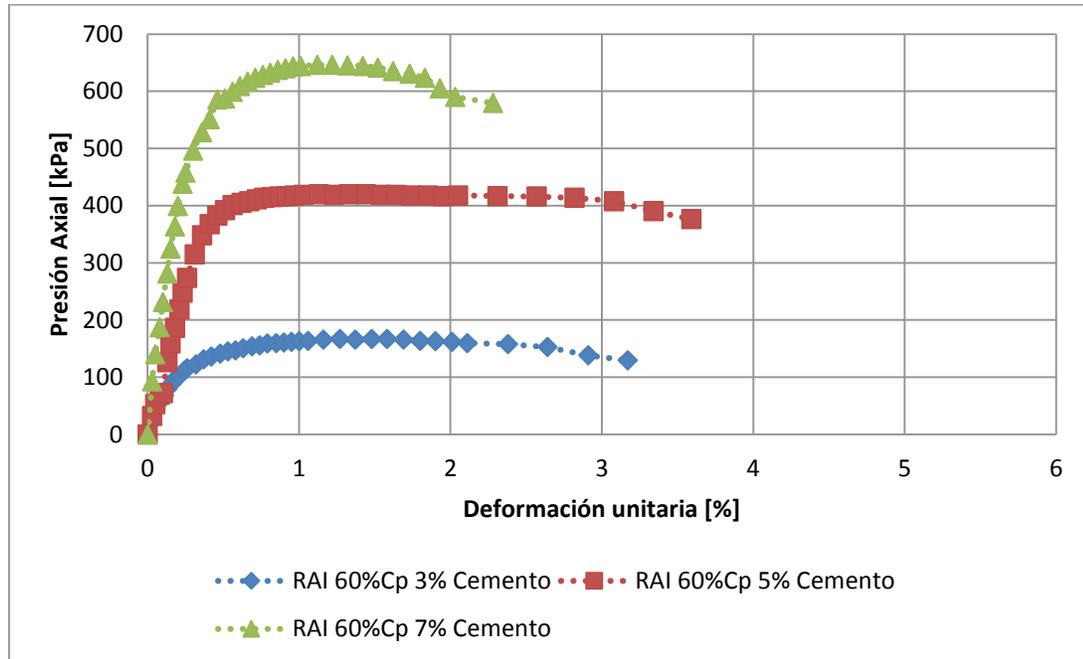


Figura 4.16 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 60% de sólidos con 28 días de curado.

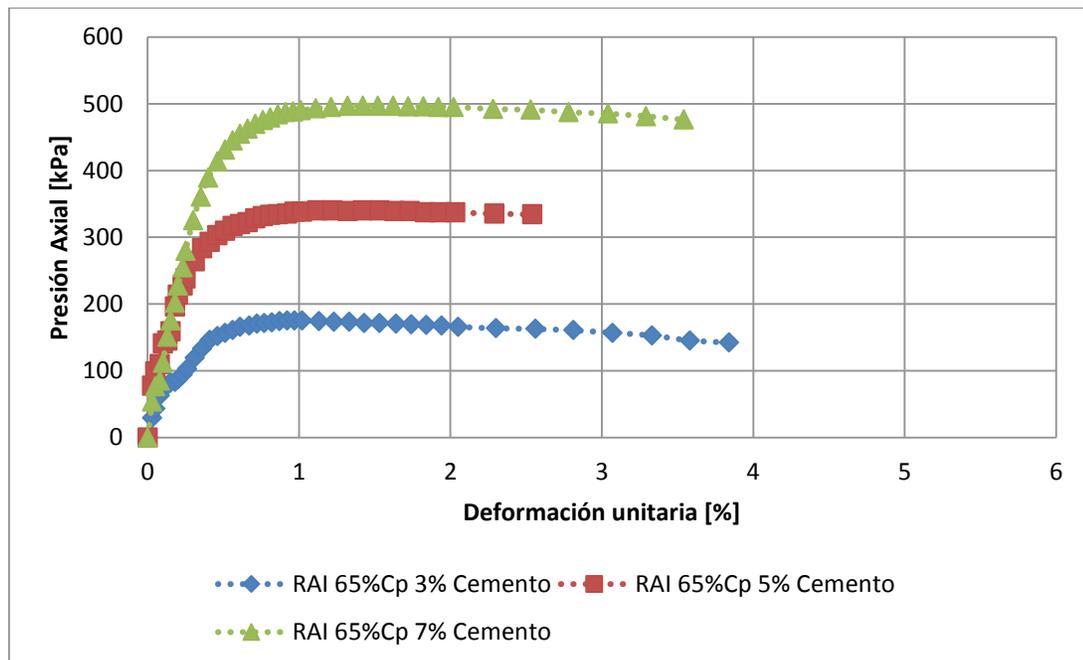


Figura 4.17 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 65% de sólidos con 7 días de curado.

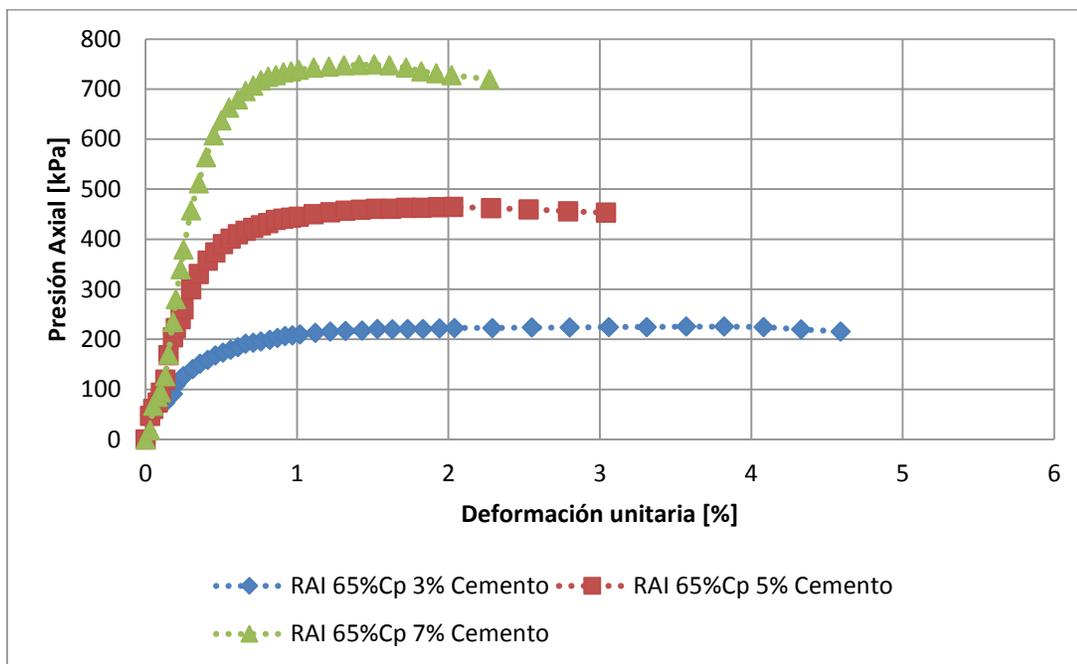


Figura 4.18 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 65% de sólidos con 14 días de curado.

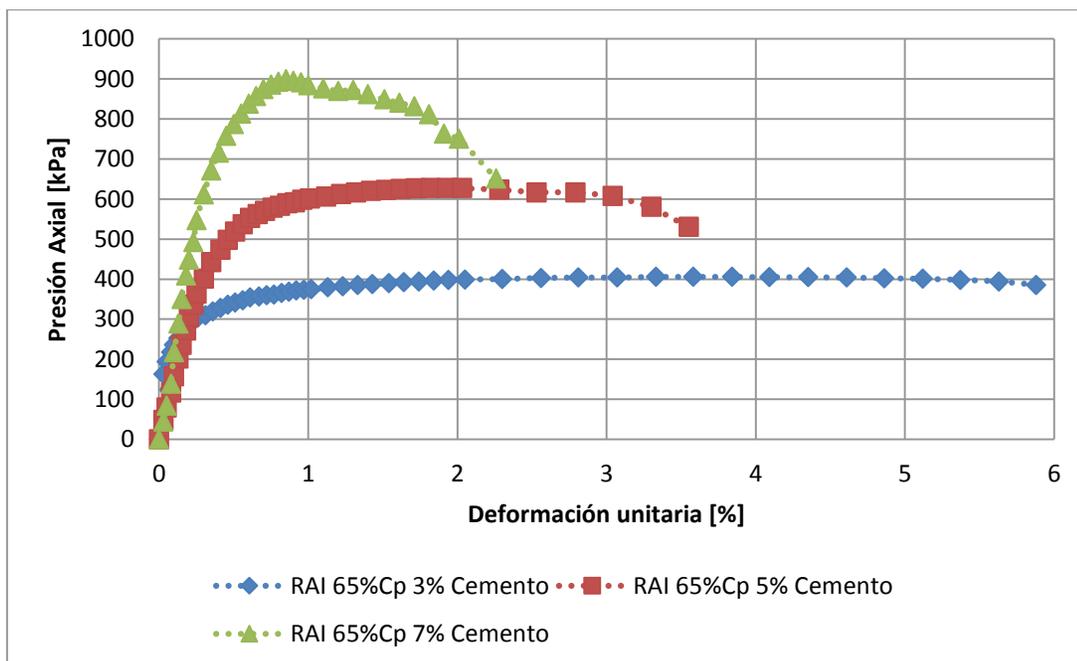


Figura 4.19 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 65% de sólidos con 28 días de curado.

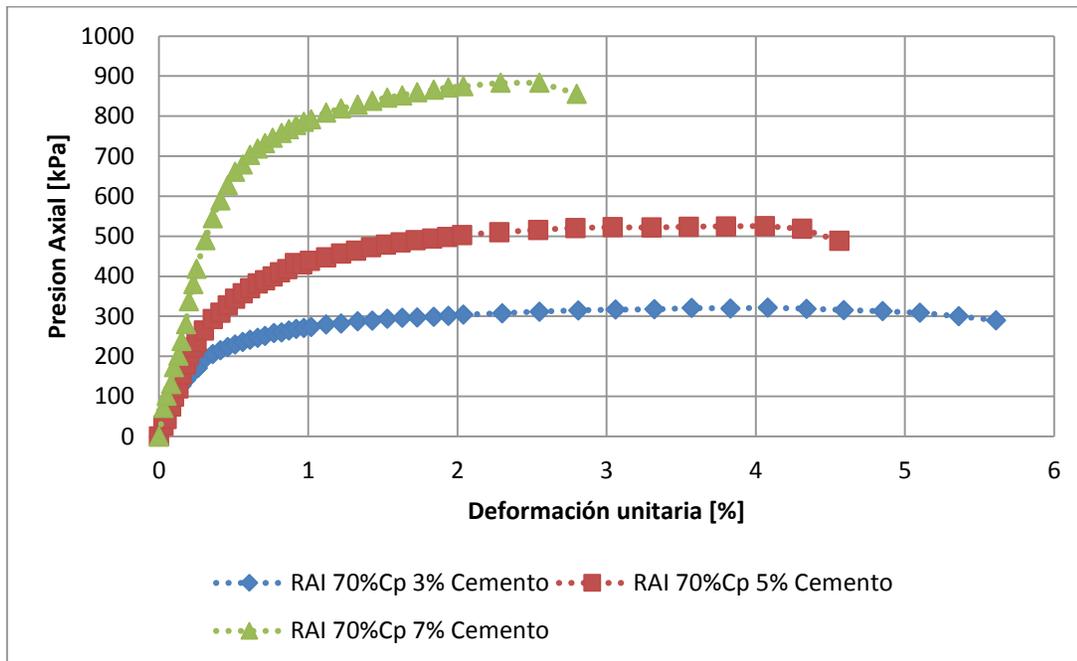


Figura 4.20 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 70% de sólidos con 7 días de curado.

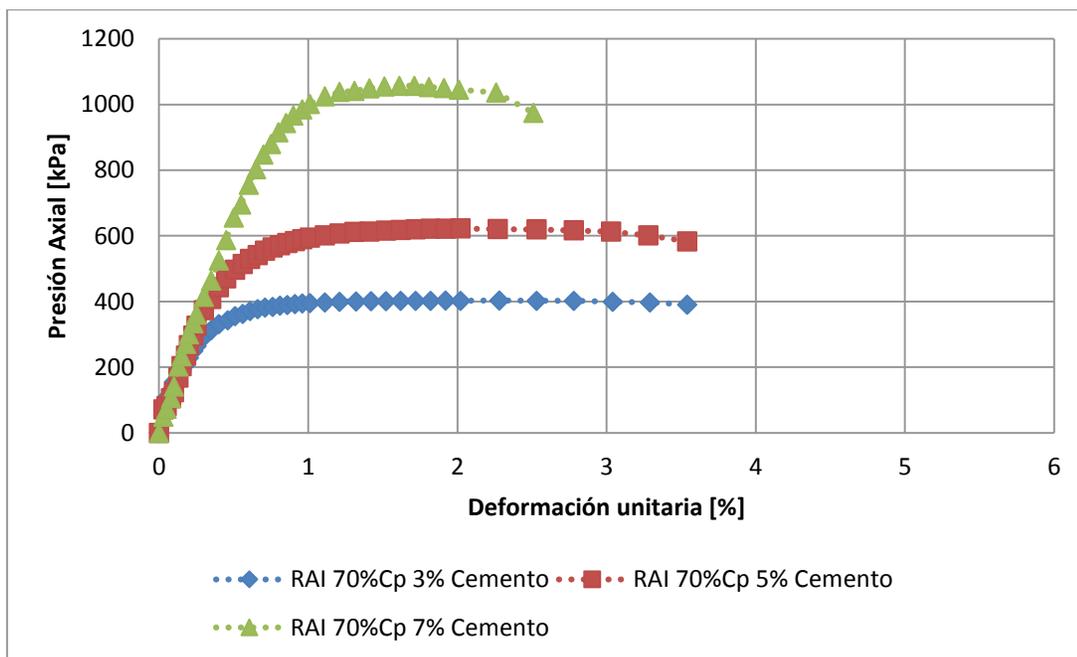


Figura 4.21 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 70% de sólidos con 14 días de curado.

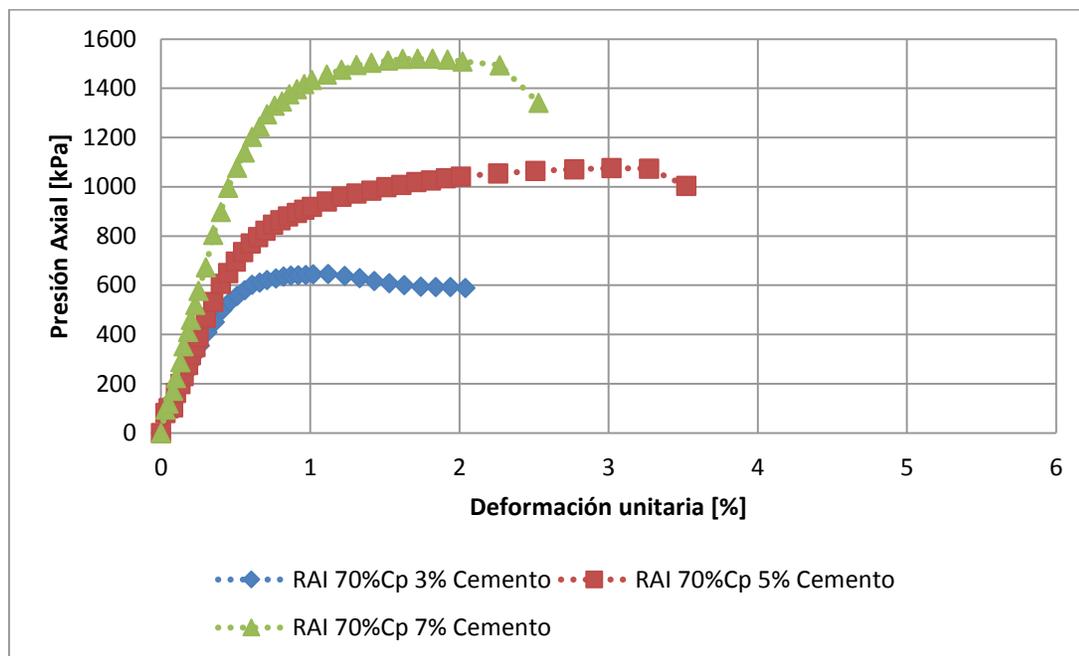


Figura 4.22 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI con 70% de sólidos con 28 días de curado.

En todos los resultados obtenidos para los ensayos de compresión simple de las probetas de CPB se aprecia un comportamiento lineal dentro de un rango de deformación unitaria, desde 0% a 0,5% incluso hasta 1% en algunos casos. Este tipo de comportamiento es del tipo elástico, ya que se observa la tendencia lineal que obedece a la ley de Hooke.

En estos resultados se puede apreciar un comportamiento del tipo elasto-plástico, es decir, que en una primera instancia se puede observar el comportamiento elástico; pero luego de sobrepasar el límite elástico, las probetas de CPB muestran un comportamiento plástico, esto es, que el material se deforma sin incremento de presión hasta que alcanza la rotura.

Las probetas de CPB con mayores UCS muestran que la respuesta al esfuerzo es más lineal en la primera rama ascendente en comparación a las que tienen

menor UCS, y generalmente la rama descendente cae de forma más abrupta a medida que la UCS es mayor.

Esto se puede explicar con que las probetas con mayor resistencia, pueden almacenar mayor cantidad de energía hasta el punto máximo de esfuerzo. Esto implica propagación rápida de micro-fracturas como se puede observar en la Figura 4.24, la Figura 4.26, y la Figura 4.28. La formación de las fracturas provoca una súbita disminución de la resistencia a la compresión de las probetas.

4.9.1.1. Resistencia en función de contenido de cemento

En los siguientes resultados se puede apreciar el comportamiento que presentan las probetas de RAI para distintos contenidos de cementos a medida que pasan los días de curado y que están representados en la Figura 4.23, Figura 4.25 y Figura 4.27. La Figura 4.24, Figura 4.26 y Figura 4.28 muestran el estado de las probetas antes y después de ser ensayadas.

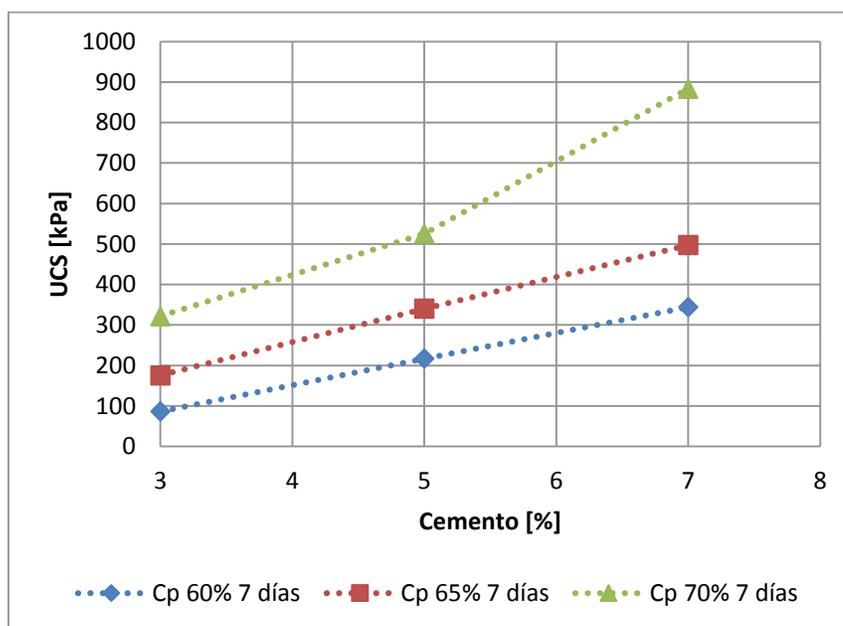


Figura 4.23 Resistencia de RAI en función de contenido de cemento, para 7 días de curado.

