



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**FACTIBILIDAD TECNICO ECONOMICA DE PRODUCCION DE  
CAL HIDRAULICA ALTA RESISTENCIA Y  
ALTA RENTETIVIDAD**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL DE MINAS

**KURT ARTHUR KANDORA MONTRONE**

PROFESOR GUÍA:  
SR. PATRICIO CAMPOS POBLETE

MIEMBROS DE LA COMISION:  
SR. JUAN BRUNO BENH THEUNE  
SR. ALDO CASALI BACELLI

SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE, 2008

## **CAL HUIDRAULICA ALTA RESISTENCIA Y ALTA RETENTIVIDAD**

La intensidad de uso en morteros de la cal hidráulica en Chile es baja si se compara con los países europeos. Esto se debe, en parte, a que la calidad de las cales producidas actualmente en Europa superan ampliamente la calidad de las cales nacionales en cuanto a su resistencia. El presente trabajo se desarrolló con el objetivo de diseñar un proceso industrial que fuere capaz de mejorar las características de resistencia. Para ello se desarrollaron tres etapas:

- Etapa de laboratorio: cuyos objetivos fueron establecer una línea base mediante la caracterización de las cales hidráulicas actualmente producidas en el país y definir el mineral mas adecuado existente en los yacimientos. Adicionalmente se caracterizaron las cenizas volantes actualmente utilizadas.
- Etapa planta piloto cuyos objetivos fueron calcinar el mineral seleccionado a diferentes temperaturas y tiempos de residencia con el fin de determinar los parámetros óptimos de calcinación, y determinar la caracterización física mecánica de la cal apagada en su estado puro o mezclada con puzolana, con diferentes grados de molienda.
- Etapa industrial cuyos objetivos fueron realizar la caracterización físico mecánica de diferentes mezclas de cal viva de producción actual con puzolanas de la IV región, y de diferentes mezclas de la cal viva obtenida en el horno diseñado para el proyecto, con diferentes mezclas de puzolanas

El proyecto concluye la factibilidad técnica económica de fabricar cal hidráulica de alta resistencia y alta retentividad cuyos valores están en el rango de 50 a 100 Kg/cm<sup>2</sup> y 75-90% respectivamente. Para ello se requerirá producir cal viva con alto grado de clinkerización que deberá apagarse y mezclarse con cenizas volantes y puzolanas en una proporción aproximada de 50, 25 y 25% respectivamente. El horno construido especialmente para el proyecto es adecuado para realizar la calcinación requerida, observándose la formación de larnita, mineral fuertemente hidráulico.

Será indispensable desarrollar un sistema de Control de Calidad de todo proceso, incluyendo mina, horno y planta que asegure la homogeneidad y calidad del producto.

El valor presente de los flujos del proyecto mostraron un VAN de 2 MUSD y una TIR de 48%.

## ABSTRACT

The intensity of use in mortars of the hydraulic lime in Chile is low if it is compared with the European countries. This owes to itself, partly, that the quality of you penetrate produced nowadays in Europe they overcome widely the quality of the national limes as for his resistance. The present work developed with the aim(lens) to design an industrial process that will be capable of improving the characteristics of resistance. For it three stages developed:

- Laborator stage: whose aims were to establish a line it bases by means of the characterization of the hydraulic limes nowadays produced in the country and to define the mineral mas suitably existing in the deposits. Additional the flying ashes were characterized nowadays used.
- Stage there plants pilot whose aims were to calcine the mineral selected to different temperatures and times of residence in order to determine the ideal parameters of calcination, and to determine the physical mechanical characterization of the lime extinguished in his condition pure or mixed with puzolana, with different degrees of grinding. ·
- Industrial Stage which aims were the characterization realized physically mechanics of different mixtures of alive lime of current production with puzolanas of the region IV, and of different mixtures of the alive lime obtained in the oven designed for the project, with different mixtures of puzolanas

The project concludes the technical economic feasibility of makes hydraulic lime of high resistance and discharge retentividad whose values are in the range from 50 to 100 Kg./cm<sup>2</sup> and 75-90 % respectively. For it it will be needed to produce alive lime with high degree of clinkerización that will have to go out and to be mixed by flying ashes and puzolanas in an approximate proportion of 50, 25 and 25 % respectively. The oven constructed specially for the project is adapted to realize the needed(asked) calcination, the formation being observed of larnita, strongly hydraulic mineral.

It will be indispensable to develop a system of Quality control of any process, including mine, oven and plant that assures the homogeneity and quality of the product.

The present value of the flows of the project they proved to be one they go of 2 MUSD and a TIR of 48 %.