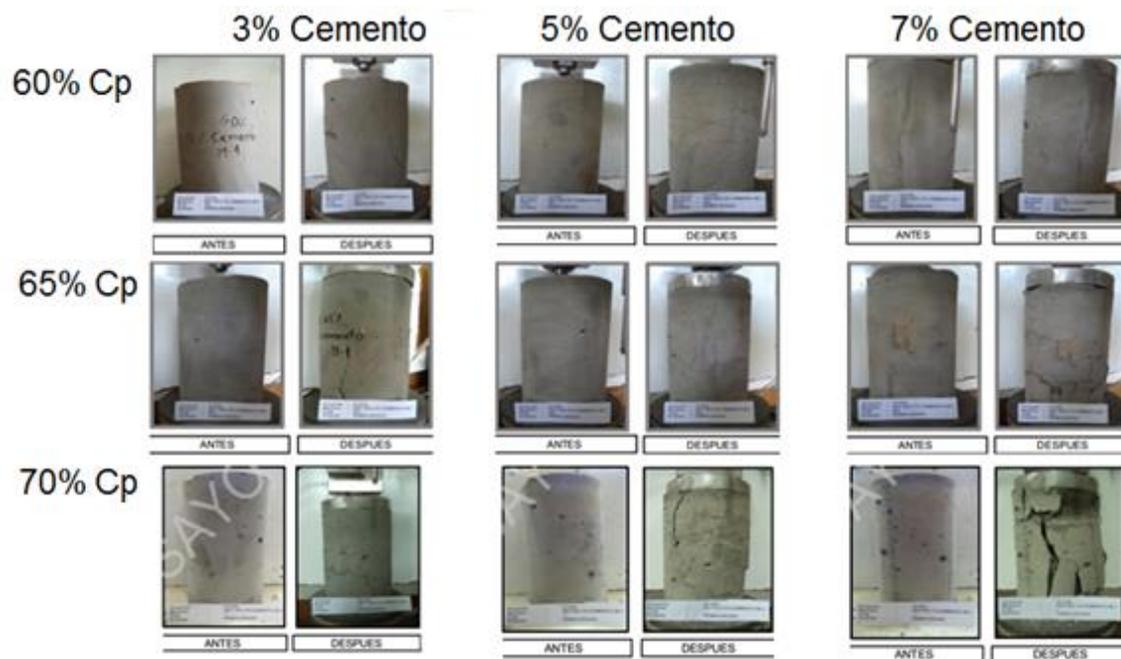


Figura 4.24 Probetas de RAI antes y después del ensayo, con 7 días de curado.

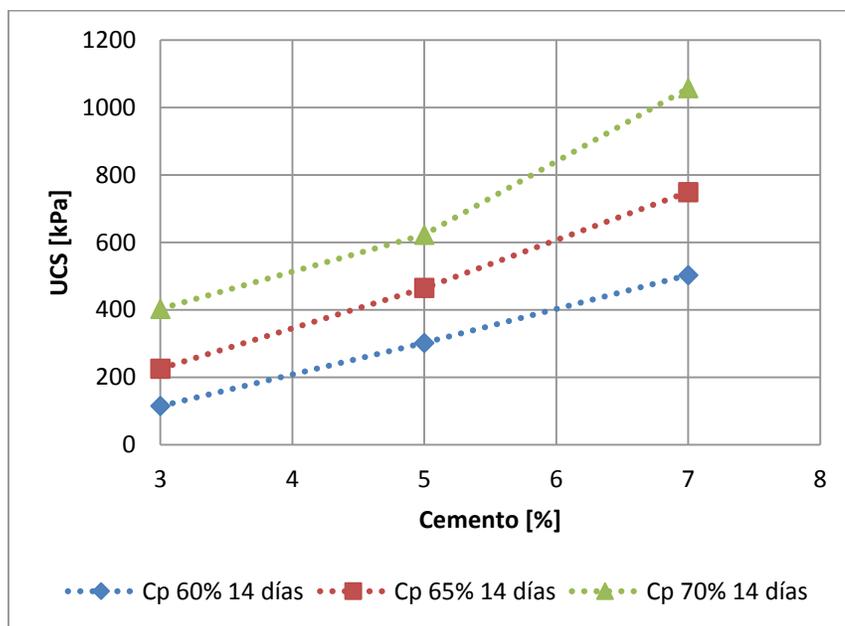


Figura 4.25 Resistencia de RAI en función de contenido de cemento, para 14 días de curado.

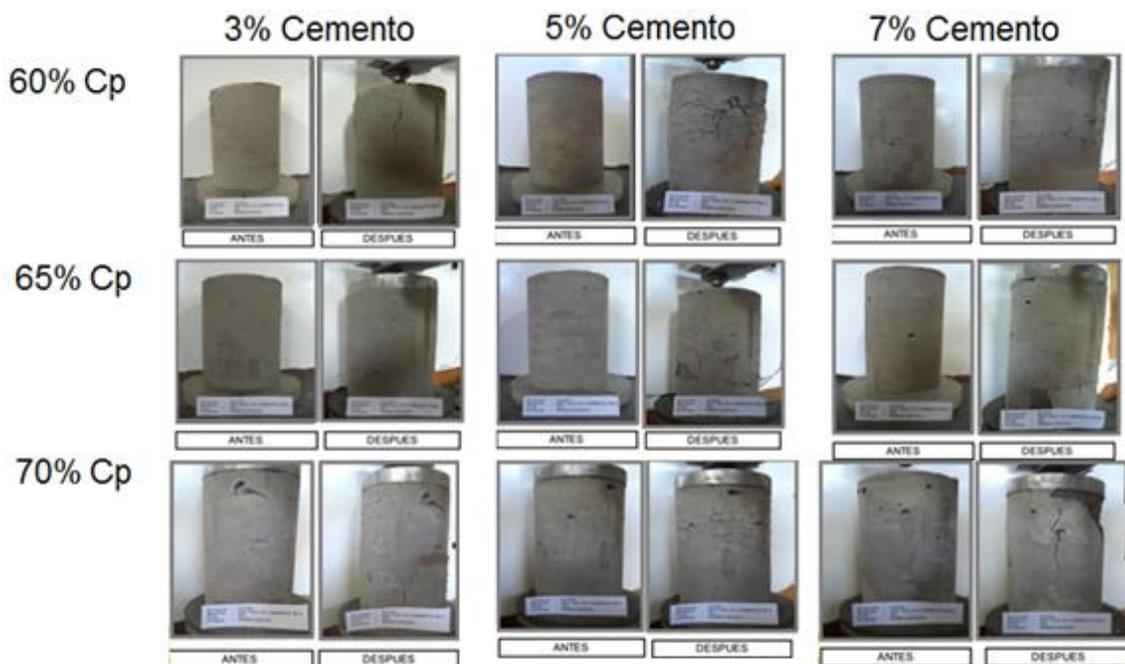


Figura 4.26 Probetas de RAI antes y después del ensayo, con 14 días de curado.

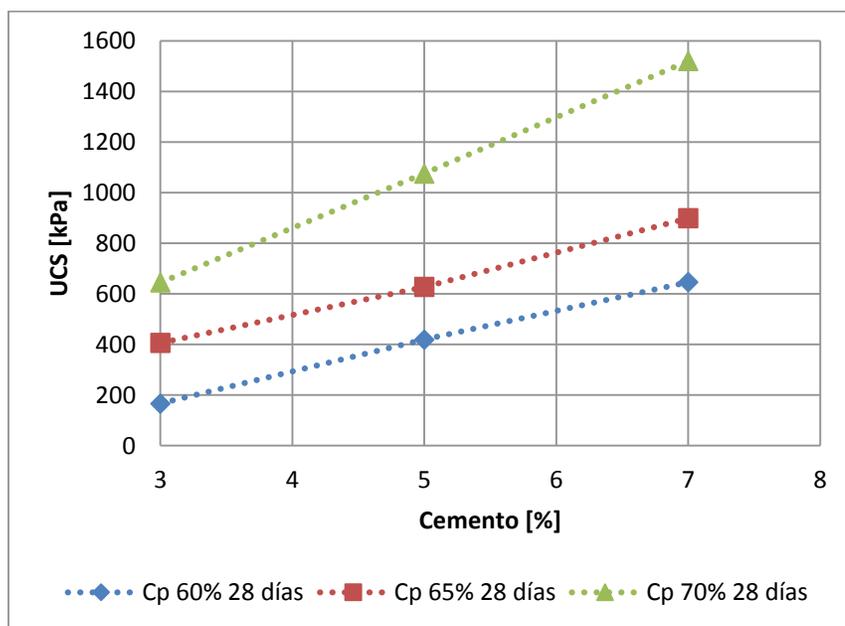


Figura 4.27 Resistencia de RAI en función de contenido de cemento, para 28 días de curado.

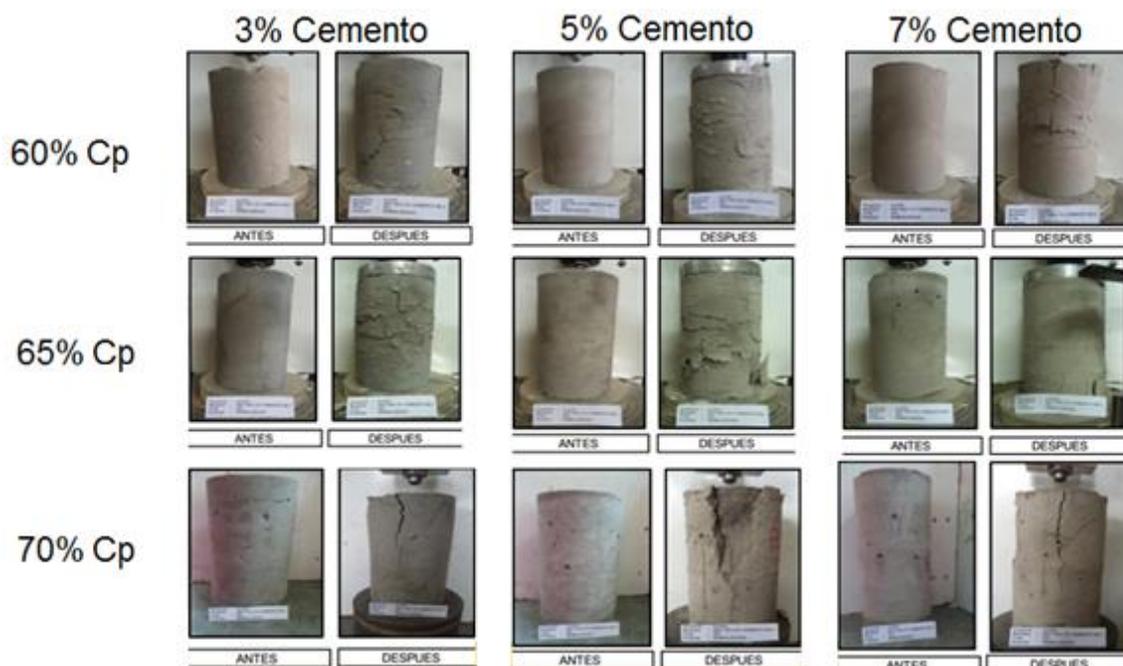


Figura 4.28 Probetas de RAI antes y después del ensayo, con 28 días de curado.

Es importante destacar que las probetas tienden a fracturarse cuando el contenido de cemento aumenta (>5%), como también cuando la concentración de sólidos de la pulpa de relave es igual a 70%.

Los siguientes gráficos muestran cómo se comporta la resistencia a la compresión simple en función de los días de curado.

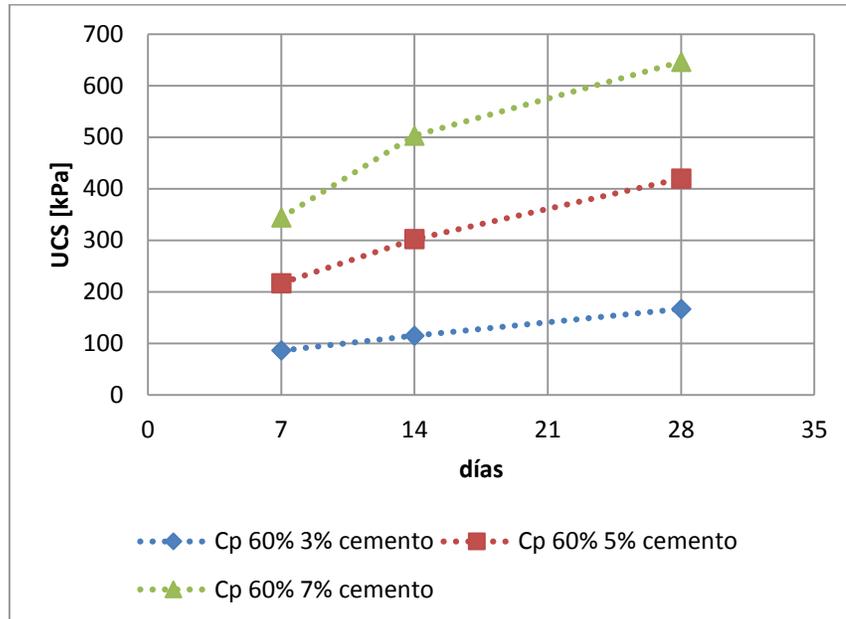


Figura 4.29 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para 60% de sólidos.

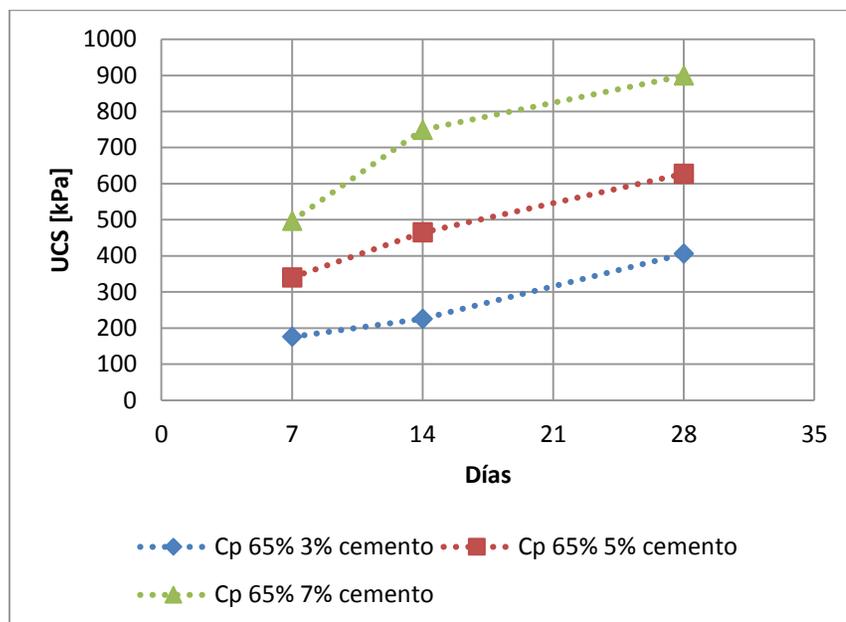


Figura 4.30 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para 65% de sólidos.

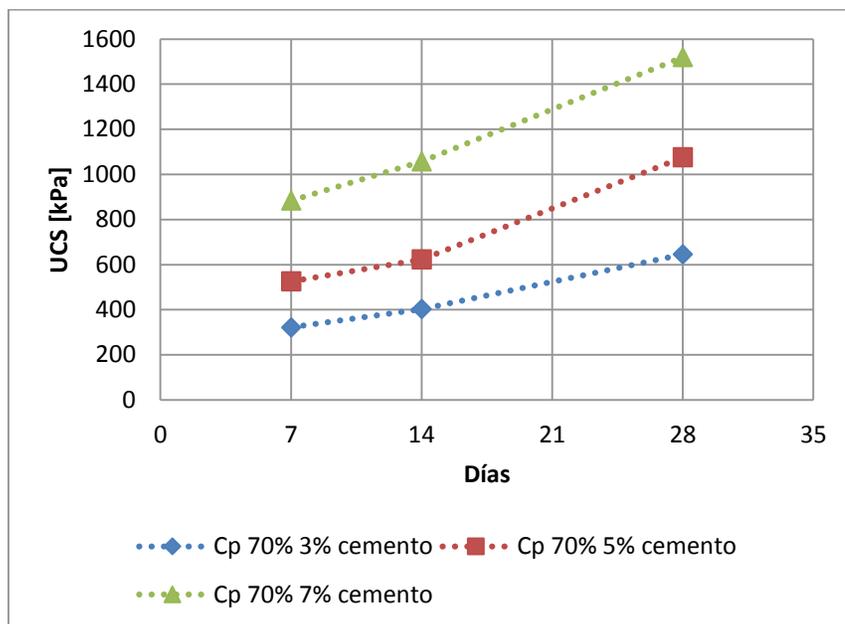


Figura 4.31 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para 70% de sólidos.

De la Figura 4.29 a la Figura 4.31 se puede apreciar que independientemente de la concentración de sólidos de la pulpa o del contenido de cemento, la tendencia es que la resistencia a la compresión simple aumenta con el tiempo de curado.

Estos resultados muestran que la respuesta de los CPB es dependiente del tiempo. De hecho, se aprecia que a medida que aumenta el tiempo de curado de las muestras, aumenta la UCS. Las probetas de CPB tienden a desarrollar mayores resistencias a la compresión debido al progreso de la hidratación del conglomerante. Es decir, a mayor tiempo de curado, mayor es el proceso de hidratación.

4.9.1.2. Módulo de Young, elasticidad o deformabilidad

Los módulos de Young o de elasticidad, fueron calculados por medio de un algoritmo en MATLAB®, el que discrimina la región lineal por medio del coeficiente de correlación de una regresión lineal de los datos de esfuerzo-deformación. Se determina que el coeficiente de correlación no debe ser menor a 0,99 y que la deformación unitaria no debe ser menor a 0,5%. Estos criterios son determinados con el objetivo de seleccionar una cantidad suficiente de datos para obtener un módulo de Young más representativo.

Los datos calculados son los siguientes:

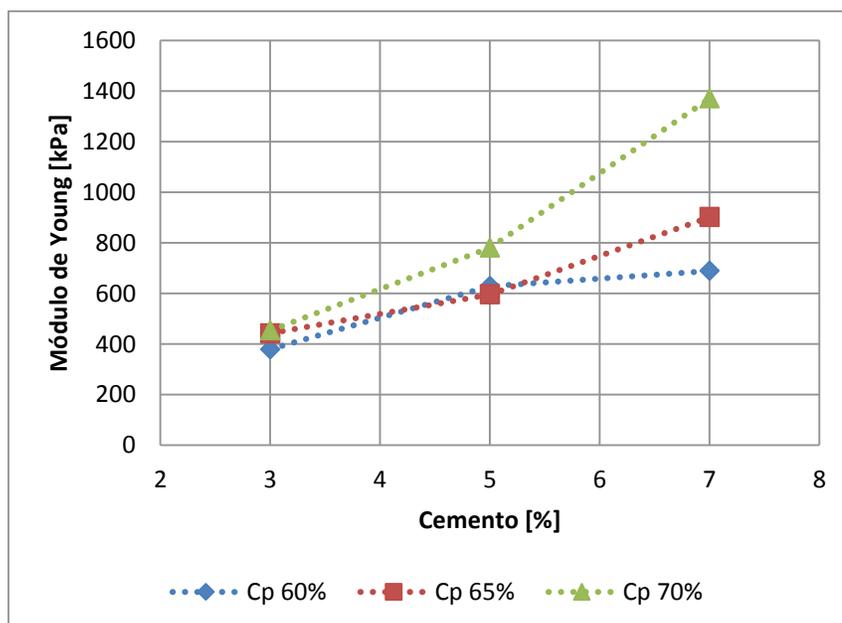


Figura 4.32 Módulos de Young de RAI para 7 días de curado.

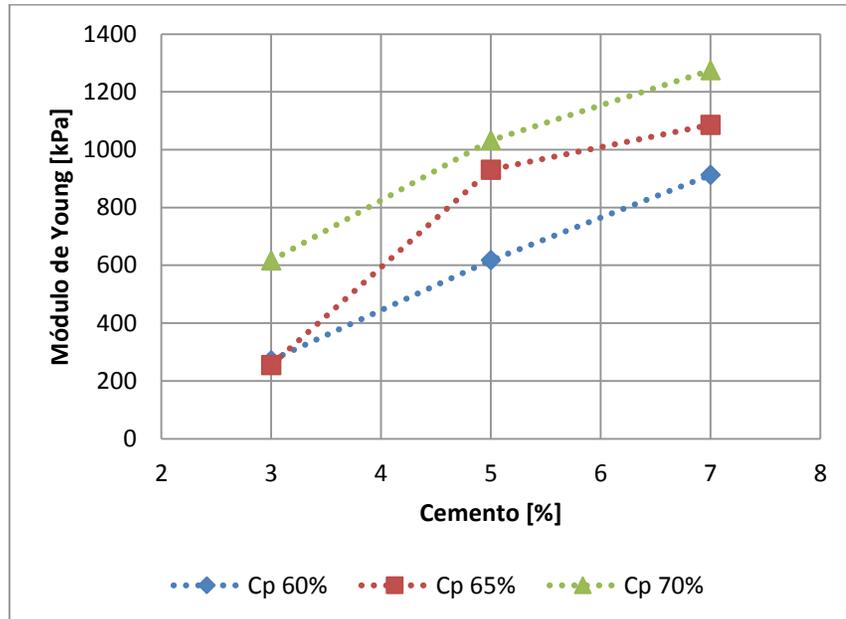


Figura 4.33 Módulos de Young de RAI para 14 días de curado.

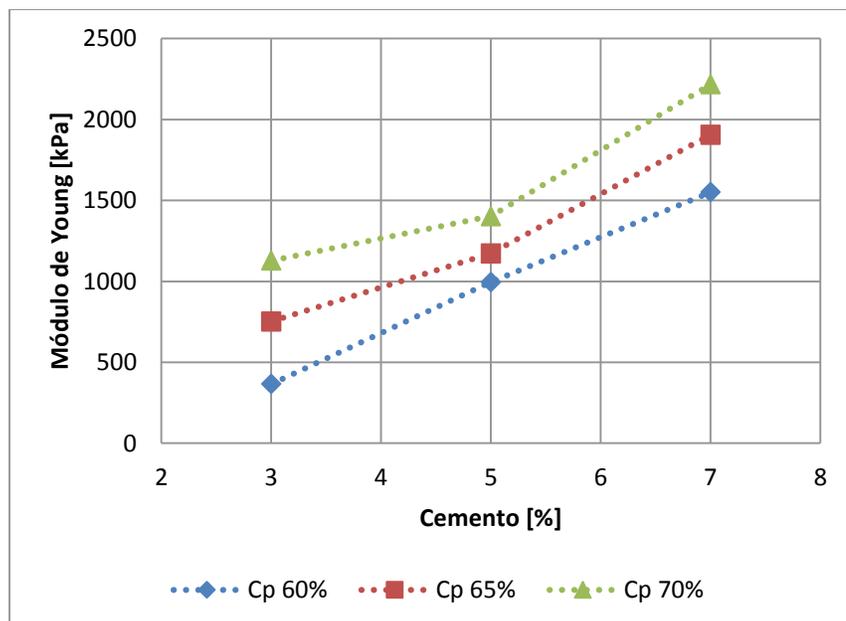


Figura 4.34 Módulos de Young de RAI para 28 días de curado.

Es importante señalar que en la Figura 4.32, la Figura 4.33 y la Figura 4.34 se observa que la tendencia del módulo de Young para cada probeta es a aumentar con el contenido de cemento, y que a medida que aumentan los días de curado de las probetas, también se aumenta el módulo de elasticidad. Esta observación es importante, porque está en concordancia con el aumento de la resistencia a la compresión simple, mostrados en el capítulo 4.9.1.

4.9.1.3. Modelación de UCS en función de la razón W/C

Por medio de métodos numéricos [18], es posible resolver el problema de autovalores para los mínimos cuadrados generalizados, utilizando un software que realice una regresión no lineal del tipo de la ecuación de Abrams (Ec. 2.16). De esta forma es posible encontrar los valores preliminares de K_1 y K_2 , que dependen, en primera instancia, de las relaciones de agua y cemento y de la resistencia a la compresión simple.

De los resultados preliminares de la Tabla 4.10 se puede observar que las variables K_1 y K_2 aparentemente siguen una tendencia.

Tabla 4.10 Resultados de regresión no lineal para distintos días de curado de las muestras.

Cp[%]	Días de curado	K2	K1	R
60	7	1,42	945	0,999
60	14	1,47	1.506	0,998
60	28	1,40	1.711	0,999
65	7	1,33	1.053	0,995
65	14	1,41	1.842	0,991
65	28	1,25	1.570	0,980
70	7	1,39	1.839	0,964
70	14	1,37	2.117	0,954
70	28	1,29	2.730	0,989

Dado que los valores de K_2 son similares para cada una de las regresiones analizadas, se hace un nuevo ajuste manteniendo K_2 constante. Los resultados del nuevo ajuste, manteniendo $K_2 = 1,37$ fijo, se pueden observar en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Resultados de nuevo ajuste con $K_2 = 1,37$

Cp[%]	Días de curado	K1	R
60	7	833	0,996
60	14	1.196	0,989
60	28	1.580	0,998
65	7	1.162	0,992
65	14	1.685	0,989
65	28	2.155	0,926
70	7	1.781	0,964
70	14	2.132	0,954
70	28	3.264	0,973

Con estos resultados se puede inferir que la constante K_2 puede corresponder al material utilizado, ya que para todos los experimentos fue utilizado el mismo tipo de pulpa de relave, y tampoco se cambió el tipo de cemento utilizado. A pesar de mantener K_2 constante para todos los conjuntos de datos, los coeficientes de correlación indican que las regresiones son suficientemente satisfactorias, ya que ninguna de ellas tiene menos de un 90% de correlación. Los resultados de la Tabla 4.11 se puede observar en la Figura 4.35, Figura 4.36 y en la Figura 4.37

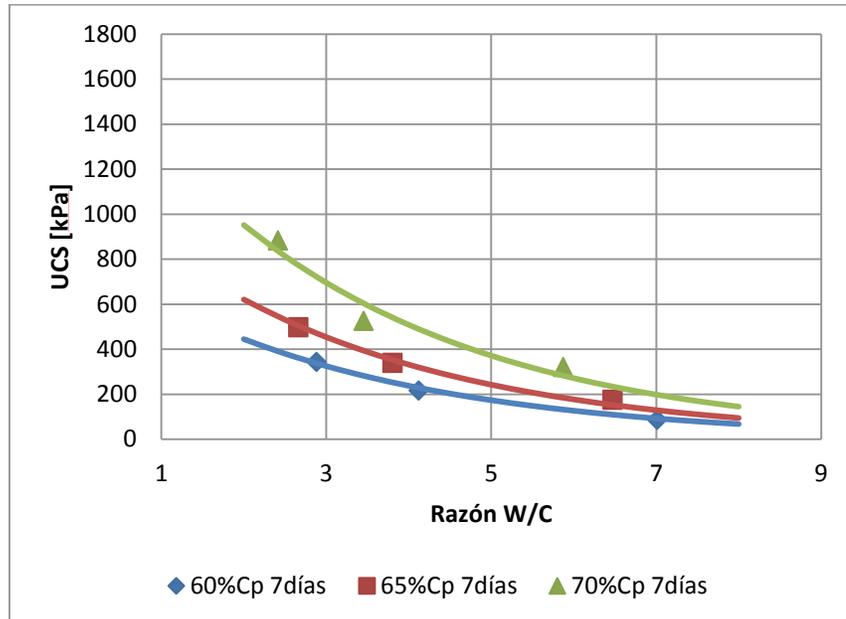


Figura 4.35 Resistencia vs W/C a 7 días.

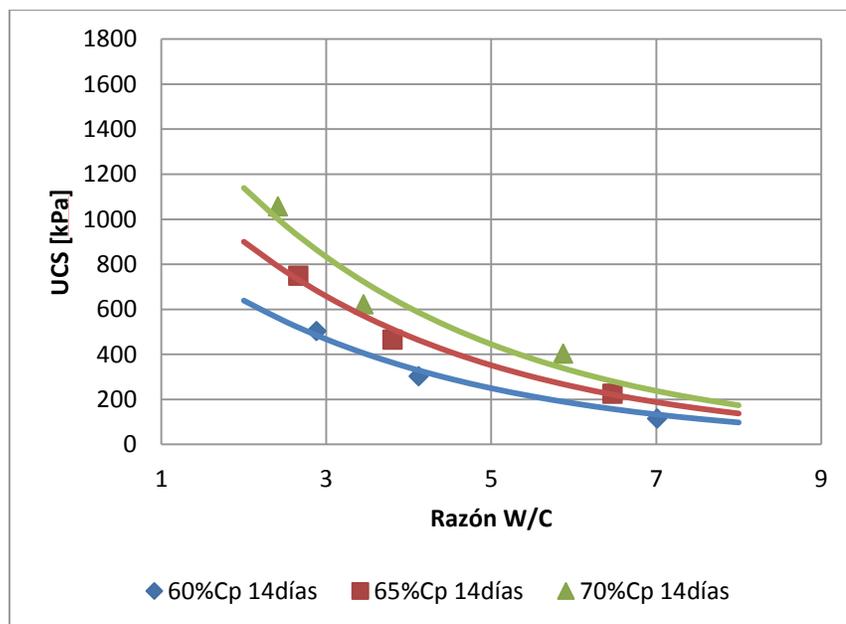


Figura 4.36 Resistencia vs W/C a 14 días.

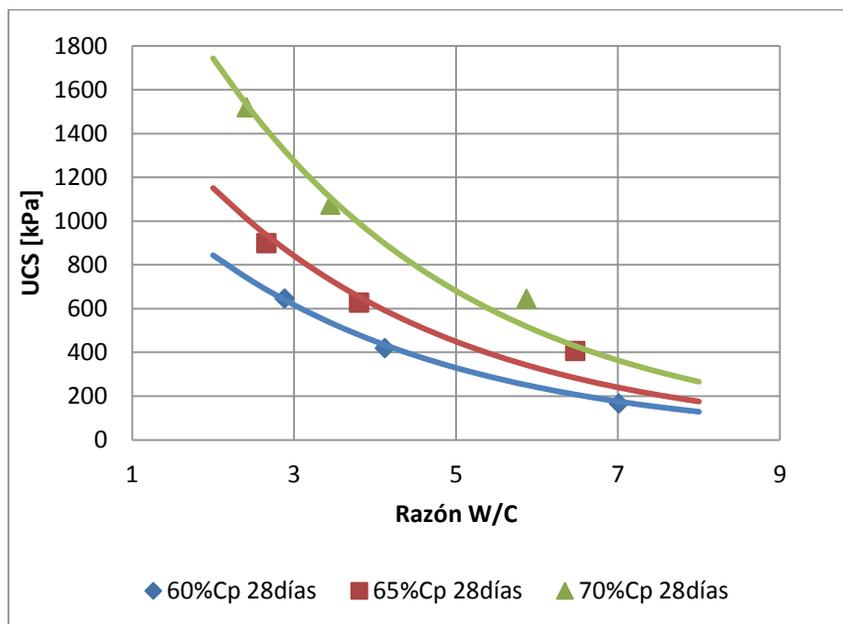


Figura 4.37 Resistencia vs W/C a 28 días.

4.9.2. Relleno cementado con muestra RAI400 y cemento

En busca de analizar la resistencia de las mezclas de relaves modificados, se realiza un cambio en la granulometría del relave en seco. El procedimiento aplicado es el explicado en la sección 3.3, donde se realiza un tamizado del sólido del relave, seleccionando las partículas que se encuentran sobre la malla Tyler N°400, que luego son mezcladas con sólidos sin tamizar.

Las probetas fabricadas con el nuevo relave, denominado RAI400, son sometidas a los mismos procedimientos de curado que las probetas hechas de RAI y RAI+FA, y a los mismos ensayos de compresión simple, para determinar las propiedades elásticas y plásticas del CPB.

Desde la Figura 4.38 a la Figura 4.43 se muestran los resultados del ensayo de compresión simple para las probetas de RAI400.

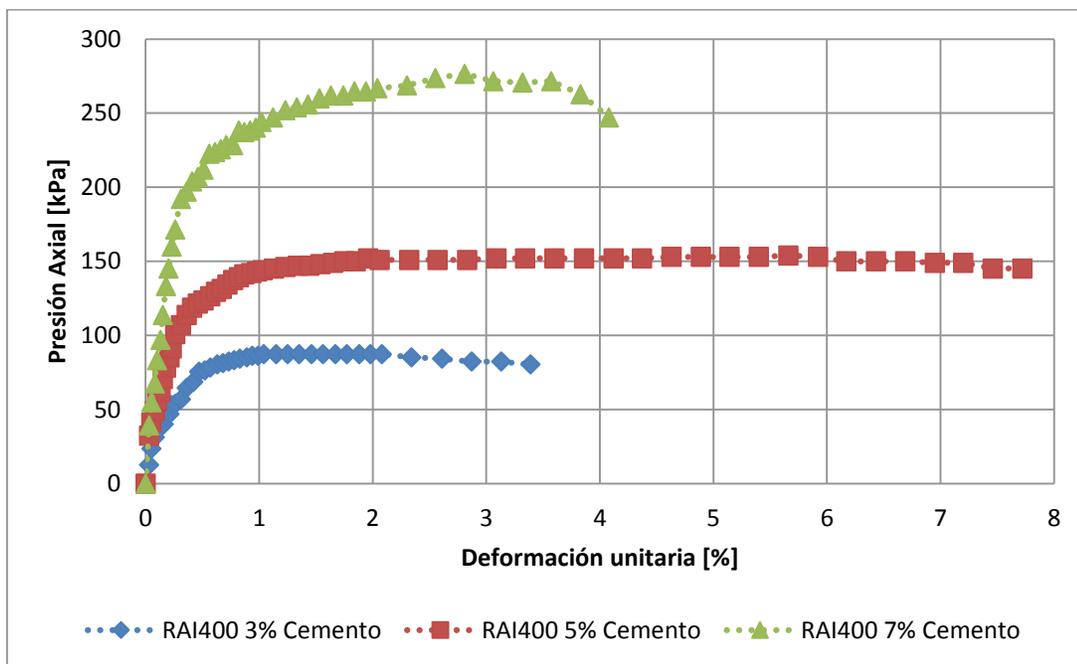


Figura 4.38 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 60% de sólidos con 7 días de curado

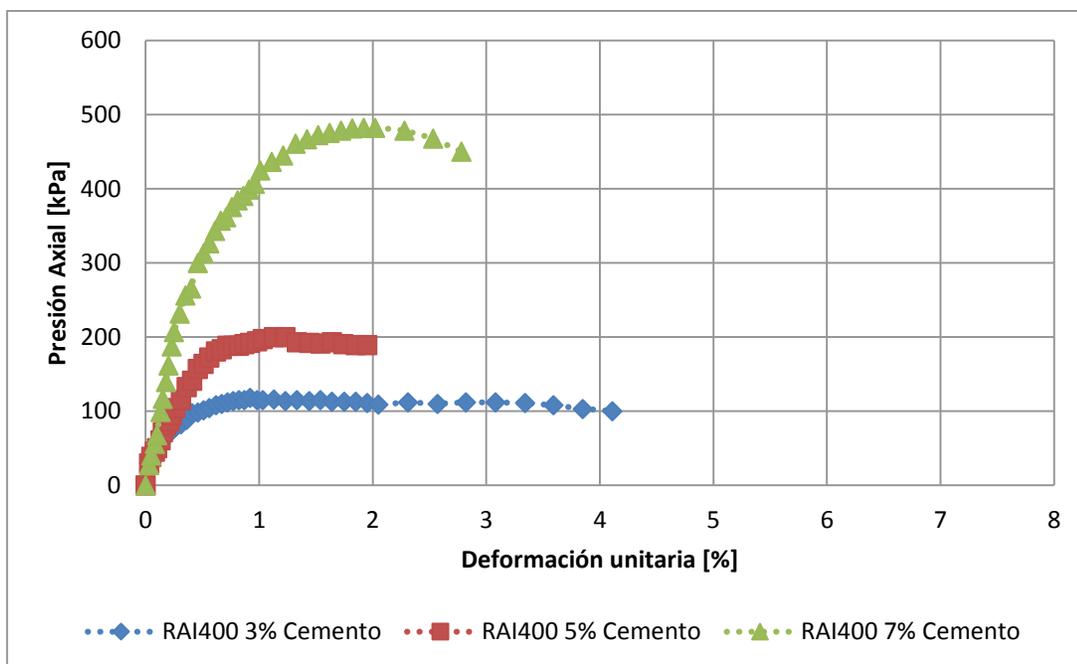


Figura 4.39 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 60% de sólidos con 14 días de curado

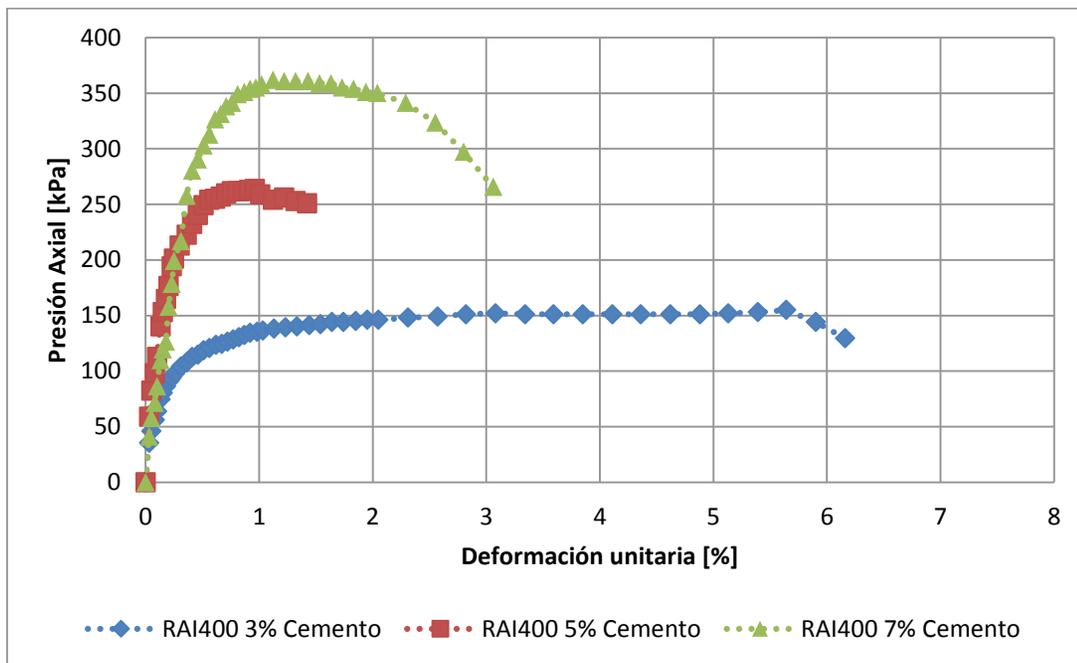


Figura 4.40 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 60% de sólidos con 28 días de curado