**AGRADECIMIENTO**

**A TERESA Y KURT**

**A BEATRIZ**

**A LA SOFI Y AL KU**

1.-	INTRODUCCIÓN.	9
1.1.-	IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA.	10
1.2.-	PROYECTO CHAR 2.	11
1.2.1.-	Fase 1: Muestreo de los yacimientos.	13
1.2.2.-	Fase 2: Caracterización de la Cal hidráulica de Producción actual.	13
1.2.3.-	Fase 3: Calcinación en horno estático y actividad puzolanas: Pruebas en laboratorio.	14
1.2.4.-	Fase 4: Calcinación en horno horizontal Polysius: Pruebas en Planta piloto.	14
1.2.5.-	Fase 5: Calcinación en horno Vertical Industrial Construido para el proyecto.	14
1.2.6.-	Fase 6: Producción a escala industrial de Char 2 en planta de procesamiento de cales.	14
1.2.7.-	Fase 7: Caracterización físico-mecánica de Char 2 obtenida.	14
2.-	PROYECTO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.	15
2.1.-	IDENTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO.	15
2.1.1.-	Objetivos Técnicos.	16
2.1.2.-	Especificación de la Innovación Tecnológica.	17
2.1.3.-	Fundamentación de la Ejecución del Proyecto.	19
2.2.-	COSTOS DEL PROYECTO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.	26
2.2.1.-	Personal de Investigación.	27
2.2.2.-	Personal de Apoyo.	27
2.2.3.-	Servicios, Materiales y otros.	28
2.2.4.-	Uso de Bienes de Capital.	28
2.2.5.-	Adquisición de Bienes de Capital	29
3.-	METODOLOGIA Y PLAN DE TRABAJO.	30
3.1.-	METODOLOGÍA.	30
3.1.1.-	Etapa de laboratorio.	30
3.1.2.-	Etapa planta piloto	30
3.1.3.-	Etapa planta industrial	31
3.2.-	METODOLOGIA DE ANALISIS Y ENSAYES.	31
3.2.1.-	Caracterización físico-mecánica.	32
3.2.2.-	Caracterización química.	32
4.-	DESARROLLO DEL PROYECTO.	33
4.1.-	ETAPA DE LABORATORIO	33
4.1.1.-	Caracterización de Cales actuales en el mercado nacional.	33
4.1.2.-	Obtención de mineral óptimo para la fabricación de Char 2.	35
4.1.3.-	Calcinación a escala de laboratorio de los minerales seleccionados.	43
4.1.4.-	Caracterización del la cal viva calcinada a escala de laboratorio.	43
4.1.5.-	Determinación de la mezcla óptima de cal viva con componentes puzolánicos.	44
4.2.-	ETAPA PILOTO.	44
4.2.1.-	Determinación del mineral óptimo para ser sometido a calcinación en horno horizontal Polysius.	44
4.2.2.-	Calcinación en horno horizontal Polysius del mineral seleccionado.	45
4.2.3.-	Caracterización Físico-Mecánica de la Cal Hidráulica de la calcinación.	45
4.3.-	ETAPA INDUSTRIAL.	46
4.3.1.-	Definición de los parámetros óptimos de calcinación en horno vertical industrial.	46
4.3.2.-	Calcinación en horno vertical experimental.	46
4.3.3.-	Procesamiento en planta de la cal viva obtenida en la calcinación.	46
5.-	RESULTADOS.	49
5.1.-	ETAPA DE LABORATORIO.	49
5.1.1.-	Muestra de Materias Primas.	49
5.1.2.-	Análisis y ensayos	49
5.1.3.-	Comportamiento Térmico.	52
5.1.4.-	Tiempo de fraguado (cenizas volantes).	53
5.1.5.-	Índice de puzonalidad (Cenizas Volantes).	54

5.1.6.-	<i>Reactividad Potencial (cenizas volantes).</i>	54
5.2.-	ETAPA PILOTO.	55
5.2.1.-	<i>Muestra Para fase Piloto.</i>	55
5.2.2.-	<i>Análisis y ensayos.</i>	56
5.2.3.-	<i>Calcinación en planta piloto.</i>	57
5.2.4.-	<i>Preparación de la cal hidráulica.</i>	60
5.2.5.-	<i>Propiedades Físico-Mecánicas de Cal Hidráulica (de planta piloto).</i>	60
5.3.-	ETAPA PLANTA INDUSTRIAL.	62
5.3.1.-	<i>Materiales producidos en Planta CPCAL.</i>	62
6.-	IMPACTO ECONOMICO DEL PROYECTO PRODUCTIVO.	65
6.1.-	RESULTADOS DEL PROYECTO.	66
6.1.1.-	<i>Beneficios Económicos.</i>	66
6.1.2.-	<i>Beneficios de Calidad y Costos para las construcciones habitacionales industriales.</i>	66
6.2.-	EVALUACIÓN ECONÓMICA.	67
6.3.-	ANTECEDENTES DEL MERCADO	68
6.4.-	ESTIMACIÓN DE PRECIOS.	70
6.5.-	COMERCIALIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN.	70
6.6.-	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA	71
6.7.-	RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN.	73
6.8.-	CAPITAL DE TRABAJO.	73
6.9.-	PRODUCCIÓN.	73
6.10.-	COSTOS	74
6.11.-	FLUJO DE CAJA	75
6.12.-	BENEFICIOS ESPERADOS.	75
6.12.1.-	<i>Beneficios Económicos</i>	75
6.12.2.-	<i>Beneficios de calidad y costo para las construcciones habitacionales e industriales.</i>	76
7.-	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.	77
7.1.-	ETAPA DE LABORATORIO: DEL ESTUDIO DE LA CAL HIDRÁULICA DE PRODUCCIÓN ACTUAL.	77
7.1.1.-	<i>Resistencia a la compresión.</i>	77
7.1.2.-	<i>Retentividad.</i>	77
7.1.3.-	<i>Superficie específica.</i>	77
7.2.-	ETAPA PILOTO: DE LAS PRUEBAS DE CALCINACIÓN EN HORNO HORIZONTAL POLYSIUS DE IDIEM.	78
7.2.1.-	<i>Aptitud de mineral.</i>	78
7.2.2.-	<i>Formación de compuestos cementicios.</i>	78
7.2.3.-	<i>Propiedades físico-mecánicas de cal hidráulica.</i>	78
7.3.-	FASE INDUSTRIAL: DE LAS PRUEBAS DE CALCINACIÓN EN HORNO VERTICAL N°3 CONSTRUIDO ESPECIALMENTE PARA EL PROYECTO.	79
7.3.1.-	<i>Temperatura de calcinación</i>	79
7.4.-	FASE INDUSTRIAL: DE LA PRODUCCIÓN DE CAL HIDRÁULICA EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE CALES CPCAL.	80
7.4.1.-	<i>Resultados físico-mecánicos.</i>	81
7.4.2.-	<i>Del agregado de productos puzolánicos.</i>	81
7.5.-	CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO.	82
7.5.1.-	<i>Cal hidráulica de alta resistencia y alta retentividad, Char 2.</i>	82
7.5.2.-	<i>Mineral y puzolana para cal hidráulica de alta resistencia y alta retentividad.</i>	82
7.5.3.-	<i>Hornos de calcinación vertical N°3.</i>	83
7.5.4.-	<i>Planta de procesamiento de cales</i>	83
	BIBLIOGRAFÍA	84
	ANEXO	89
	ANEXO N° 1 : GRÁFICOS Y TABLAS FASE LABORATORIO	90
	ANEXO N° 2 : GRÁFICOS Y TABLAS FASE PILOTO E INDUSTRIAL	102
	ANEXO N° 3 : TECNOLOGÍA DEL ESTUCO PARA PANELES ESTRUCTURALES.	122