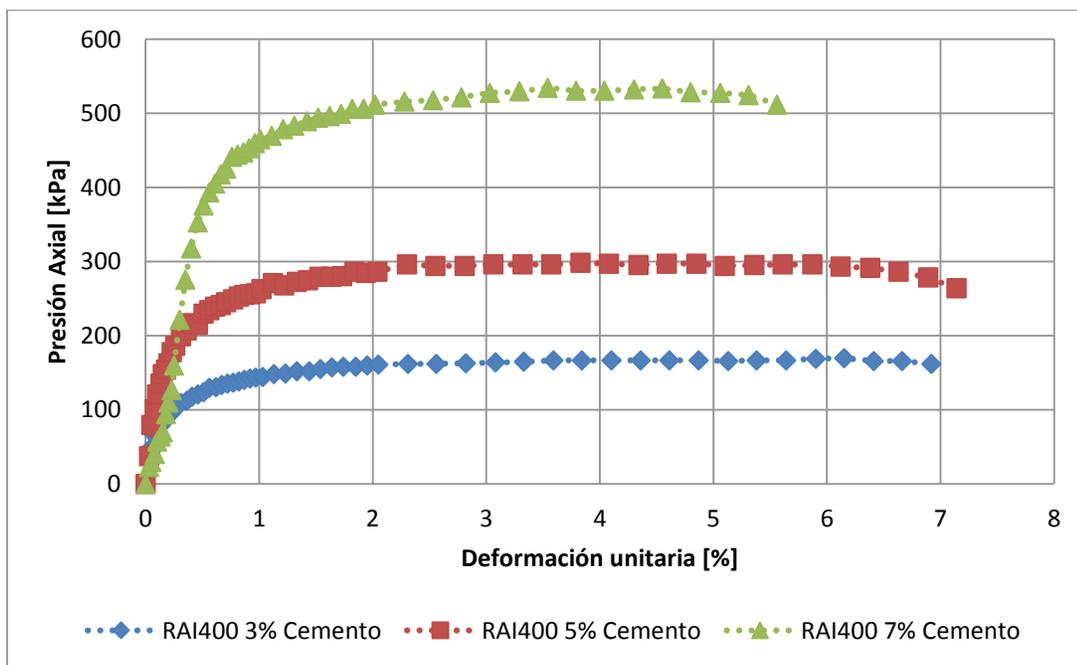


Figura 4.41 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 65% de sólidos con 7 días de curado

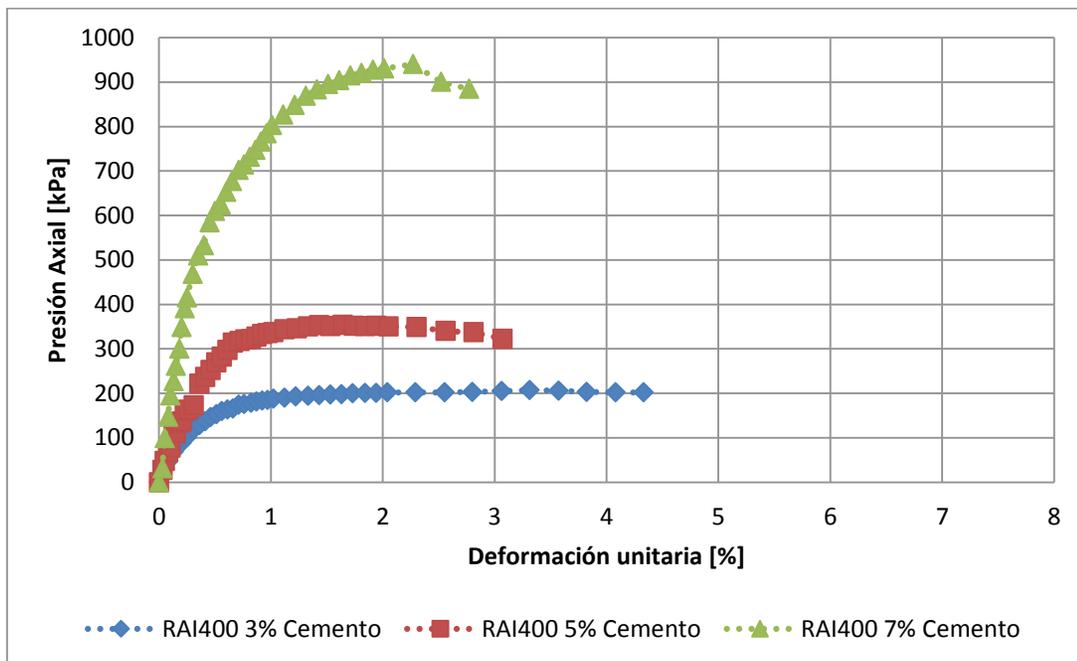


Figura 4.42 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 65% de sólidos con 14 días de curado

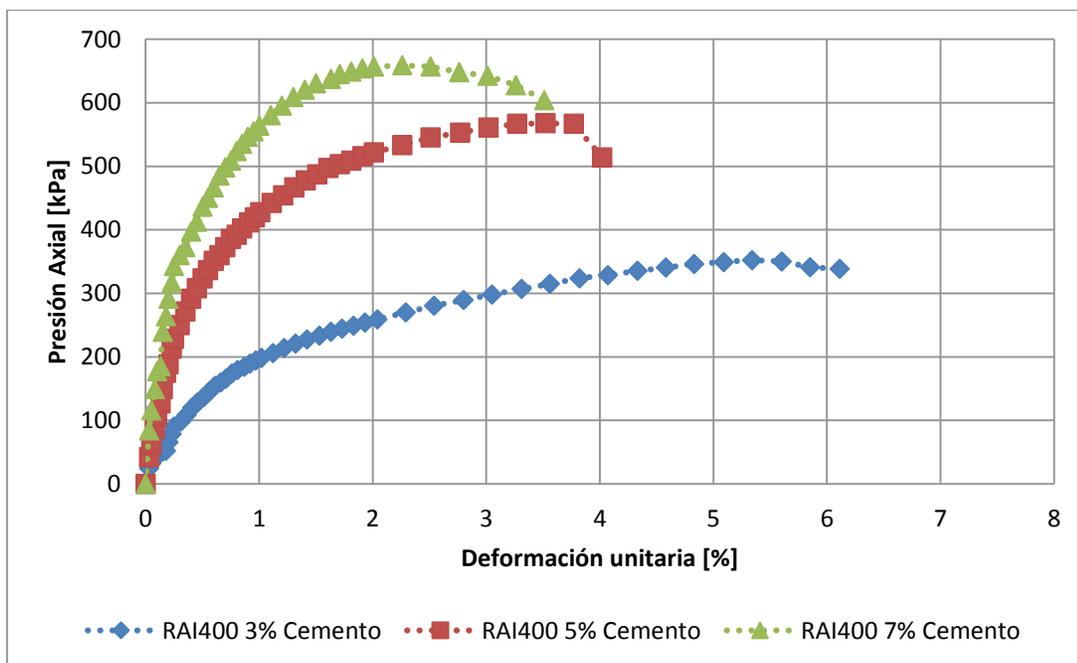


Figura 4.43 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI400 con 65% de sólidos con 28 días de curado

De los resultados anteriores se puede ver que por lo general se mantiene el comportamiento observado en las secciones 4.9.1 y 4.9.2, donde las probetas que tienen mayores contenidos de cemento son las que almacenan más energía, y que debido a esto se producen las fracturas. También se puede ver que las probetas con menores contenidos de cemento son las que presentan mayormente un comportamiento dúctil.

4.9.2.1. Resistencia en función de contenido de cemento

En los siguientes resultados se puede apreciar el comportamiento que presentan las probetas de RA1400 para distintos contenidos de cements en función de los días de curado y que están representados de la Figura 4.45 a la Figura 4.47. La Figura 4.48 y la Figura 4.49 representan el cambio de la resistencia a la compresión para distintos contenidos de cemento en función de los días de curado. La Figura 4.44 muestra el estado de las probetas antes y después de ser ensayadas.

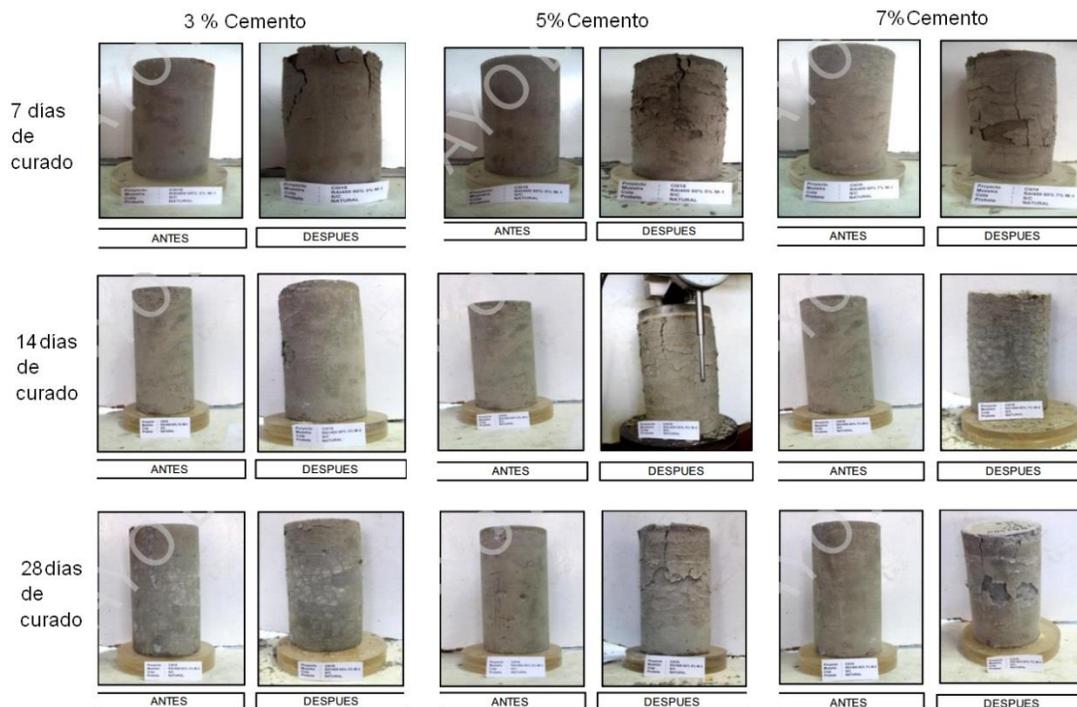


Figura 4.44 Probetas con RAI400 con 60% Cp antes y después del ensayo para 7, 14 y 28 días de curado.

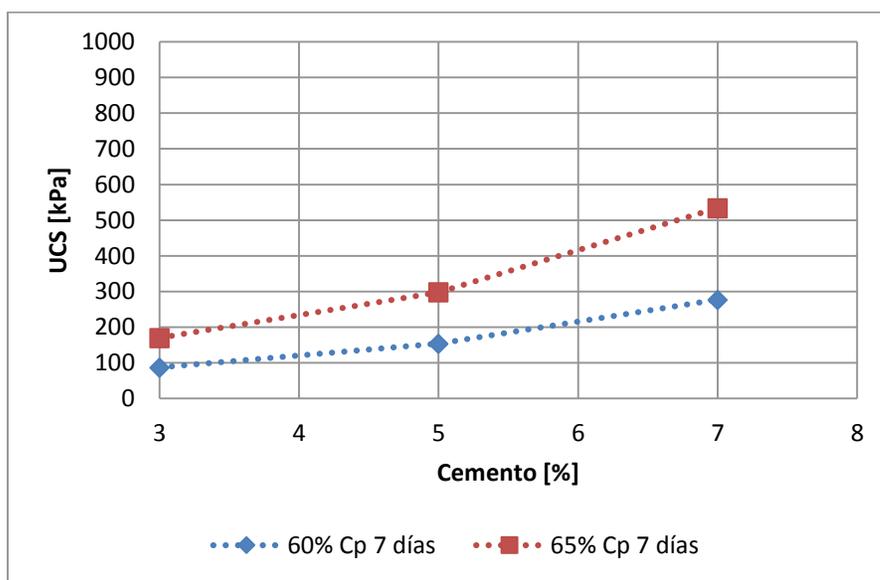


Figura 4.45 Resistencia de RAI400 en función de contenido de cemento, para 7 días de curado.

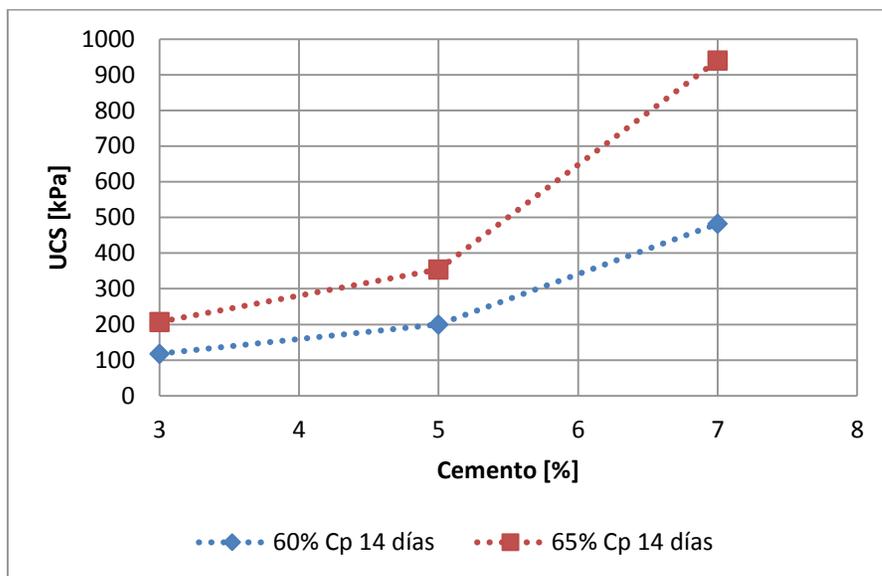


Figura 4.46 Resistencia de RAI400 en función de contenido de cemento, para 14 días de curado.

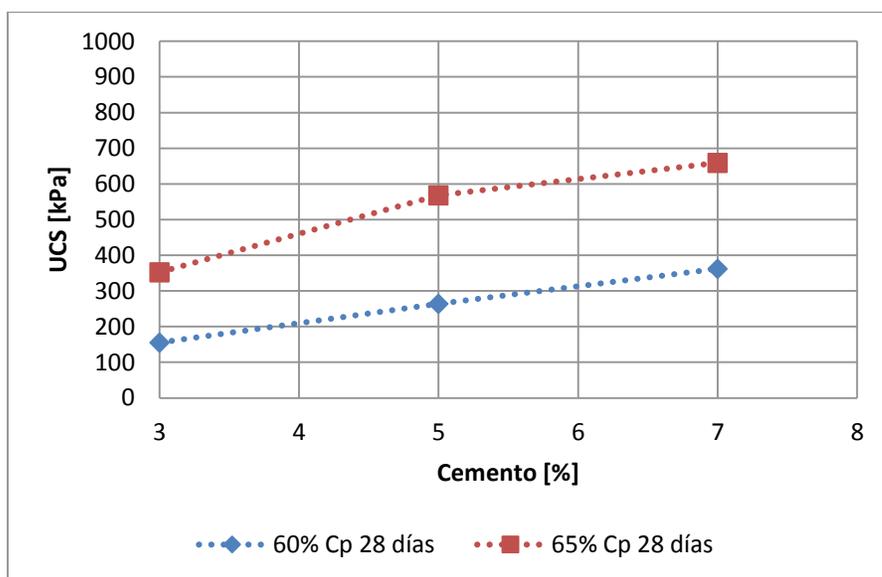


Figura 4.47 Resistencia de RAI400 en función de contenido de cemento, para 28 días de curado.

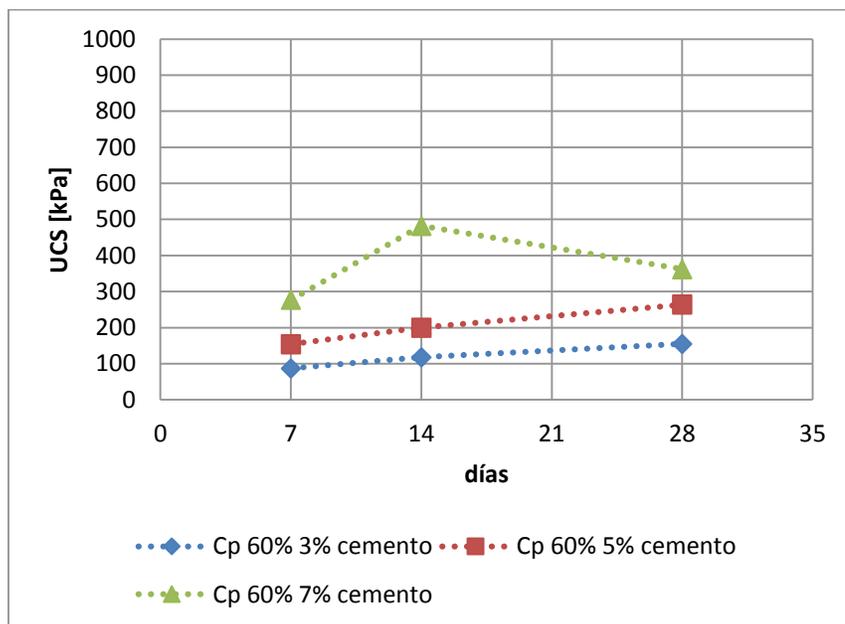


Figura 4.48 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para RAI400 60% de sólidos.

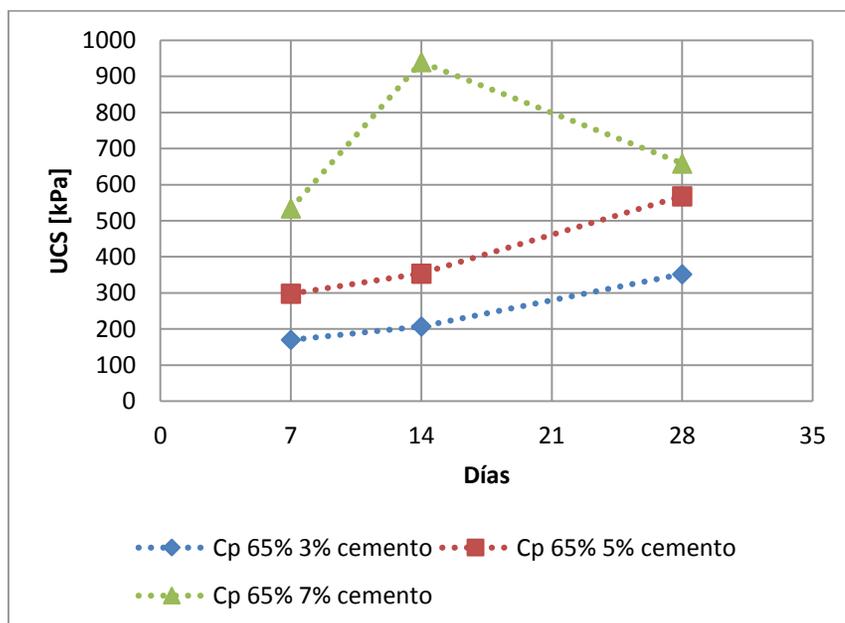


Figura 4.49 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para RAI400 60% de sólidos.