ANEXO N° 4 : INCIDENCIA DEL COSTO DEL MORTERO EN LAS VIVIENDAS ECONÓMICAS. _____	135
ANEXO N° 5 : INTRODUCCIÓN A LOS CEMENTOS TIPO POR TLAND. _____	142
ANEXO N° 6 : DOSIFICACIONES PARA MORTEROS _____	153

## **Índice de Tablas e Ilustraciones**

<i>Tabla 1: Dosificaciones Morteros.</i> _____	21
<i>Tabla 2: Dosificaciones de Morteros Con Cal</i> _____	23
<i>Ilustración 1: Aumento de la Retentividad</i> _____	24
<i>Tabla 3: Determinación de la dosis de agua y aire de un mortero</i> _____	25
<i>Tabla 4: Costos Proyecto de Investigación y Desarrollo</i> _____	26
<i>Tabla 5: Costos Personal de Investigación.</i> _____	27
<i>Tabla 6: Personal de Apoyo</i> _____	27
<i>Tabla 7: Servicios Materiales y Otros.</i> _____	28
<i>Tabla 8: Uso de Bienes de Capital.</i> _____	28
<i>Tabla 9: Adquisición de Bienes de Capital.</i> _____	29
<i>Tabla 10: Ensayos, Normas y Métodos.</i> _____	32
<i>Tabla 11: Ensayos Químicos</i> _____	32
<i>Tabla 12: Pertenencias Mineras.</i> _____	35
<i>Tabla 13: Tipología de Carbonatos de Calcio Presentes en Pertenencias.</i> _____	36
<i>Tabla 14: Muestras de Carbonato de Calcio</i> _____	36
<i>Tabla 15: Reservas Potenciales del Manto Superior</i> _____	38
<i>Tabla 16: Reservas Potenciales Pertenencia Cerro Blanco</i> _____	38
<i>Tabla 17: Reservas Totales.</i> _____	38
<i>Tabla 18: Caracterización Química Muestras.</i> _____	41
<i>Tabla 19: Caracterización Química Muestras.</i> _____	42
<i>Tabla 20: Caracterización Química Muestras Cerro Blanco</i> _____	42
<i>Tabla 21: Caracterización Química de Muestras</i> _____	43
<i>Tabla 22: Cantidad de Muestras</i> _____	43
<i>Tabla 23: Muestras Materias Primas</i> _____	49
<i>Tabla 24: Caracterización Química de muestras Seleccionadas</i> _____	50
<i>Tabla 25: Caracterización de Muestras</i> _____	50
<i>Tabla 26: Composición Mineralógica.</i> _____	51
<i>Tabla 27: Caracterización Físico Mecánica de Muestras</i> _____	51
<i>Tabla 28: Caracterización Físico Mecánica de Muestras</i> _____	52
<i>Tabla 29: Resultados de Calcinación</i> _____	53
<i>Tabla 30: Tiempos de Fraguado.</i> _____	53
<i>Tabla 31: Índice de Puzonalidad</i> _____	54
<i>Tabla 32: Reactividad Potencial</i> _____	54
<i>Tabla 33: Muestra Materias Primas Fase Calcinación</i> _____	55
<i>Tabla 34: Composición Química de Muestras de Laboratorio (MP3) y Planta Piloto (PP)</i> _____	56
<i>Tabla 35: Composición Mineralógica. De Conchuela MP3 por difracción de rayos X (DRX)</i> _____	56
<i>Tabla 36: Características Generales del Horno Rotativo Polysius-Labor</i> _____	57
<i>Tabla 37: Contenido de Cal libre en muestras procesadas en planta piloto</i> _____	58
<i>Tabla 38: Resumen de Ensayos Granulométricos</i> _____	59
<i>Tabla 39: Propiedades físico-mecánicas de cales hidráulicas producidas en planta piloto</i> _____	61
<i>Tabla 40 : Propiedades mecánicas de material escorificado con adición de Puzolana (M4CL)</i> _____	61
<i>Tabla 41: Propiedades físico-mecánicas de cales hidráulicas producidas en Planta CPCAL</i> _____	62
<i>Tabla 42: Contenido cal libre de primera serie de ensayos en Planta CPCAL.</i> _____	63
<i>Tabla 43: Propiedades mecánicas de cales hidráulicas producidas a escala semi-industrial en CPCAL (Edad: 7 días).</i> _____	63
<i>Tabla 44: Contenido Cal Libre en Muestras Producidas en Planta CPCAL (horno nuevo)</i> _____	64
<i>Tabla 45: Índices Proyecto</i> _____	66
<i>Tabla 46 Ventas de sacos de Cal Hidráulica CPCAL</i> _____	69
<i>Tabla 47: Ventas Anuales</i> _____	70

<i>Tabla 48: Capital de Trabajo</i>	73
<i>Tabla 49: Producción</i>	73
<i>Tabla 50: Ventas Anuales Proyecto</i>	73
<i>Tabla 51: Costos Operacionales Proyecto.</i>	74
<i>Tabla 52: Flujo Caja</i>	74
<i>Tabla 54: Flujo de Caja.</i>	75
<i>Tabla 55: Indicadores Financieros.</i>	75



## Introducción.

Actualmente Compañía Productora de Cal fabrica Cal Hidráulica que es un aglomerante usado en los morteros. El proceso consiste en mezclar Cal Viva ( $\text{CaO}$ ) con proporciones adecuadas de Puzolana de origen natural o artificial como las cenizas volantes. La línea de proceso consiste en las etapas de extracción de mineral, calcinación y procesamiento en planta de molienda y clasificación aero gravitacional mediante equipo tipo Gayco. Esta línea de proceso no fue diseñada para la fabricación de cal hidráulica y por tanto para mejorar la calidad de este producto debe ser modificada. Las características técnicas del actual producto están dentro del estándar de los productos similares fabricados en Chile. Si embargo la calidad de las cales hidráulicas fabricadas en el país tienen características que indican estar por debajo de los estándares de los países europeos y EEUU. Por esta razón se presenta una oportunidad comercial si se logra mejorar la calidad del producto a un costo razonable. Para ello se desarrolló y ejecutó el proyecto que se presenta cuyo objetivo es evaluar técnica y económicamente la factibilidad de producir cal hidráulica alta resistencia y alta retentividad mediante la adaptación y/o modificación de la actual línea de proceso. El proyecto se conceptualizó como un proyecto de innovación tecnológica que contempla las siguientes etapas:

- 1.- Proyecto de investigación y desarrollo que estudie la factibilidad técnica de adaptar las actuales líneas de proceso pertenecientes a CPCAL para la producción de Cal Hidráulica Alta Resistencia y Alta Retentividad.
- 2.- Evaluación económica del escalamiento industrial del proyecto.