4.9.2.2. Módulo de Young, elasticidad o deformabilidad

Los resultados de esta sección están calculados de la misma manera que en las secciones 4.9.1.2 y 4.9.3.2. Considerando los mismos criterios de evaluación al momento de ejecutar el algoritmo.

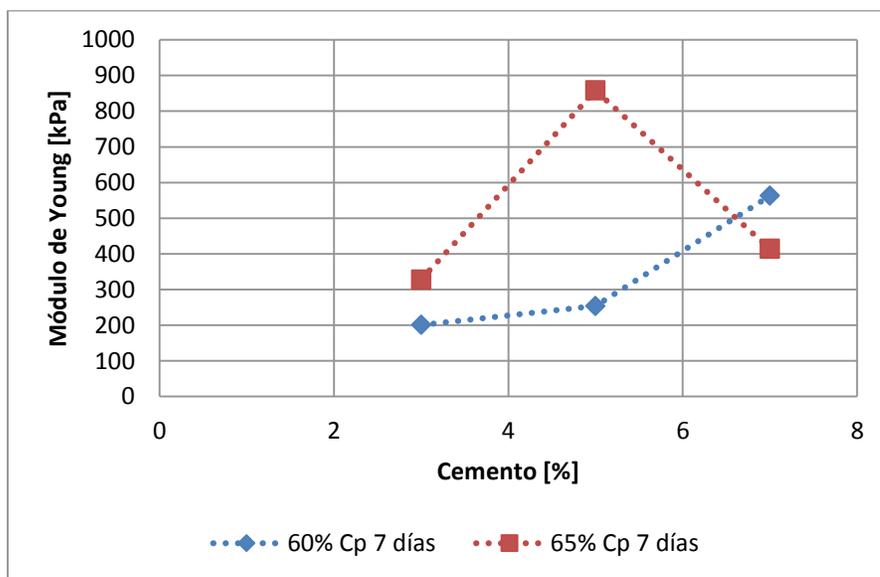


Figura 4.50 Módulos de Young de RAI400 para 7 días de curado.

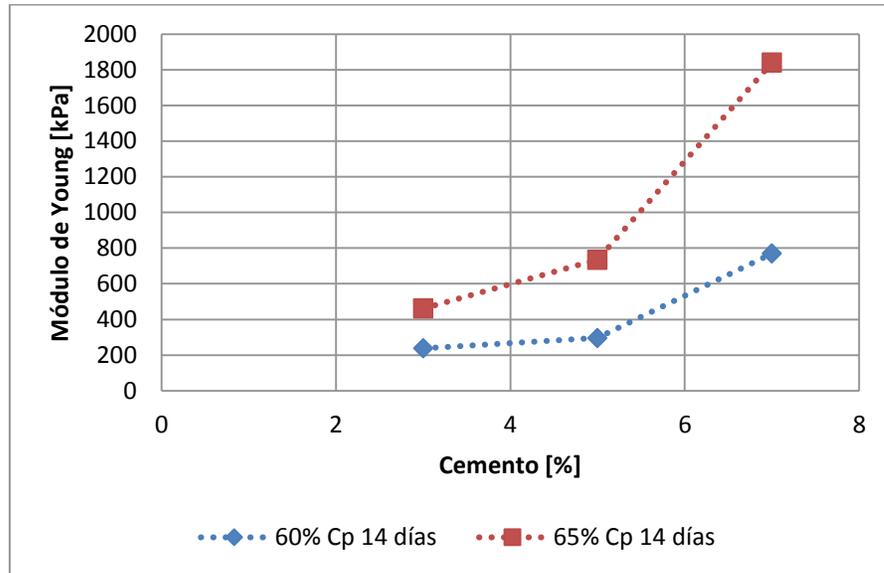


Figura 4.51 Módulos de Young de RAI400 para 14 días de curado.

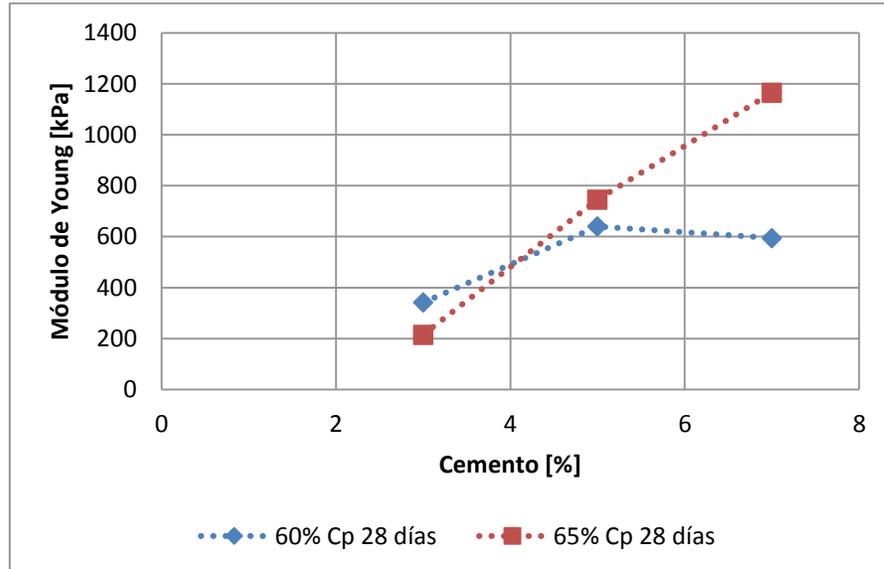


Figura 4.52 Módulos de Young de RAI400 para 14 días de curado.

A excepción de los resultados de la Figura 4.50, los de la Figura 4.51 y Figura 4.52 demuestran un aumento del módulo de Young a medida que se aumenta

el contenido de cemento. Este tipo de comportamiento también se observa en los resultados de la sección 4.9.1.2 y en la sección 4.9.3.2 para los 7 y 28 días de curado. Lo que indica que las probetas van endureciendo a medida que se aumenta el contenido de conglomerante, y también cuando aumenta el tiempo de curado de las muestras.

4.9.2.3. Modelación de UCS en función de la razón W/C

Tabla 4.12 Resultados de regresión no lineal para distintos días de curado de las muestras.

Cp[%]	Días de curado	K2	K1	R
60	7	1,39	693	0,971
60	14	1,69	2114	0,953
60	28	1,24	659	0,995
65	7	1,42	1324	0,969
65	14	1,99	5851	0,956
65	28	1,18	1037	0,998

Tabla 4.13 Resultados de nuevo ajuste con $K_2 = 1,48$

Cp[%]	Días de curado	K1	R
60	7	859	0,963
60	14	1388	0,942
60	28	1227	0,813
65	7	1512	0,966
65	14	2403	0,920
65	28	2185	0,105

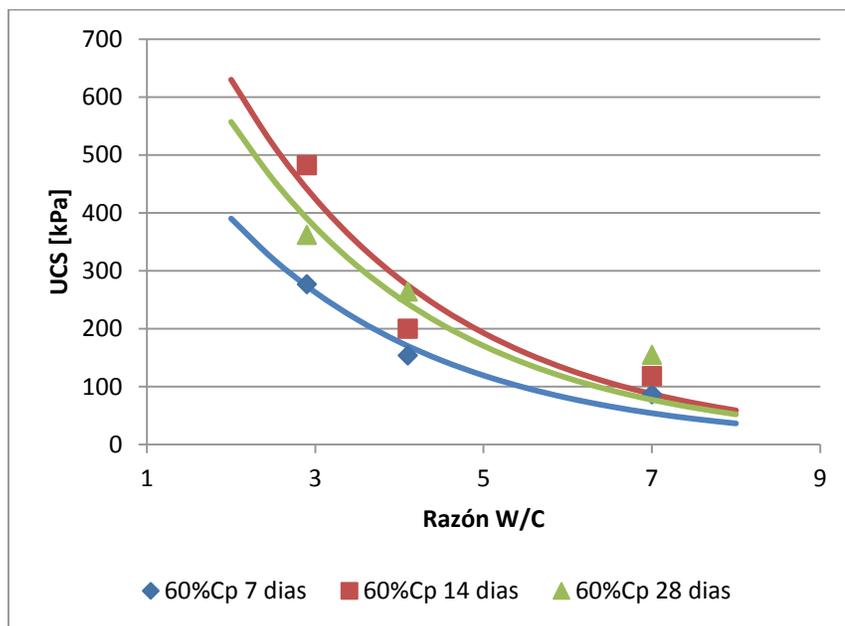


Figura 4.53 Resistencia vs W/C para RAI400 con 60% de sólidos a 7, 14 y 28 días de curado.

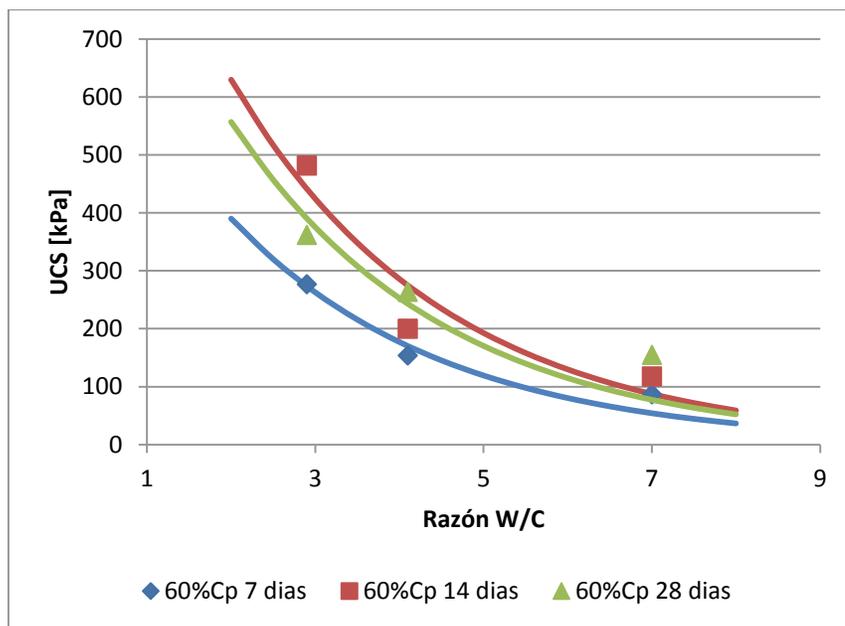


Figura 4.54 Resistencia vs W/C para RAI400 con 65% de sólidos a 7, 14 y 28 días de curado.

En la Figura 4.53 y en la Figura 4.54 se puede apreciar que las regresiones no lineales no ajustan correctamente a la Ec. 2.16 de Abrams. Esto se debe a que se selecciona un valor promedio de $K_2=1,48$ para todas las regresiones a la ecuación. Este tipo de decisión es válida para los resultados de las secciones 4.9.1.3 y 4.9.3.3, donde se puede apreciar una tendencia de los valores de K_2 , que se asemejan entre ellos. No así en este caso. Con los coeficientes de correlación de las Tabla 4.12 y la Tabla 4.13 se puede observar que inicialmente las regresiones ajustaban correctamente, pero que luego de cambiar la variable K_2 se obtienen curvas de regresión que no ajustan a los datos. De 6 regresiones analizadas, sólo 2 tienen más de un 95% de los datos que pasan por la curva calculada.

De estos resultados se puede pensar que la constante K_2 está relacionada con la granulometría de la pulpa de relave utilizada. Ya que no se pudo realizar el mismo tratamiento que con los datos de mezclas con RAI y RAI+FA. También se tiene que considerar que la única diferencia con las otras muestras, es el cambio en la granulometría.

4.9.3. Relleno cementado con muestra RAI+FA

Con el objetivo de observar el comportamiento de la resistencia del relleno considerando una menor cantidad de cemento, se agrega una cantidad de un aditivo, denominado internamente en CI-JRI como FA, en una razón 4:1 de cemento y FA, conformando los mismos porcentajes de conglomerantes que en los ensayos del capítulo 4.9.1.

Para acotar el estudio llevado a cabo, se selecciona una concentración de sólidos de 65%, debido a que representa un valor más o menos fácil de obtener con los espesadores convencionales, sin implicar un aumento en los costos de operación de los mismos. También se selecciona debido a que los resultados

obtenidos en el capítulo 4.9.1 indican que una concentración óptima en términos de resistencia y de costos, corresponde a 65% para el RAI utilizado. Los resultados de los ensayos se pueden observar de la Figura 4.47 a la Figura 4.49.

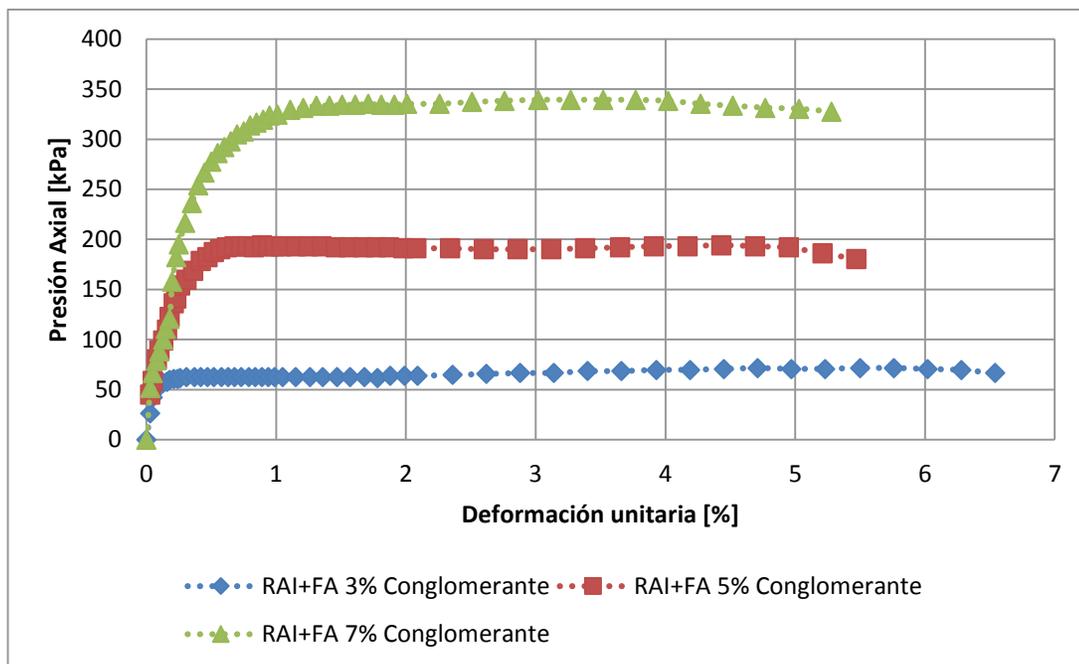


Figura 4.55 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI+FA con 65% de sólidos con 7 días de curado

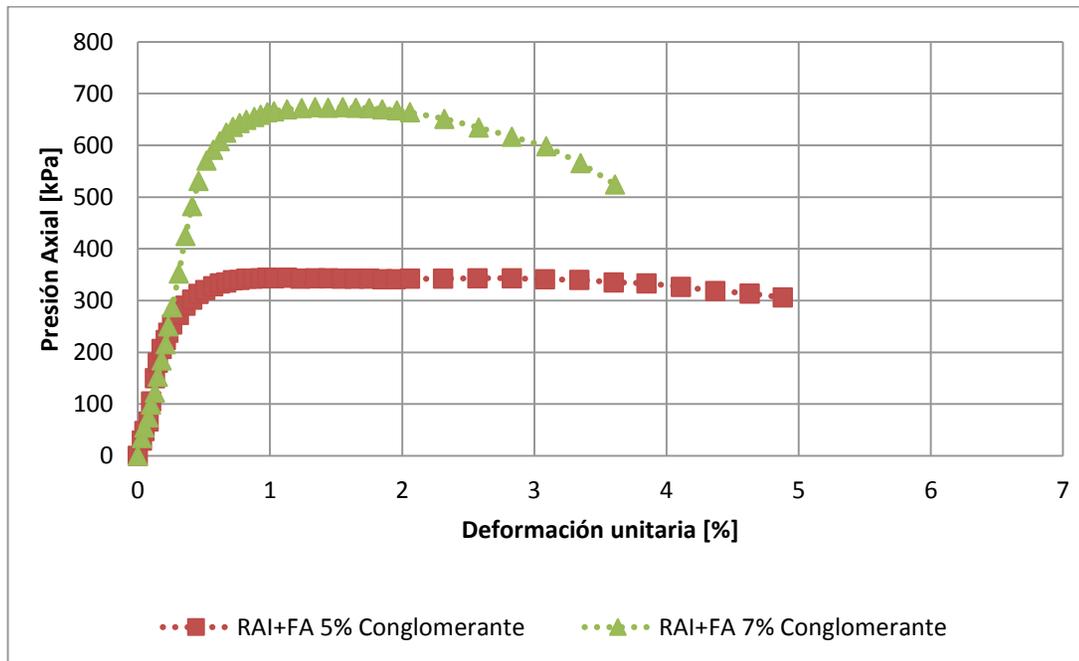


Figura 4.56 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI+FA con 65% de sólidos con 14 días de curado

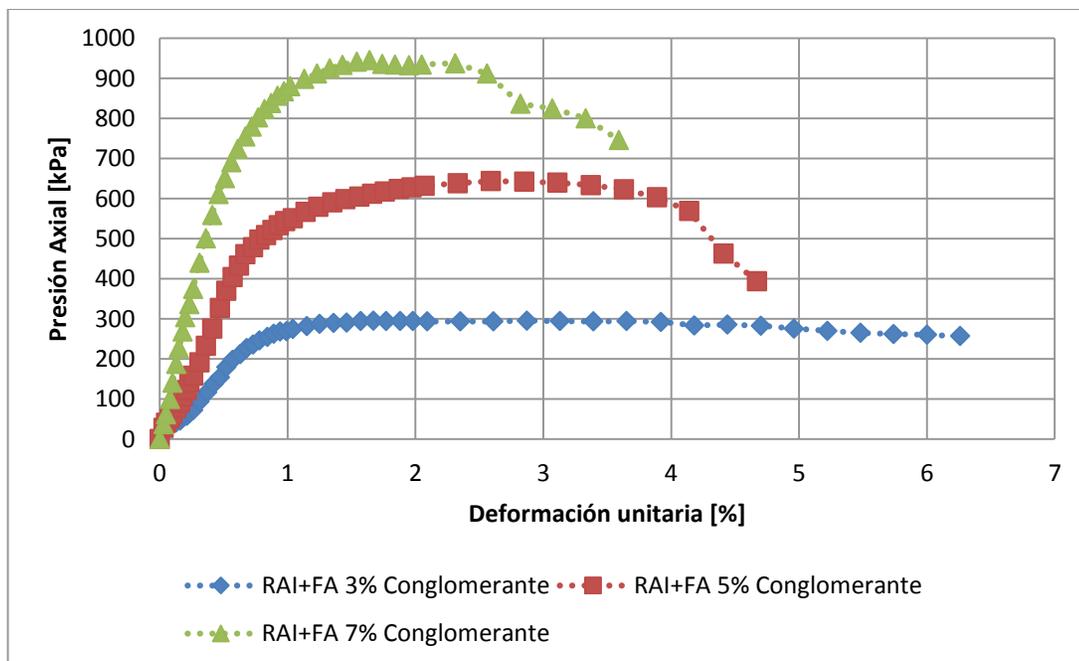


Figura 4.57 Gráfico de esfuerzo-deformación para RAI+FA con 65% de sólidos con 28 días de curado

En los resultados presentados anteriormente, se puede observar que para deformaciones unitarias menores a 0,5% las probetas de RAI+FA presentan un comportamiento lineal, tal como lo observado en la sección 4.9.1. También está presente el mismo comportamiento, del tipo elasto-plástico.