### **1.1.- Identificación de la Empresa.**

El proyecto de desarrollo tecnológico “Cal Hidráulica Alta Resistencia y Alta Retentividad (Char 2)” fue desarrollado tanto en la ingeniería conceptual, básica y de detalle como en su ejecución bajo los lineamientos de Compañía Productora de Cal, CPCAL. Esta empresa inicia sus operaciones el año 1988 en la provincia de Coquimbo, IV Región, mediante una exhaustiva campaña de prospección minera, específicamente con el desarrollo de Reservas de minerales de Carbonato de Calcio tipo coquinas. Como resultado de las exploraciones geológicas realizadas, se constituyen propiedades mineras, por un total de 417 hectáreas, ubicadas en el sector de la Rinconada en la Comuna de Coquimbo, Provincia de Elqui, IV Región.

Con estos recursos CPCAL pone en marcha la ingeniería conceptual, básica y de detalle para la realización de una línea de proceso para la obtención de cales para la industria química y la minería. Para ello se construyen dos Horno de Calcinación y una Planta Procesadora de Cales.

La Planta de Calcinación, que opera con dos hornos verticales, se construyó a una distancia promedio de 1,5 Km. a los distintos yacimientos mineros. El Horno N° 1, tiene un diámetro de 2 metros y una altura de 6 metros; su descarga se hace por el movimiento de parrillas que vacían a un carro decauville que transporta el mineral calcinado a la tolva de cal viva. Con la experiencia obtenida durante los cuatro años de operación del horno N° 1, se construyó el Horno N° 2, que tiene 4 metros de diámetro y 3 metros de alto. El sistema de descarga es similar al Horno N° 1. Debido a las características muy especiales de los minerales que los hacen muy distintos a los utilizados en las operaciones industriales dentro y fuera de Chile, la evolución ha sido hacia hornos de mayor diámetro y menor altura.

La Planta de Procesamiento de Cal está instalada al borde de la Ruta 5 Norte en el Km.457, y dista 2,5 Km. de la Planta de Calcinación. Después de la calcinación el proceso continúa con la hidratación de la cal viva (CaO), la molienda de la cal apagada (Ca(OH)<sub>2</sub>) y la clasificación y concentración aero-gravitacional, terminando con el ensacado de los siguientes productos: cal viva, cal hidratada, cal para pintar, cal para curtiembre, cal química y cal hidráulica.

Los distintos productos se diferencian químicamente en los contenidos de: óxido de calcio (CaO), hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), silicatos y aluminatos de calcio y ferro aluminatos de calcio. Físicamente se diferencian en su distribución granulométrica. La capacidad de producción es de 50.000 bolsas mensuales equivalente a 1.250 toneladas por mes. Los productos son comercializados en todo el país, principalmente en las regiones IV, V, VI, VII, VIII, IX y Región Metropolitana.

Trabajan en las operaciones de la Planta Coquimbo, un total de 45 personas y en la Gerencia General, ubicada en Santiago, un total de 15 personas. En forma indirecta, en subcontratos de mantención, transporte y explotación de minas, trabajan 40 personas.

## **1.2.- Proyecto Char 2.**

El proyecto consiste en evaluar técnica y económicamente la optimización de las variables de la línea de proceso actual con el objetivo de producir Cal Hidráulica de Alta Resistencia y Alta Retentividad (Char 2).

La cal hidráulica es utilizada en la confección de todo tipo de mortero. Su intensidad de uso estará dada por las características de retentividad de agua y resistencia que posea. Actualmente en el país la cales fabricadas son de mediana retentividad y baja resistencia si la comparamos con las fabricadas en EEUU y en los países Europeos. Esto ha generado que en Chile, los morteros se fabriquen habitualmente mediante la mezcla de sólo cemento hidráulico y arena. Los morteros así

construidos no son apropiados para recubrir superficies de materiales de resistencia moderada como son la albañilería de ladrillos y bloques o los paneles estructurales. Tampoco resultan adecuados para la construcción de radieres y sobrelozas.

En este contexto es esperable que la práctica mencionada evolucione hacia lo que es habitual en países de mejor tecnología, en los cuales las técnicas consideran una alta intensidad de uso de cal hidráulica de alta resistencia y alta retentividad. Con ello se lograrían los siguientes beneficios:

- Emplear menores dosis de cemento en el mortero, con lo cual su grado de contracción hidráulica y su fisurabilidad disminuye.
- Graduar su resistencia de acuerdo a la que posee la superficie a recubrir.
- Obtener Morteros Compactos y por consecuencia impermeables.
- Bajar el costo de preparación del mortero y reducir drásticamente el desprendimiento de estucos de lozas y vigas.

Las variables técnicas principales utilizadas para producir Char 2 consideradas en el proyecto son las siguientes:

- 1) **Aumento en la cantidad y calidad de los componentes cementicios.** El aumento de los silicatos bicálcico y tricálcico producirán aumentos en la resistencia a la compresión simple tanto de mediano como de largo plazo. Además aumentos de aluminato tricálcico, y ferro aluminato tetracálcico también producirán aumentos en la resistencia a la compresión y resistencia al ataque de aguas ácidas como a los ciclos de hielo y deshielo.

2) **Aumento en la calidad y cantidad de los componentes puzolánicos.** La reacción físico-química entre cal hidratada y puzolana produce los mismos compuestos que la reacción del cemento hidráulico con agua. Es para ello necesario encontrar puzolanas con alto índice de actividad. Se realizó complementariamente un catastro de las puzolanas naturales y artificiales existentes en la tercera y cuarta región.

3) **Aumento de la fineza de todos los componentes de la cal hidráulica.** La velocidad de la reacción química del endurecimiento de un mortero será más rápida y completa en la medida que aumenta la fineza de sus componentes hidráulicos. Por otra parte el aumento de la fineza trae consigo un aumento en la retentividad de agua por efecto del fenómeno de tensión superficial. Para determinar la fineza se emplea el método de finura Blaine que mide la cantidad de superficie de un gramo de cal. Paralelamente se realizan análisis granulométricos con el objeto de validar una granulometría continua.

Para la realización del proyecto Char2 se consideraron las siguientes etapas conceptuales:

#### ***1.2.1.- Fase 1: Muestreo de los yacimientos.***

El objetivo de esta etapa es encontrar los minerales óptimos teóricos para lograr la calcinación-clinkerización adecuada en los hornos de calcinación dentro de las reservas que posee CPCAL.

#### ***1.2.2.- Fase 2: Caracterización de la Cal hidráulica de Producción actual.***

Se caracterizan las cales hidráulicas de producción actual desde el punto de vista de su composición química, mineralógica, resistencia a la compresión, retentividad y fineza Blaine con el objetivo de generar una línea base de mejora tecnológica y poder compararla con los resultados obtenidos del desarrollo tecnológico del proyecto.

***1.2.3.- Fase 3: Calcinación en horno estático y actividad puzolanas: Pruebas en laboratorio.***

Con el objeto de determinar el mineral más adecuado para la producción de cal hidráulica se estudió, a escala de laboratorio, el proceso de calcinación-clinkerización a diferentes temperaturas. Además se estudió la reacción cal hidratada-puzolana. Esto permitió definir la muestra de mineral para la etapa piloto y las dosificaciones óptimas de puzolana y ceniza volante.

***1.2.4.- Fase 4: Calcinación en horno horizontal Polysius: Pruebas en Planta piloto.***

Se realizaron una serie de ensayos con los minerales definidos en la Fase 3 en un horno Horizontal Polysius con el objeto de estudiar el proceso de calcinación-clinkerización y determinar los parámetros operacionales para una adecuada calcinación en horno vertical.

***1.2.5.- Fase 5: Calcinación en horno Vertical Industrial Construido para el proyecto.***

Con los parámetros operacionales definidos en la Fase 4 se realizaron tres “hornadas” de prueba a escala industrial obteniéndose cal viva altamente clinkerizada para producir Char 2.

***1.2.6.- Fase 6: Producción a escala industrial de Char 2 en planta de procesamiento de cales.***

La cal viva obtenida en la Fase 5 se procesó en la planta obteniendo diferentes mezclas de cal viva altamente clinkerizada con diversos tipos y dosificaciones de puzolana.

***1.2.7.- Fase 7: Caracterización físico-mecánica de Char 2 obtenida.***

Los productos obtenidos en la Fase 6 fueron caracterizados y comparados con la línea base establecida en la caracterización de la cal hidráulica de producción actual.

## **2.- PROYECTO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.**

### **2.1.- Identificación y planteamiento del proyecto.**

Compañía Productora de Cal, es propietaria de yacimientos de carbonato de calcio ubicados en el sector La Rinconada, comuna de Coquimbo, Provincia de Elqui, IV Región.

Las reservas potenciales estimadas alcanzan a 62 millones de toneladas métricas.

El producto principal es la cal hidráulica, que es un aglomerante utilizado para la construcción de viviendas en morteros de pega, junta y revestimiento con ventajas de calidad y costo respecto a aquellos que usan sólo cemento hidráulico como aglomerante.

La práctica de construir con cal hidráulica está difundida en todo el mundo, en especial en los países europeos cuya producción conjunta se estima en 10 millones de toneladas al año.

Las principales razones de su uso son las siguientes:

- La cal hidráulica imparte a los morteros de estuco y de pega, cualidades de plasticidad, retentividad y trabajabilidad que representan una mejora en su calidad.
- La cal hidráulica, debido a que su proceso de fabricación utiliza menor energía, es un aglomerante de menor costo que el cemento, lo que significa una gran posibilidad de bajar el costo en la construcción. En el anexo N°4 se muestra el impacto en costo que puede tener el uso intensivo de Char 2.
- La cal hidráulica debido a que su proceso de fabricación utiliza menor energía de combustión, es un producto ecológicamente más apto que el cemento y por lo tanto la tendencia en nuestro país y en el mundo será a su mayor utilización.

En la medida que se logra mejorar la calidad del producto en términos de su resistencia y retentividad, la cual esta dada fundamentalmente en función del grado de clinkerización que se logra en los hornos y el grado de molienda que se logra en el proceso en planta se obtendrá una mejora cualitativa que, por un lado permitirá mejorar la calidad de los morteros y por otro permitirá disminuir su costo.

### ***2.1.1.- Objetivos Técnicos.***

El objetivo técnico es “Desarrollar un proceso productivo destinado a producir Cal Hidráulica de Alta Resistencia y Alta Retentividad”.

El desarrollo de la industria del cemento hidráulico en los últimos 50 años ha tenido como objetivo preponderante aumentar su resistencia a la compresión y flexo tracción. El logro de este objetivo, sin embargo, ha impedido mejorar otras características tales como: retentividad, trabajabilidad, menor fisurabilidad y menor retracción hidráulica.

La solución para los problemas señalados es la mezcla en cantidades convenientes de cemento hidráulico con cal hidráulica que le imparte las cualidades de retentividad, trabajabilidad, menor fisurabilidad y menor retracción hidráulica.

Por otra parte, siendo la característica fundamental de ambos productos, cal hidráulica y cemento, su carácter aglomerante, no sería posible usar técnicamente proporciones significativas de cal hidráulica, y obtener los resultados señalados, si ésta no contribuyera también a la resistencia a la compresión y flexo tracción del mortero endurecido.

Las cales hidráulicas en nuestro país alcanzan resistencia a la compresión de 10-20 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, en tanto el cemento llega a 250 kg/cm<sup>2</sup>.



De ahí que resulte indispensable contar en nuestro país con una Cal Hidráulica de Alta Resistencia que optimice en forma global la calidad y el costo de los morteros para la industria de la construcción.