También se tiene que tomar en cuenta la forma que adoptan las curvas de esfuerzo y deformación a medida que aumentan los días de curado. En la Figura 4.55 se puede apreciar que para todas las dosis existe una resistencia a la compresión que está acorde a la concentración de conglomerante, que aumenta a medida que es mayor la cantidad de cemento y aditivo. También se puede observar que las probetas presentan un comportamiento dúctil, debido a que a medida que, luego de pasar el límite elástico, las probetas de RAI+FA presentan deformaciones sin mayores esfuerzos. Esto se deduce debido al plateau observado en las tres curvas, y que en la última sección de cada una no hay una disminución abrupta del esfuerzo, lo que indica que las probetas no presentan mayores fracturas.

Sin embargo, se tiene que tomar en cuenta los días de curado que tienen las probetas, ya que en las Figura 4.56 y Figura 4.57 se comienza a observar un comportamiento más frágil, debido a que las probetas que tienen una mayor cantidad de conglomerante presentan fracturas evidenciadas por la abrupta caída de esfuerzos para mayores deformaciones, y que se ve acrecentado para los 28 días de curado.

4.9.3.1. Resistencia en función de contenido de cemento

En la Figura 4.58 se pueden apreciar las probetas de RAI+FA (relave con agua industrial más aditivo) antes y después de ser ensayadas.

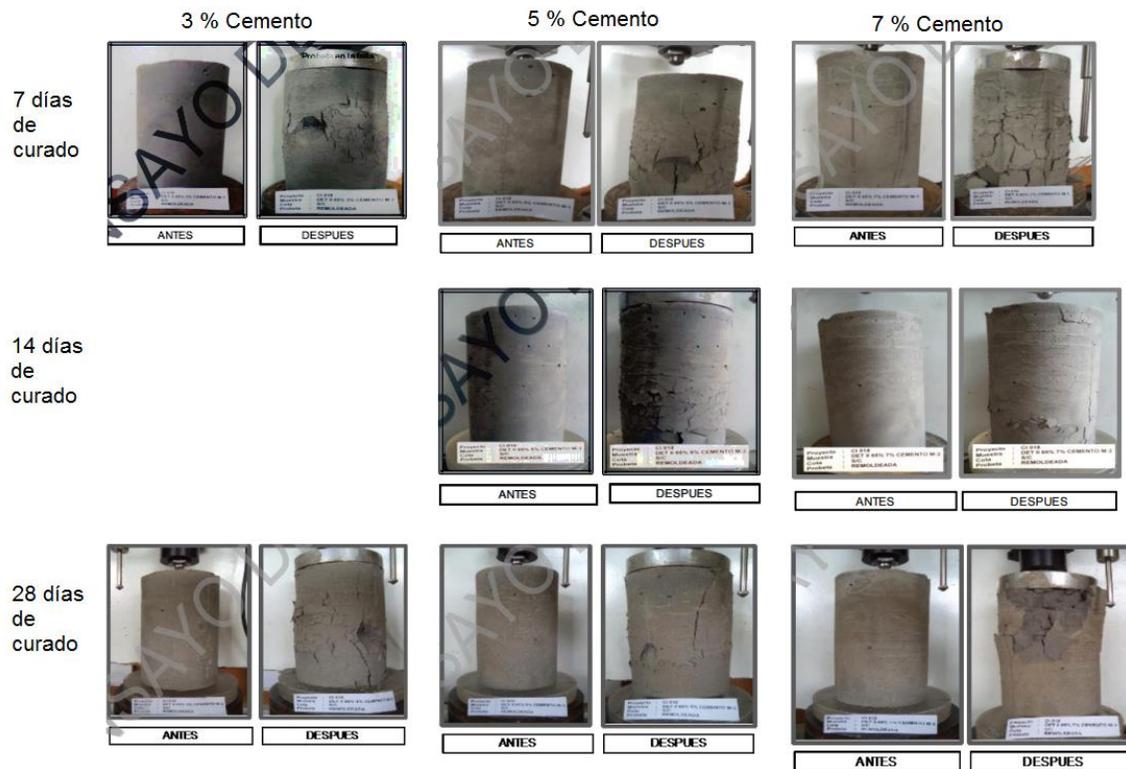


Figura 4.58 Probetas con RAI+FA con 65% Cp antes y después del ensayo para 7, 14 y 28 días de curado.

A diferencia de la sección 4.9.1.1, donde se veía más o menos claro que las probetas con mayores concentraciones de sólidos y con mayores contenidos de cemento eran las que mayormente presentaban fracturas, en la Figura 4.58 se puede apreciar que la mayoría de las probetas presenta en mayor o menor grado algún tipo de fractura, independientemente de los días de curado o del contenido de cemento

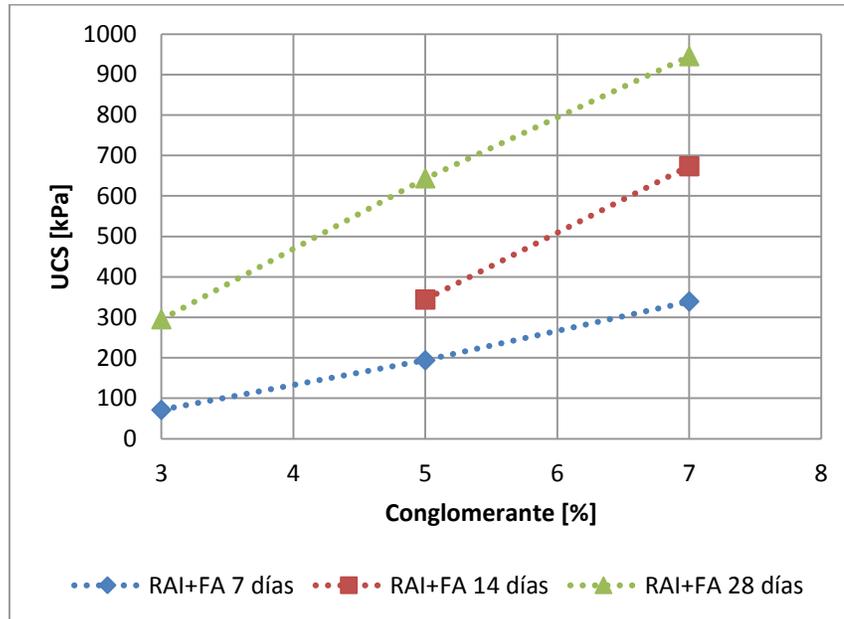


Figura 4.59 UCS para CPB fabricado con RAI+FA, para 7, 14 y 28 días de curado.

En la Figura 4.59 se puede observar que la UCS a los 28 días de curado y 5% y 7% de conglomerante es mayor en comparación a la de las mismas condiciones de fabricación de la sección 4.9.2, que no contiene el aditivo. Observando los resultados de la sección 4.9.2, la resistencia a la compresión a los 28 días de curado para la probeta con un 65% de concentración de sólidos y 5% y 7% de cemento es 628 [kPa] y 899 [kPa], respectivamente. Y para una probeta a los 28 días de curado, con 65% de concentración de sólidos y un 5% y 7% de conglomerante, donde la razón de C:FA (Cemento:FA) es 4:1, la resistencia a la compresión es 643 [kPa] y 945 [kPa], respectivamente.

En la Figura 4.60 se puede observar el comportamiento de la resistencia de las probetas de RAI+FA.

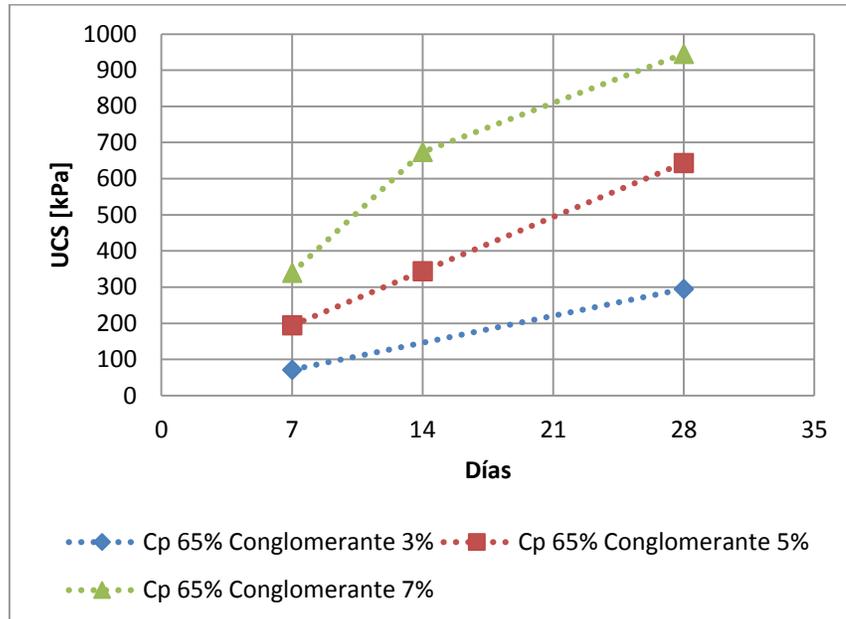


Figura 4.60 Resistencia a la compresión simple en función de los días de curado, para 65% de sólidos.

Es importante hacer la comparación con el gráfico de la Figura 4.30, donde se observa que desde los 14 días de curado, para una mezcla que contiene 5% y 7% de conglomerante, la resistencia a la compresión es mayor para las probetas de CPB de RAI+FA.

Los resultados presentados en esta sección son positivos, ya que aunque se disminuye la cantidad de cemento que contiene la mezcla, de todas maneras es posible alcanzar resistencias adecuadas. Esto tiene un impacto directo al costo final del relleno, debido a que se estaría reemplazando una cantidad de cemento por un porcentaje de aditivo, que es un subproducto de un proceso productivo, que tiene un precio muy por debajo del cemento.

4.9.3.2. Módulo de Young, elasticidad o deformabilidad

Al igual que en la sección 4.9.1.2, los módulos de Young para este tipo de CPB es medido por medio del algoritmo fabricado en MATLAB®. Los datos obtenidos se pueden observar en la Figura 4.61. Dado que la concentración de sólidos de la muestra utilizada queda fija en 65%, solamente se muestra un gráfico con los resultados obtenidos.

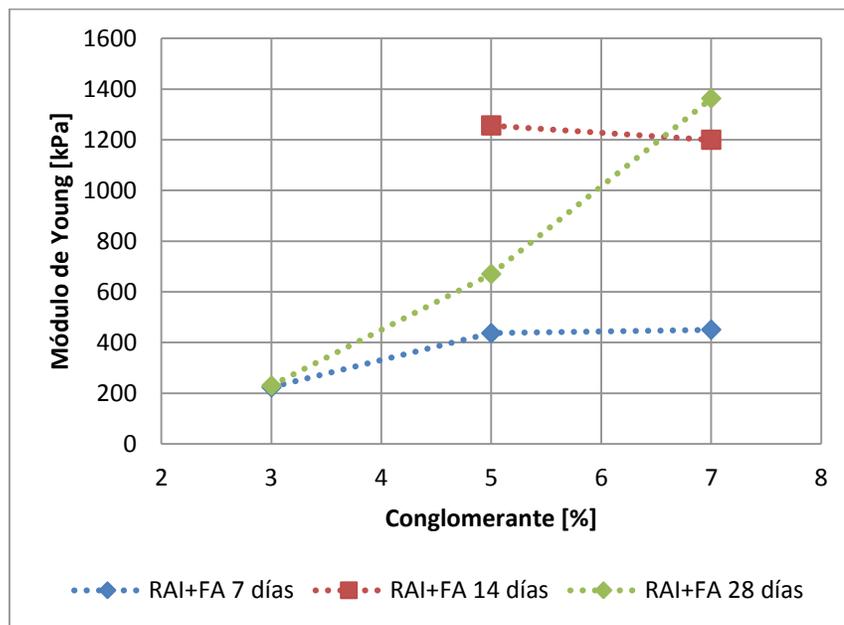


Figura 4.61 Módulos de Young para RAI+FA a 7, 14 y 28 días de curado.

Es importante señalar que no se tiene información de la probeta de RAI+FA con 65% de concentración de sólidos, 3% de conglomerante y 14 días de curado, debido a que fue quebrada antes de ser llevada a la máquina de compresión. Por lo mismo no se puede apreciar completamente el comportamiento del módulo de Young para los 14 días de curado. Sin embargo, para las probetas con 7 y 28 días de curado es posible apreciar el comportamiento, que consecuentemente coincide con los módulos de Young calculados en la sección 4.9.1.2, pero con módulos de elasticidad menores. Claramente se aprecia que a

medida que aumenta el porcentaje de conglomerante, mayor es la constante de elasticidad, y que también aumenta con mayores tiempos de curado.

4.9.3.3. Modelación de UCS en función de la razón W/C

Tabla 4.14 Resultados de regresión no lineal para distintos días de curado de las muestras.

Cp[%]	Días de curado	K2	K1	R
65	7	1,56	1112	0,9965
65	14	1,75	3045	0,9978
65	28	1,37	2192	0,9986

Tabla 4.15 Resultados de nuevo ajuste con $K_2 = 1,56$

Cp[%]	Días de curado	K1	R
65	7	1114	0,9965
65	14	2136	0,9886
65	28	3296	0,9610

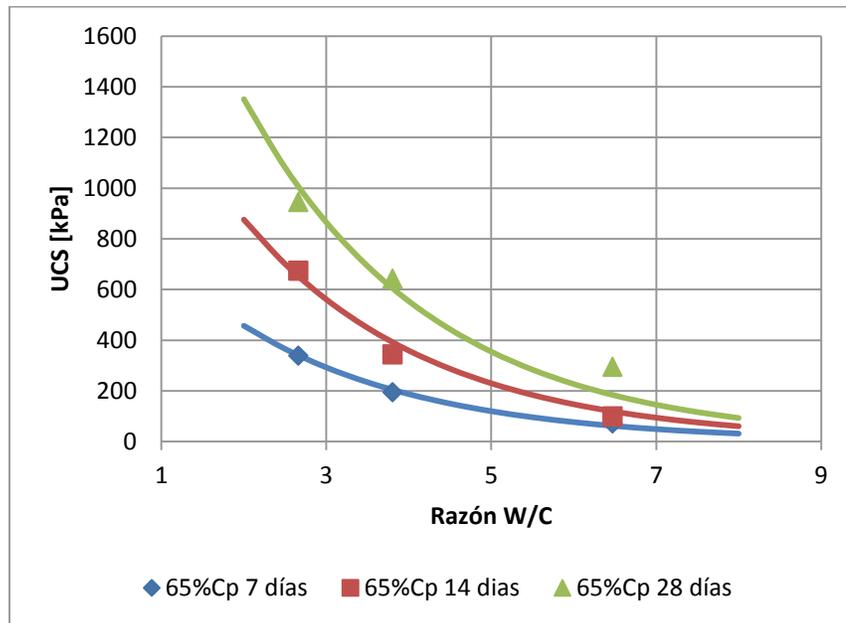


Figura 4.62 Resistencia vs W/C para RAI+FA con 65% de sólidos a 7, 14 y 28 días de curado.

Tal como se observó en la sección 4.9.1.3, las regresiones no lineales ajustan, considerando para este caso $K_2 = 1,56$, ya que los coeficientes de correlación están sobre el 96%. El valor de K_2 cambia en comparación a la utilizada en la sección 4.9.1.3 y se puede atribuir al aditivo agregado, debido a que no se incluyó ningún otro cambio en la mezcla utilizada.

Utilizar aditivos en la fabricación del CPB produce diferentes efectos. Entre ellos se encuentra una disminución de alrededor de un 20% del costo de fabricación, debido al reemplazo de una porción de cemento por una cantidad de aditivo en una razón 4:1. Otro efecto que tiene el agregar este aditivo es la influencia directa en el desarrollo de la resistencia del CPB endurecido, retardando el incremento de la resistencia para tiempos de curado de 7 días, pero que luego de 14 días se presenta un aumento en la resistencia para llegar a sobrepasar a la mezcla que no contiene aditivo, a los 28 días de curado.

Este último punto no debe ser dejado de lado, ya que se tiene que tener en cuenta que para faenas que necesitan que el relleno endurezca en períodos de tiempo cortos, no se podría utilizar este tipo de aditivo, independientemente de si se obtienen resistencias adecuadas pero para mayores tiempos de curado.

5. CINÉTICA DE LA RESISTENCIA

Los siguientes resultados muestran la comparación de las resistencias entre RAI y RAI+FA y entre RAI y RAI400 y cómo se comportan estas comparaciones en función del tiempo.

5.1. Comparación RAI y RAI+FA

En la Figura 5.1 se presentan los resultados de la comparación entre las resistencias obtenidas para las muestras de RAI con las muestras de RAI+FA.

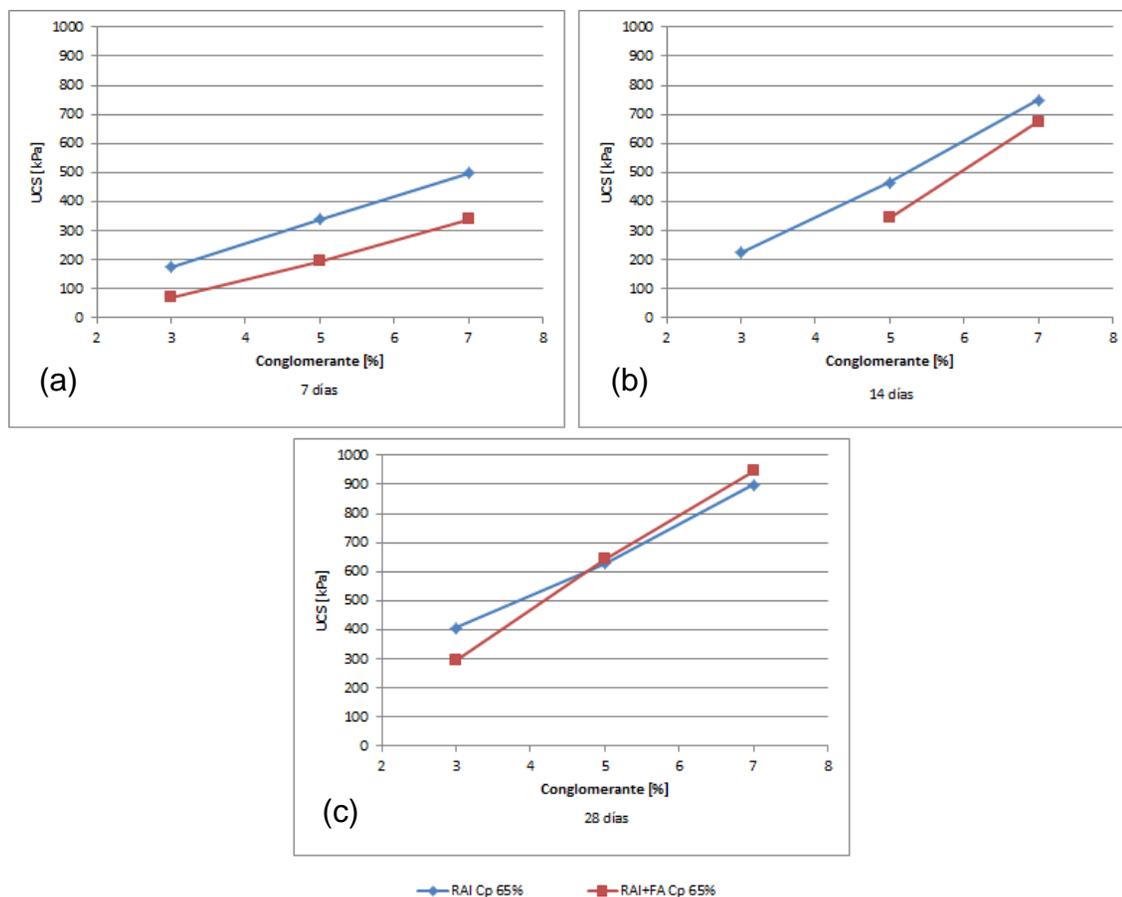


Figura 5.1 Comparación de UCS de RAI y RAI+FA con 65% de concentración de sólidos y a 7 (a), 14 (b) y 28 días (c) de curado.