### ***2.1.2.- Especificación de la Innovación Tecnológica.***

Este proyecto ha sido conceptualizado como un proyecto de innovación tecnológica que consiste en la optimización de las variables principales en el proceso productivo que otorgarán resistencia a la compresión y flexo tracción al producto cal hidráulica y que se señalan más adelante. Con ella, será posible disponer de Cal Hidráulica de Alta Resistencia, que no existe actualmente en el país.

En los países europeos la cal hidráulica es un componente normal de los morteros. La norma alemana DIN 1060 especifica para la cal altamente hidráulica resistencia a la compresión de 50 y 150 kg/cm<sup>2</sup>, según el tipo. Por su parte la norma francesa NF P 15 310 especifica resistencia a la compresión a los 28 días de 60 y 100 kg/cm<sup>2</sup>, según su tipo. En la práctica norteamericana, la cal hidráulica es reemplazada parcialmente por el cemento de albañilería, que no se fábrica en nuestro país, debiendo cumplir la norma ASTM C91 78. La definición del cemento de albañilería según ella es: “es un cemento hidráulico para el uso de morteros de albañilería que contiene uno o más de los siguientes materiales : cemento Pórtland, cemento Pórtland de escoria de alto horno, cemento Pórtland puzolánico, cemento natural, cemento de escoria o cal hidráulica; y como adición usualmente contiene uno a más materiales tales como cal hidratada, caliza, tiza, conchas calcáreas, talco, escoria o arcilla preparados para este propósito”. La resistencia a la compresión a los 28 días debe ser de un mínimo de 62,1 kg/cm<sup>2</sup>.

El proyecto de investigación pretende alcanzar una resistencia a la compresión a los 28 días de 50 kg /cm<sup>2</sup> y una retentividad de 60%.

Las variables técnicas principales para aumentar la resistencia de la cal hidráulica fueron las siguientes:

- **Aumento en cantidad y calidad de los compuestos cementicios.**

Estos compuestos son el silicato bicálcico, el silicato tricálcico, aluminato tricálcico y ferro aluminato tetracálcico, y que son los que otorgan la resistencia a los cementos hidráulicos.

- **Aumento en la cantidad y calidad de componentes puzolánicos**

Históricamente este fue el proceso físico-químico entre cal hidratada y componentes puzolánicos, el que permitió todas las construcciones con aglomerantes desde el inicio de la civilización hasta el desarrollo del cemento Pórtland a fines del siglo XIX.

- **Aumento de la fineza o grado de molienda de todos los componentes de la cal hidráulica.**

La reacción química del endurecimiento es una reacción entre sólidos que será más rápida y completa a medida que aumente la fineza. La resistencia a la compresión será en la medida que la reacción química sea más completa. Con una mayor fineza se conseguirá adicionalmente una mayor expansión en autoclave, mayor plasticidad, aumento de la impermeabilidad, aumento de la resistencia al congelamiento y menor exudación. Se espera alcanzar valores de finura blaine en torno a los 8000 cm<sup>2</sup>/g.

En el anexo N°5 se incluye una introducción a los cementos tipo Pórtland y su relación con las calces hidráulicas.

Para lograr mejoras en estos tres variables técnicas se modificaran las siguientes variables del proceso productivo:

- Composición química y mineralógica de la caliza.
- Distribución y tamaño de las diferentes especies mineralógicas en la caliza.
- Granulometría del mineral cargado a los hornos de calcinación.
- Temperatura y duración del proceso de calcinación clinkerización.
- Apagado de la cal viva.
- Formación durante el proceso o agregado posterior de materiales puzolánicos con elevado índice de actividad.
- Granulometría final de la cal hidráulica.

### ***2.1.3.- Fundamentación de la Ejecución del Proyecto.***

En la práctica nacional e internacional de la construcción, los morteros de pega, junta y recubrimiento se dosifican para resistencias medias en torno a los  $85 \text{ kg/cm}^2$ , sobrepasando la resistencia de las unidades de albañilería, ladrillos artesanales, bloques de cemento, que alcanzan  $50 \text{ kg/cm}^2$  en el mejor de los casos.

Para este efecto se utilizan cemento de albañilería y cales hidráulicas, con lo cual además de alcanzar la resistencia indicada, se obtienen morteros con buena trabajabilidad, menor fisurabilidad y mayor impermeabilidad. Estas propiedades son especialmente importantes cuando las obras habitacionales están emplazadas en zonas lluviosas.

Por otro lado en Chile, no se produce ni existen los aglomerantes específicos de albañilería y menos aún cales hidráulicas con resistencias a la compresión superiores a  $20 \text{ kg/cm}^2$ , lo que limita en forma muy importante su utilización.

Los morteros deben cumplir varias condiciones cuando están en estado fresco y cuando se encuentran endurecidos. Entre ellas se pueden mencionar:

1.- El mortero en estado fresco debe presentar una consistencia suficiente como para mantenerse en su lugar sin deslizar, una vez colocado y una fluidez como para ser extendido con facilidad sobre la superficie que va a cubrir.

2.- El mortero en estado endurecido debe presentar:

- Una estabilidad volumétrica, es decir, que la contracción o dilatación sea la menor posible.
- Una resistencia similar a la resistencia del material de la superficie que cubre, pues si ésta fuera muy superior, la contracción hidráulica tendería a fracturar a la superficie final afectando la adherencia entre ambas, o bien la adherencia con las unidades de albañilería.
- Una durabilidad suficiente para resistir la penetración del agua, los agentes climáticos, especialmente los ciclos de hielo-deshielos, y los agentes químicos ya sea ambientales o de otro origen.
- El mayor o menor cumplimiento de estas características depende de la dosificación, la colocación y el curado del mortero. La dosificación del mortero puede cumplir las condiciones señaladas de la siguiente forma:
- Para disminuir las variaciones de volumen, la dosis de cemento debe ser la menor posible, compatible con el resto de las condiciones exigidas, o en su defecto aumentar la presencia de agua.
- La resistencia a la compresión del mortero para estucos debe disminuir gradualmente desde una resistencia similar a la superficie original, hasta la resistencia de la superficie que estará sometida a la acción de los agentes climáticos preferentemente.