En el gráfico (c) de la Figura 5.1 se puede observar que a los 28 días de curado la resistencia que alcanzan las muestras de RAI+FA son superiores a las de RAI, con 5% y 7% de conglomerante. Esto es un resultado positivo, debido que a pesar de su lento desarrollo de resistencia a los 7 y 14 días de curado, a los 28 días se alcanzan resistencias cercanas a 1 MPa.

5.2. Comparación RAI y RAI400

Los gráficos de las Figura 5.2 y la Figura 5.3 muestran los resultados de las comparaciones entre las UCS de las muestras RAI con las muestras RAI400.

Tabla 5.1 Comparación de diámetros característicos de RAI y RAI400

	RAI	RAI400
D80 (μm)	94,30	122,85

Tabla 5.2 Porcentaje de finos (%fino<20 μm) para muestra de RAI y RAI400

RAI	RAI400
45 %	38 %

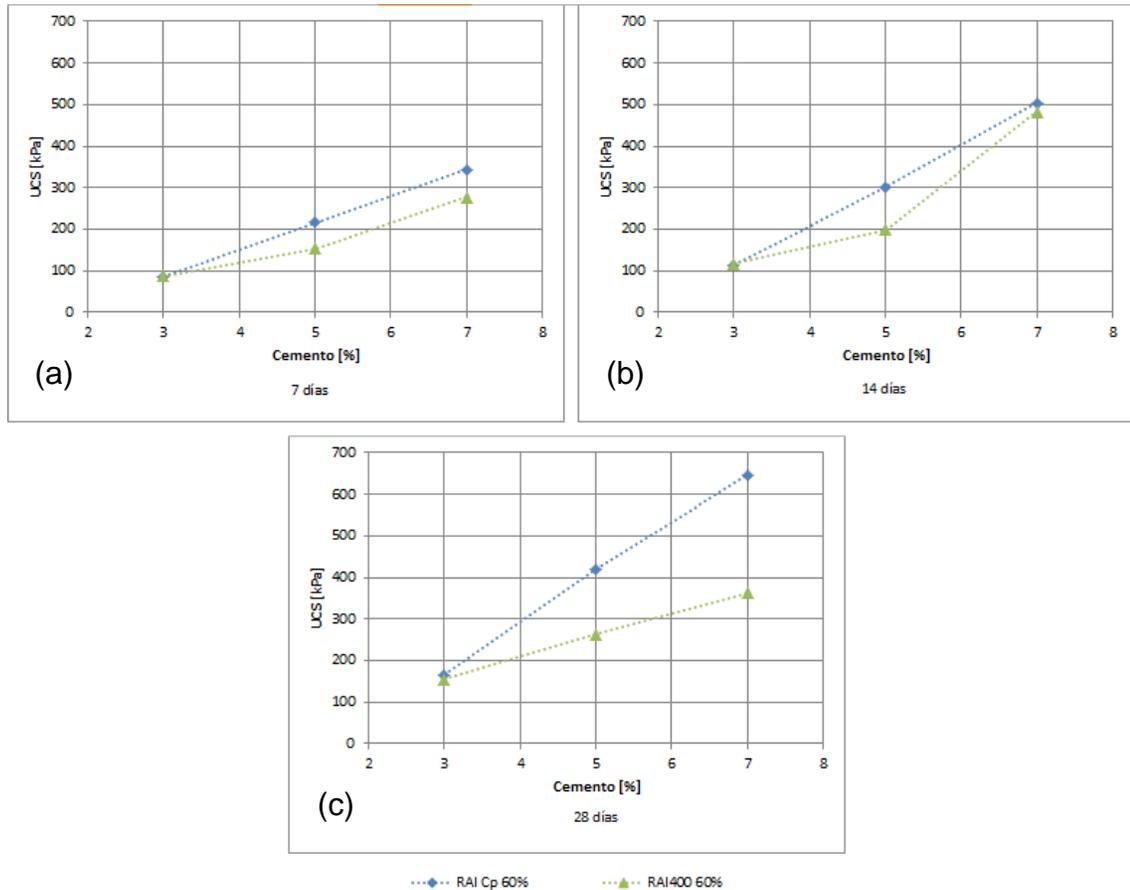


Figura 5.2 Comparación de UCS de RAI y RAI400 con 60% de concentración de sólidos y a 7 (a), 14 (b) y 28 días (c) de curado.

En la Figura 5.2 se puede observar el comportamiento característico que se presenta en los demás resultados, como en la Figura 5.1. Se observa que a medida que aumenta la concentración de cemento, mayor es la resistencia alcanzada por la probeta endurecida para la muestra de RAI400 a una concentración de 60% de sólidos. Sin embargo, es importante señalar que el gráfico (b) de la Figura 5.2 presenta un comportamiento que también se divisa vagamente en el gráfico (a); que corresponde a un aumento relativo de la resistencia desde 5% a 7% mayor que el aumento entre 3% y 5%, pero que a los 28 días de curado disminuye, mostrando un empobrecimiento de la mezcla

en términos mecánicos. Este tipo de comportamiento sugiere que el cambio en la granulometría no es conducente a resistencias adecuadas, en el caso de una pulpa de relave de cobre con agua industrial.

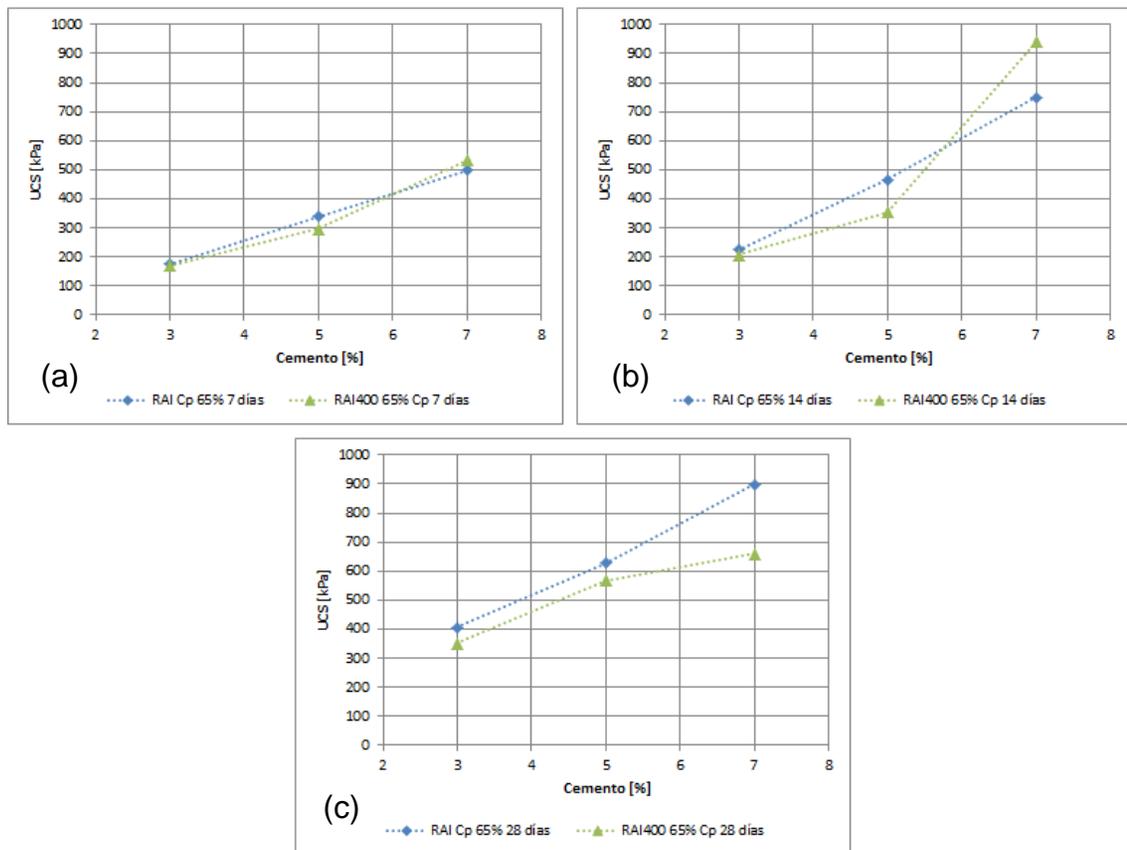


Figura 5.3 Comparación de UCS de RAI y RAI400 con 65% de concentración de sólidos y a 7 (a), 14 (b) y 28 días (c) de curado.

La Figura 5.3 muestra el mismo comportamiento que la Figura 5.2, pero en este caso es importante destacar que en el gráfico (b) la resistencia alcanzada por la muestra RAI400 con 65% de sólidos más 7% de cemento a los 14 días de curado, sobrepasa a la resistencia alcanzada por la muestra original RAI. Esto es importante, ya que a primera instancia se podría decir que la muestra RAI400 tiende a desarrollar mejores resistencias. Sin embargo, observando los

resultados del gráfico (c) se puede observar que la resistencia de RAI400 disminuye abruptamente a los 28 días de curado.

Este resultado es importante, ya que da cuenta del comportamiento inmediato de la muestra de pulpa de relave tamizada, que a pesar de tener un porcentaje de finos igual a 38%, que es óptimo según M. Fall et al [3], no supera los valores de resistencia final de la mezcla con RAI original, que son los que mostrarán la estabilidad de la mezcla in situ.

6. ANÁLISIS

Si se considera como criterio de diseño para el transporte hidráulico valores de tensión de fluencia inferiores a 200 [Pa] [Benchmarking JRI], para las mezclas generadas podemos indicar que:

- Las mezclas de RAI con Cp de 60% podrían transportarse hidráulicamente durante las primeras dos horas de generada la mezcla, con valores de tensión de fluencia inferiores a 100 [Pa].
- Las mezclas de RAI con Cp de 65% podrían transportarse hidráulicamente durante la primera hora de generada la mezcla, solo en los casos de 3 y 5% de cemento, ya que para 7% de cemento sobrepasa los 200 [Pa].
- Las mezclas de RAI con Cp de 70% presentan valores de tensión de fluencia superiores a 400 [Pa], por lo tanto su transporte hidráulico bajo nuestro criterio de diseño no es factible.

- En el caso de las mezclas que presentan tensiones de fluencia altas es necesario considerar otros sistemas de transporte, como por ejemplo camiones, correas transportadores o colado directo.

Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión simple indican que las mezclas de CPB con menor contenido de cemento (3%) y menor Cp (60%) presentan los menores valores de resistencia a la compresión simple (UCS). De la misma forma las muestras con mayor Cp (70%) y mayor contenido de cemento (7%) presentan los mayores valores de la UCS.

Se observa un incremento lineal en los valores de la UCS con el contenido de cemento para todos los casos estudiados de RAI y RAI+FA, en el rango de 3 a 7% de cemento. No así en los resultados de RAI400, donde se observan disminuciones de los valores de UCS para 7% de cemento a los 28 días de curado.

En el rango de tiempos de curado evaluados (7,14 y 28 días), se observa un incremento de la UCS con el tiempo de curado de alrededor de un 100% al día 28 para todas las probetas estudiadas.

En todos los casos estudiados se observa un comportamiento más frágil en las muestras con mayor contenido de cemento (7%) y más dúctil en los otros casos.

Los resultados obtenidos para muestras de RAI y RAI+FA se ajustan a la ecuación de Abrams en forma adecuada, con índices de correlación superior a 0,9 en todos los casos. Sin embargo, no se logra correlacionar las constantes involucradas en el modelo con los parámetros estudiados; contenido de cemento y porcentaje de sólidos.

Los resultados obtenidos para la muestra de RAI400 ajustan individualmente a la ecuación de Abrams, es decir, para cada tiempo de curado se tienen distintas variables de regresión (K_1 y K_2). Sin embargo, al momento de seleccionar una de estas variables individuales (K_2), como una variable global, no se obtienen los resultados como con RAI y RAI+FA, lo que llevaría a pensar que esta variable depende de la granulometría.

La utilización de este aditivo (FA) debe ser evaluado para cada caso de estudio in situ, donde deben ser considerados los tiempo del proceso de explotación y el efecto en los gastos operacionales de la mina, como también los requerimientos de resistencia para la estabilización. Esto es, ya que se obtuvieron bajas resistencias para períodos cortos de tiempo (7 y 14 días de curado), pero que a los 28 días se produce una mejora en resistencia respecto a los resultados sin aditivos.

Se observa que cambiar la granulometría de RAI para obtener un relave más grueso no produce un efecto positivo en el desarrollo de resistencia de las probetas de CPB, dado que solamente para RAI400 al 65% de concentración de sólidos junto a un 7% de cemento a los 7 y 14 días de curado se presenta una mejoría respecto a las probetas RAI, sin embargo, a los 28 días de curado la resistencia disminuye. Este resultado es negativo, debido a que se espera que la resistencia de la pasta de relaves cementados vaya aumentando con el tiempo, o que en el peor de los escenarios, se mantenga constante, pero que en ningún caso sea menor.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que la mezcla que cumple con las condiciones de transporte hidráulico y resistencia es la que se obtiene con un relave de 65% de sólidos y un 5% de cemento. Teniendo en consideración que los resultados obtenidos son válidos para la muestra RAI estudiada y podrían variar de acuerdo a la distribución granulométrica del relave y su composición mineralógica.

Debido a que este estudio es una introducción a lo que se puede realizar en los laboratorios nacionales, utilizando distintos tipos de relaves de cobre, se hacen las siguientes sugerencias para estudios futuros.

- Realizar estudios del comportamiento de la resistencia y fluencia de relaves de cobre modificando su granulometría.
- Utilizar distintos tipos de aditivos para identificar el óptimo para el relave en estudio, y usar distintas proporciones de aditivo para evaluar el desarrollo de resistencia a la compresión con mayores o menores cantidades de cemento.
- Contemplar mayor cantidad de probetas (duplicado o triplicado) para validar los resultados y minimizar los errores experimentales.
- Para establecer resistencias a largo plazo, considerar ensayos de compresión simple a mayores días de curado (56, 90 días o más).

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. Potvin, E. Thomas y A. Fourie, Handbook on Mine Fill, Australian Centre for Geomechanics, 2005.
- [2] M. Benzaazoua, M. Fall y T. Belem, «A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill,» *Minerals Engineering*, nº 17, pp. 141-152, 2004.
- [3] M. Fall, M. Benzaazoua y S. Ouellet, «Effect of tailings properties on paste backfill performance,» de *Proceedings of the 8th International Symposia on Mining with Backfill*, Beijing, China, 2004.
- [4] S. Sveinson, «Characterisation of Tailings for Paste Backfill System Design,» The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1999.
- [5] M. Masniyom, «Systematic Selection and Application of Backfill in Underground Mines,» Universidad Técnica de Freiberg, 2009.
- [6] M. Fall, M. Benzaazoua y E. G. Saa, «Mix proportioning of underground cemented tailings backfill,» *Tunneling and Underground Space Technology*, nº 23, pp. 80 - 90, 2008.
- [7] M. Fall, M. Benzaazoua y S. Ouellet, «Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill,» *Minerals Engineering*, nº 18, pp. 41 - 44, 2005.
- [8] M. Fall, T. Belem, S. Samb y M. Benzaazoua, «Experimental characterization of the stress-strain behaviour of cemented paste backfill in compression,» *Journal of Materials Science*, vol. 42, nº 11, pp. 3914-3922, 2007.
- [9] L. Gonzalez Cabrera, «Límites de consistencia,» 19 Febrero 2003. [En línea]. Available: <http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/mecanica4.htm>. [Último acceso: 21 10 2014].
- [10] R. Tomás, M. Cano, J. García-Barba, J. Santamarta, L. Hernández, J.

Rodriguez y R. Zamora, «Prácticas de Ingeniería del Terreno,» 2013.

- [11] Instituto Nacional de Normalización, *Mecánica de Suelos - Límites de Consistencia - Parte 1: Determinación del Límite Líquido (NCh 1517/1.Of79)*, Santiago, 1979.
- [12] A. Sebimoghaddam, *Rheological Yield Stress Measurement of Mine Paste Fill Material*, Motreal: McGill University, 2005.
- [13] E. Yilmaz, O. El Aatar, T. Belem, M. Benzaazoua y B. Bussièrre, «Effect of consolidation on the performance of cemented paste backfill,» de *Proceedings of the 21st Annual Underground Mine Support Conference*, Val d'Or, Quebec, 2006.
- [14] M. Benzaazoua, B. Bussièrre, M. Kongolo, J. McLaughlin y P. Marion, «Environmental desulphurization of four Canadian mine tailings using froth flotation,» *International Journal of mineral processing*, nº 60, pp. 57-74, 2000.
- [15] D. A. Abrams, *Design of Concrete Mixtures*, Chicago: Structural Materials Research Laboratory, 1919.
- [16] Instituto Nacional de Normalización, *Mecánica de Suelos - Límites de Consistencia - Parte 2: Determinación del Límite Plástico (NCh 1517/2.Of79)*, Santiago, 1979.
- [17] Ministerio de secretaría general de la presidencia, *Decreto 46: Establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas*, 2003.
- [18] W. Young Yang, W. Cao, T.-S. Chung y J. Morris, *Applied Numerical Methods Using Matlab*, New Jersey: Wiley Interscience, 2005.

9. ANEXO

9.1. Resultados de ensayos preliminares

Con las dosificaciones presentadas se realizaron 9 muestras en vasos de precipitado de policarbonato. Cada uno de ellos fue rotulado con el nombre de la muestra, la concentración de sólidos de la pulpa empleada, el porcentaje de cemento administrado y el número de vaso. Un 3% de cemento corresponde al vaso 1, 5% de cemento al vaso 2 y 7% de cemento al vaso 3.

Las muestras para el primer día de preparación se observan a continuación.



Figura 9.1 Muestras de CPB para reologías preliminares.

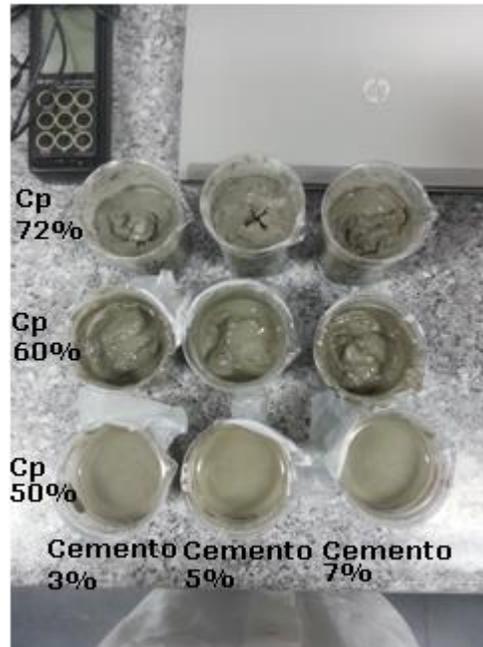


Figura 9.2 Muestras de CPB con diferentes consistencias luego de 3 horas.