- Para que un mortero sea durable debe ser compacto.

En Chile, las dosificaciones que cumplen una o varias de las condiciones señaladas, han sido establecidas a través de la práctica de la construcción, empleando morteros de cemento y arena, y con menor frecuencia mortero de cemento, cal y arena.

Un estudio realizado en las obras nacionales, indica que las proporciones empleadas de acuerdo a las especificaciones respectivas, oscilan en torno a los valores que se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 1: Dosificaciones Morteros.**

<b>Tipo de Estuco</b>	<b>Proporción Cemento/Arena en peso</b>
Morteros impermeables (estanques)	1/2
Mortero para estucos exteriores	1/3-1/4
Mortero para estucos interiores	1/5-1/6

Sin embargo el empleo de las proporciones indicadas para estas dosificaciones no permite cumplir adecuadamente los principios generales antes expuestos, pues, por tratarse de morteros constituidos por cemento y arena, se presentan los siguientes inconvenientes:

- Corresponden a mortero con dosis elevadas de cemento, superiores a  $300 \text{ kg/m}^3$ . Por este motivo, constituyen morteros de alta contracción y módulo de deformabilidad, en consecuencia de alto grado de fisurabilidad, lo que disminuye la calidad del mortero y aumenta considerablemente, 15 a 35 %, el costo del aglomerante del mortero.
- Conducen normalmente a resistencias superiores a  $300 \text{ kg/cm}^2$  a 28 días. Por este motivo no son apropiados para recubrir superficies de materiales con resistencia moderada, como son las correspondientes a albañilerías de ladrillo, o bajas como son las que presenten algún grado de alteración o fracturación, pues, es posible demostrar que con las características

medias de los materiales nacionales, y en particular el contenido fino de las arenas, un mortero de cemento: arena debe tener una dosis más rica en cemento que es la que corresponde a la proporción 1:2,5 en peso para que sea compacto.

Por estas razones, se estima que la práctica descrita debería ser modificada evolucionando hacia lo que es habitual en países de mejor tecnología, en los cuales las técnicas consideran el empleo de cal hidráulica, como material aportante de grano fino.

Estos morteros, se clasifican en una proporción aglomerante cemento más cal:arena de 1:4 en peso, variando la relación cemento: cal de acuerdo a los siguientes criterios. (Manual del mortero, Instituto Chileno del Cemento y Hormigón).

Tabla 2: Dosificaciones de Morteros Con Cal

Proporción Cemento:Cal(*)	Uso
1 : 0,10 a 0,20	Superficies con metal desplegado 1era capa: 0,10 ; 2da capa 0,20
1 : 0,25 a 0,50	Superficies duras y resistentes: hormigón, bloques
1 : 0,50 a 1,00	Superficies de resistencia median, porosas, albañilerías

(\*) Cal hidráulica con resistencia a la compresión igual a 20 kg/cm<sup>2</sup>.

En el anexo N°6 se muestran las dosificaciones de los morteros con adición de Char 2. La proporción de cal se fija en el valor más cercano al superior del rango indicado para cada proporción mientras más severo sea el ambiente al cual va a estar sometido el estuco, así como para la capa final del estuco. Con ello se logra:

- Emplear menores dosis de cemento en el mortero, con lo cual disminuye su grado de compresión hidráulica. Por otra parte, la adición de cal baja su módulo de deformabilidad, aspecto que combinado con el anterior tiende a disminuir su fisurabilidad.
- Graduar su resistencia de acuerdo a la que posee el material de la superficie a recubrir y adicionalmente, a las condiciones de exposición a que va a quedar sometido el estuco.
- Obtener morteros compactos, debido a que la alta finura de la cal hidráulica y la proporción en que se adiciona al cemento, permita rellenar totalmente los huecos del árido fino.
- Bajar el costo de preparación del mortero y reducir drásticamente el desprendimiento de estucos en las losas y vigas.

En relación con la retentividad de los morteros, estudios chilenos muestran una interesante relación de esta propiedad con la dosis de cal, tal como se ve en la figura N°4. Sin embargo, este antecedente debe considerarse sólo como una primera aproximación, en tanto no se disponga de un mayor número de ensayos que incluyan arenas y cales de diferentes características.

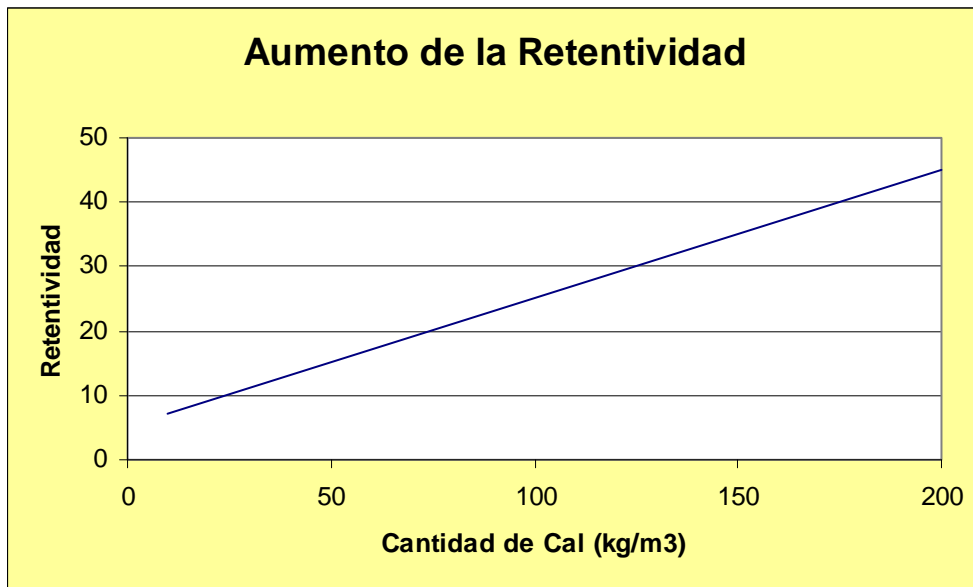


Ilustración 1: Aumento de la Retentividad

Para estudiar con mayor grado de detalle la relación entre la dosis de cal en el mortero y la retentividad de este se plantea el siguiente procedimiento que se describe a continuación:

### 1.- Definición del tipo de mortero.

Inicialmente se debe definir la proporción de cal que se va a utilizar en el mortero. Para ello se debe considerar que a mayor dosificación en cal la resistencia disminuye y por tanto la limitante de la dosis de cal es la resistencia requerida para el mortero diseñado.