En la Figura 9.2 se observa la diferencia que existe entre las muestras una vez transcurrido 3 horas desde la mezcla y las primeras mediciones. Cada fila corresponde a una concentración de sólidos distinta. La última fila son muestras con $C_p = 50\%$, la fila del medio corresponde a $C_p = 60\%$ y la primera es $C_p = 72\%$.

De la Figura 9.2 se puede apreciar una leve diferencia de tonalidades de color. Las mezclas de la primera fila son las más oscuras, después la siguen las de la segunda fila y las más claras son la de la última fila.

También se tiene que considerar que cada una de las columnas representa un porcentaje distinto de cemento administrado. Comenzando de izquierda a derecha, la primera columna tiene 3% de cemento, la segunda 5% y la última 7%.

En la Figura 9.3 se puede observar la consistencia de las mezclas con 50% de concentración de sólidos. De izquierda a derecha se tiene la mezcla con 3% de cemento, 5% de cemento y 7% de cemento.

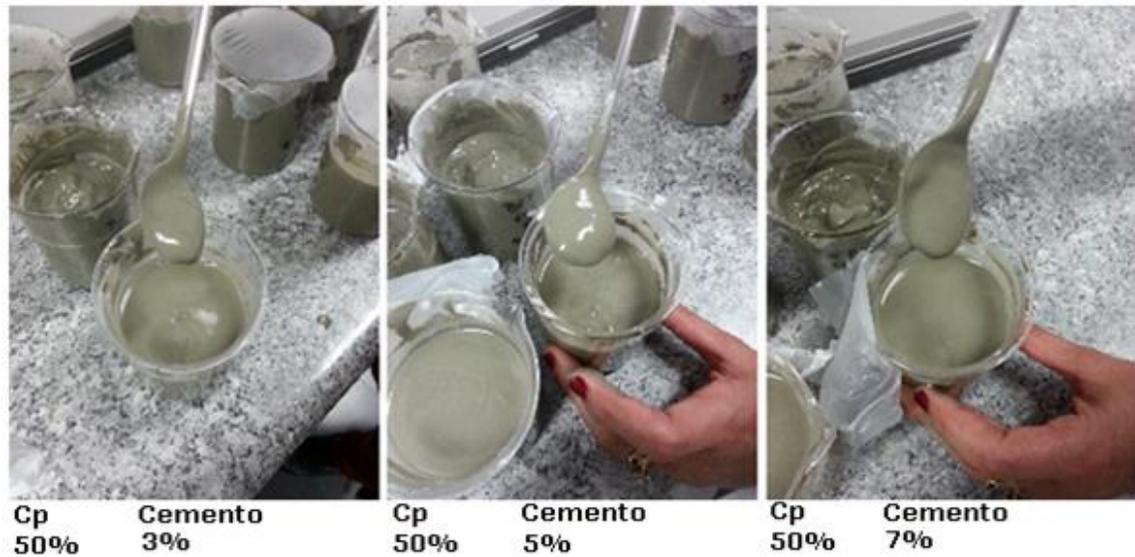


Figura 9.3 Consistencia de CPB con 50% de concentración de sólidos, luego de 3 horas.

En Figura 9.4 se puede observar la consistencia que tienen las mezclas con 60% de concentración de sólidos. De izquierda a derecha se tiene la mezcla con 3% de cemento, 5% de cemento y 7% de cemento.



Figura 9.4 Consistencia de CPB con 60% de concentración de sólidos, luego de 3 horas

Y por último en la Figura 9.5 se puede observar la consistencia que tienen las mezclas con una pulpa con 72% de concentración de sólidos. De izquierda a derecha se tiene la mezcla con 3% de cemento, 5% de cemento y 7% de cemento.

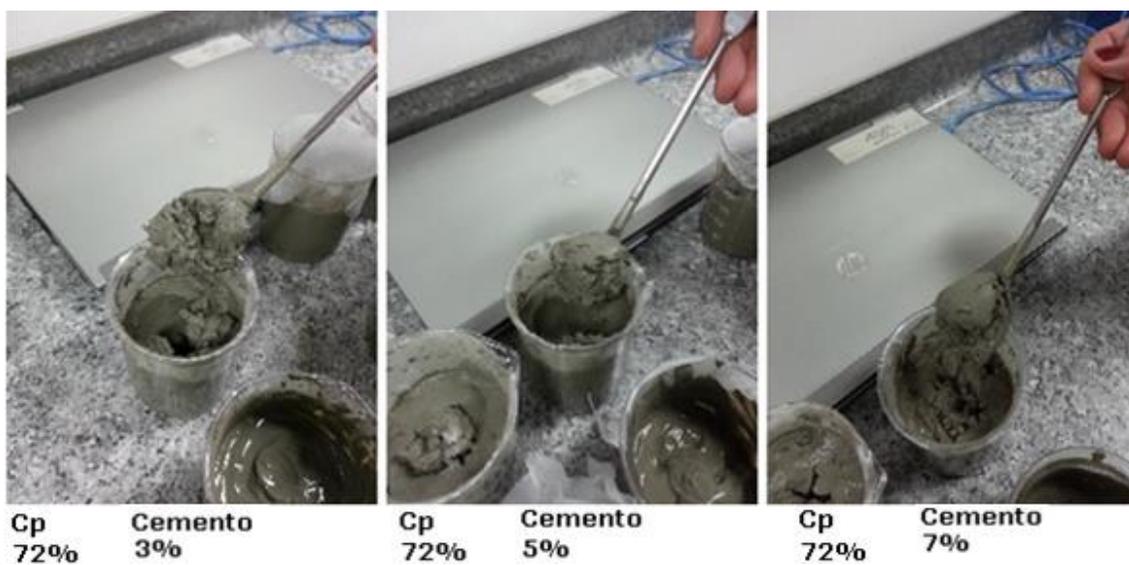


Figura 9.5 Consistencia de CPB con 72% de concentración de sólidos, luego de 3 horas

Transcurridas 18 horas, la consistencia de las mezclas de pastas de relave cementadas se puede observar en la Figura 9.6.

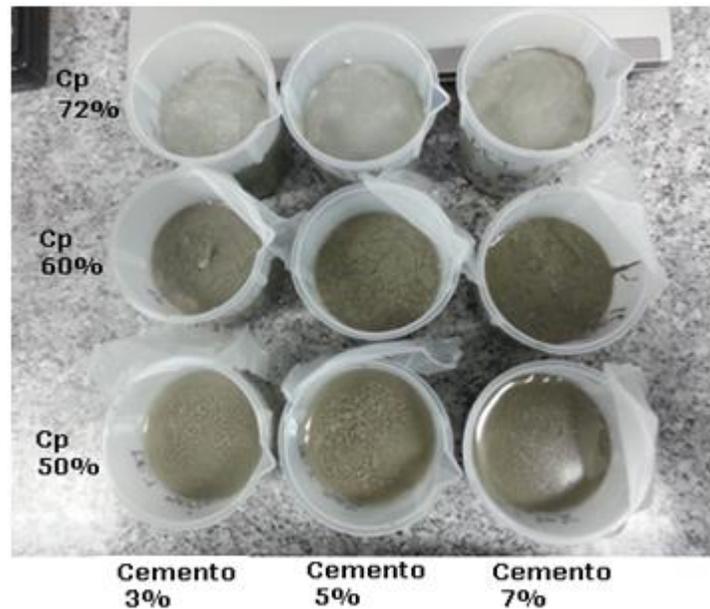


Figura 9.6 Muestras de CPB con diferentes consistencias luego de 18 horas.

Las primeras mezclas en endurecer son las que contienen una concentración de sólidos de 72% de pulpa de relave. En este caso se puede apreciar que adquieren un color mucho más similar a la de los hormigones endurecidos. Las mezclas con un 60% de concentración de sólidos adquieren un color más oscuro y después las siguen las que poseen un 50% de concentración de sólidos, con una tonalidad levemente más clara.



Figura 9.7 Consistencia de CPB con 50% de concentración de sólidos, luego de 18 horas.

En la Figura 9.7 se puede observar que la consistencia de las mezclas que contienen un 50% de concentración sólidos de la pulpa cambia respecto a la de las 3 horas de la Figura 9.3. Teniendo una consistencia y color similar a la de 60% de concentración de sólidos a 3 horas de la Figura 9.4.

En la Figura 9.8 se puede apreciar la diferencia en la consistencia de las mezclas con 60% de concentración de sólidos de pulpa de relave. Luego de las 18 horas se aprecia que las mezclas adquieren una consistencia más semejante a un sólido.

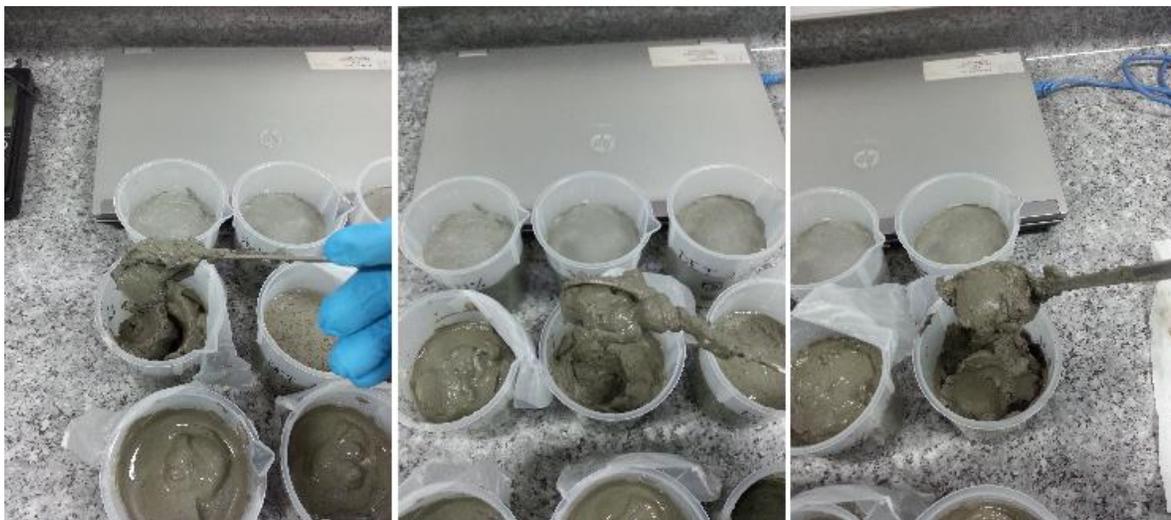


Figura 9.8 Consistencia de CPB con 60% de concentración de sólidos, luego de 18 horas.

En la Figura 9.9 se puede apreciar que las muestras luego de 48 horas presentan leves cambios a simple vista. La mayor diferencia que se observa es que las muestras que tienen mayor concentración de sólidos endurecen aún más, y muestran una coloración mucho más pálida. En cambio para las concentraciones de 50% y 60% no se presenta un mayor cambio en el color.



Figura 9.9 Muestras de CPB con diferentes consistencias luego de 48 horas.

La Figura 9.10 muestra la consistencia que tienen las mezclas con un 50% de concentración de sólidos de pulpa de relave. La imagen más a la izquierda tiene 3% de cemento, la del centro tiene 5% de cemento y la última tiene 7% de cemento.



Figura 9.10 Consistencia de CPB con 50% de concentración de sólidos, luego de 18 horas.

La concentración de sólidos que tienen las muestras de la Figura 9.11 es de 60%. El contenido de cemento que contienen las mezclas sigue la misma secuencia que las imágenes anteriores.



Figura 9.11 Consistencia de CPB con 60% de concentración de sólidos, luego de 18 horas.

En el procedimiento empleado en estos ensayos preliminares, se considera que la muestra debe estar homogénea, por lo que con la ayuda de espátulas y cucharas se procede a homogeneizar la mezcla, incorporándola desde las orillas hacia el centro. Las mezclas con menor concentración de sólidos, presentan una pequeña sedimentación incluso al adicionarse el cemento, que se observa al presentar un pequeño porcentaje de agua sobrenadante. Al mezclar el semisólido con el agua sobrenadante, se disminuye la resistencia al movimiento de la mezcla.

Las mediciones de las tensiones de fluencia se pueden observar en los siguientes gráficos.

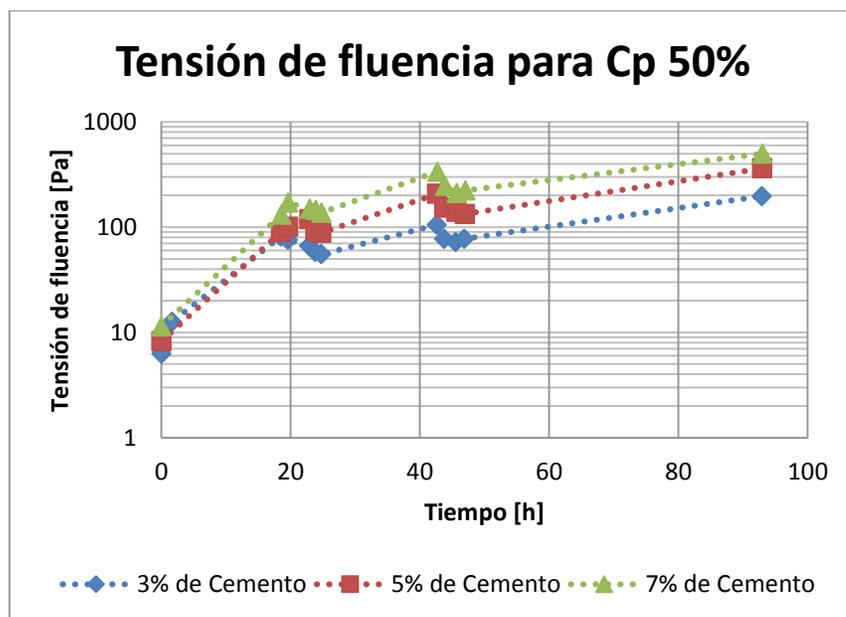


Figura 9.12 Gráfico de tensión de fluencia en función del tiempo, para 50% de concentración de sólidos.

Se puede observar que la tensión de fluencia de la mezcla disminuye con el paso de las horas en períodos cortos de tiempo (entre 1 y 2 horas), pero que dejando curar las muestras luego de un período de tiempo más prolongado se aprecia un aumento global de la tensión de fluencia.

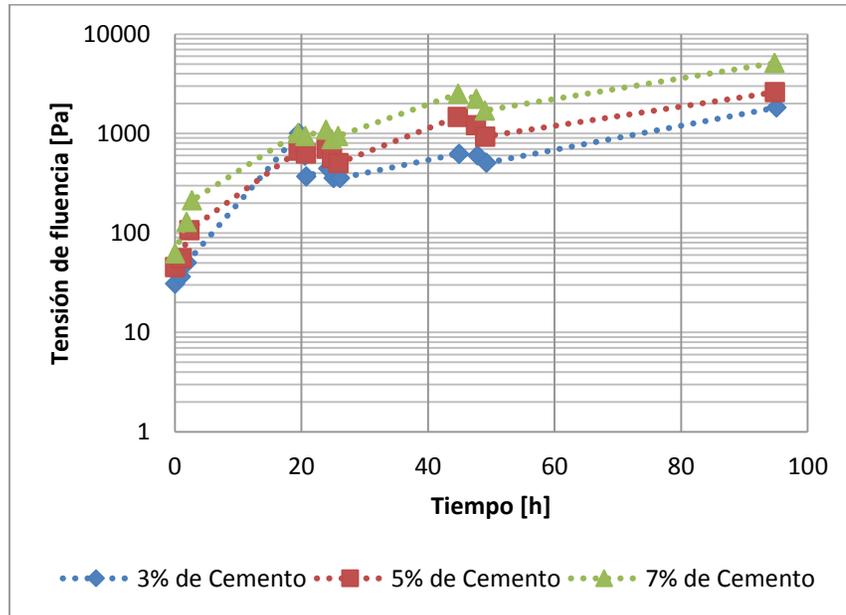


Figura 9.13 Gráfico de tensión de fluencia en función del tiempo, para 60% de concentración de sólidos

De la Figura 9.12 y Figura 9.13 se debe observar que los cúmulos de datos indican mediciones en períodos de 1 hora, las que corresponden a un día de trabajo. Cada día se aplica el procedimiento explicado más arriba.

En Figura 9.12 y Figura 9.13 se tiene que dar cuenta de que la primera medición luego de las 48 horas se hizo sin homogeneizar la mezcla antes de medir su tensión de fluencia. Después se hizo una homogeneización y se midió nuevamente, entregando valores drásticamente menores.

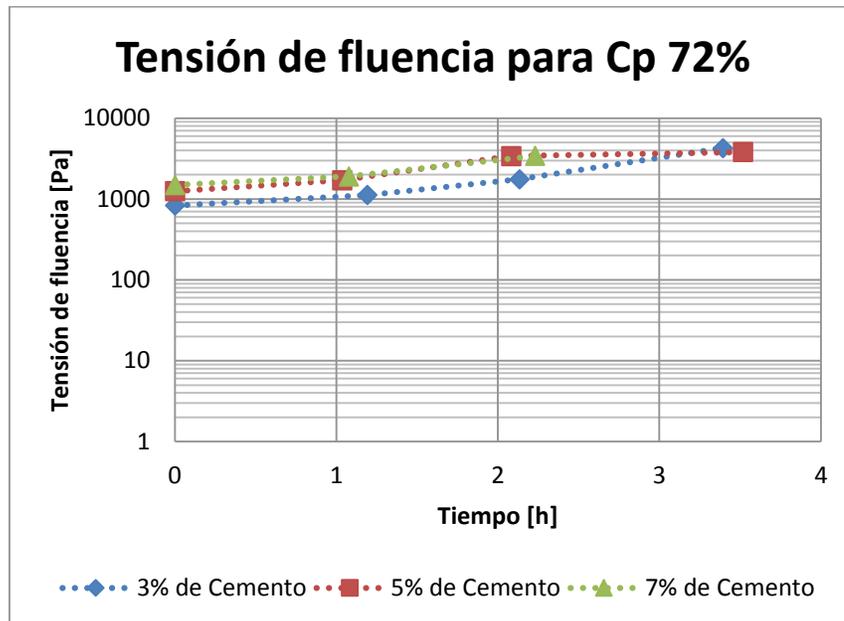


Figura 9.14 Gráfico de tensión de fluencia en función del tiempo, para 72% de concentración de sólidos

De este gráfico se puede observar que las tensiones de fluencia iniciales para una concentración de sólidos al 72% son sumamente altas. Esta tendencia está presente en las primeras horas de medición, pero a las 18 horas ya no fue posible seguir haciendo mediciones de tensiones.

De los primeros ensayos de reología para las pastas de relaves cementadas, se puede desprender que la homogeneización es un factor importante al momento de medir las tensiones de fluencia. Gracias a los gráficos de tensión de fluencia en función de la concentración de sólidos, como la Figura 4.4, se puede llegar a esa conclusión.

Debido a la leve sedimentación que se produce al dejar curar las muestras, se produce un aumento en la concentración de sólidos en las partes más bajas de los vasos de precipitado. Lo que se traduce en un aumento en la tensión de fluencia. Luego si se homogeniza la mezcla, se disminuiría la concentración de sólidos local, produciendo tensiones de fluencia menores.