Uno de los principales objetivos del uso de la cal es lograr una mayor consistencia del mortero y una mayor retentividad. En general, no es conveniente que la cantidad de cal exceda el peso del cemento contenido en el mortero, es decir, la relación cemento : cal en peso debe ser inferior a 1:1, debiendo limitarse a proporciones 1:0,25 a 1:0,75, que son apropiadas para la mayoría de los casos en que se debe adicionar cal al mortero que se utilizará.



## 2.- Determinación de la cantidad de agua.

La dosis de agua se establece en función de la trabajabilidad que se desea otorgar al mortero, utilizando la siguiente tabla como referencia para este objeto, en la que además se indica el aire mínimo atrapado.

Tabla 3: Determinación de la dosis de agua y aire de un mortero

% de Cal	MF=2,70			MF=2,20			H
	<25	25-50	>50	<25	25-50	>50	
Fluidez	Dosis de agua y aire(l/m <sup>3</sup> )						
Baja	280	285	290	310	315	320	30
Media	290	295	300	320	325	330	30
Alta	310	315	320	340	345	350	40
Muy Alta	330	335	340	360	365	370	40

MF = Módulo de finura de la arena

H = Contenido mínimo de aire para un mortero compacto.

## 3.- Determinación de la razón agua/cemento + cal.

La razón agua/cemento se determina mediante la fórmula de Bolomey:

$$R = K ( C/A-0.50).$$

R = razón agua/cemento.

K = coeficiente que depende del tipo de cemento, K=275 para cemento corriente.

C = peso de cemento/ unidad de volumen de mortero.

## 4.- Determinación de la dosis de cemento.

Se determina por el producto de la dosis de agua libre más el aire atrapado por la razón cemento/agua.

## 5.- Determinación de la dosis de cal.

Dado que la proporción de cal se establece a priori como porcentaje de la cantidad de cemento, la dosis de cal se determina multiplicando dicho porcentaje por la dosis establecida en el punto anterior.

## 6.- Determinación de la dosis de arena.

Determinadas las dosis de los restantes materiales en la forma señalada anteriormente, la dosis de arena se determina despejándola de la expresión correspondiente a la fórmula “Ecuación básica para la dosificación de morteros”.

$$\frac{C}{cp} + \frac{K}{pk} + \frac{F}{pf} + A + H = 1000 \quad \text{litros}$$

## 2.2.- Costos del Proyecto de Innovación Tecnológica.

El presupuesto del proyecto de investigación e innovación tecnológica desarrollado tuvo un costo de 1.357.85 UF calculado de acuerdo al siguiente itemizado general de gastos unitarios:

Tabla 4: Costos Proyecto de Investigación y Desarrollo

Partidas	Total Proyecto (UF)
Personal de Investigación	1.357,85
Personal de Apoyo	490,72
Servicios, Mat. Y Otros	1.878,77
Usos de Bienes de Capital	235,38
Adquisición de Bienes de Capital	496,65
<b>TOTAL</b>	<b>4.459,37</b>

Las distintas partidas generales se desglosan de acuerdo a las siguientes tablas:

### 2.2.1.- Personal de Investigación.

El equipo de trabajo que corresponde al personal de investigación que participó en el proyecto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5: Costos Personal de Investigación.

<b>Personal de Investigación</b>	<b>Total Proyecto (UF)</b>
Director Proyecto	541,29
Jefe Etapa de Laboratorio	686,66
Jefe Etapa Piloto	74,23
Asesor Técnico	55,68
<b>TOTAL</b>	<b>1.357,85</b>

### 2.2.2.- Personal de Apoyo.

Se considero el siguiente personal de apoyo en el desarrollo del proyecto.

Tabla 6: Personal de Apoyo

<b>Personal de Apoyo</b>	<b>Total Proyecto (UF)</b>
Asesor Tecnico	399,08
Mineros	91,64
<b>TOTAL</b>	<b>490,72</b>

### 2.2.3.- *Servicios, Materiales y otros.*

Entre los servicios y materiales necesarios para el desarrollo del proyecto se considera el itemizado que se indica en la siguiente tabla:

Tabla 7: Servicios Materiales y Otros.

Servicios, Mat. Y Otros	Total Proyecto (UF)
Caracterización	96,87
Flete muestra	21,88
Pasajes y Viaticos	13,42
Calcinación IDIEM	322,62
Extraccion Muestra	1,94
Ladrillos Refractarios	597,18
Cemento Refractario	149,13
Parrillas	136,87
Lines Ferrea	67,16
Termocuplas	27,13
Confeccion Horno	247,38
Visita Terreno	2,83
Carbon	85,54
Caract. Cal Alta Resistencia	108,80
<b>TOTAL</b>	<b>1.878,77</b>

### 2.2.4.- *Uso de Bienes de Capital.*

El uso de las instalaciones perteneciente a CPCAL fueron valoradas de acuerdo al siguiente itemizado:

Tabla 8:Uso de Bienes de Capital.

Usos de Bienes de Capital	Total Proyecto (UF)
Carro Decauville	1,86
Tolva	3,09
Camión Tolva	7,73
Planta Procesamiento	222,70
<b>TOTAL</b>	<b>235,38</b>

### **2.2.5.- Adquisición de Bienes de Capital**

Las adaptaciones básicas de la línea de proceso para la obtención de Char 2 a escala industrial consideraron las siguientes inversiones.

**Tabla 9:Adquisición de Bienes de Capital.**

<b>Adquisición de Bienes de Capital</b>	<b>Total Proyecto (UF)</b>
Chancador	226,29
Tolva	69,62
Correa Transportadora	200,74
<b>TOTAL</b>	<b>496,65</b>

Si bien las inversiones del proyecto consideran aspectos tecnológicos y adaptaciones preliminares de la línea de proceso no son suficientes para el escalamiento productivo. La evaluación económica final incluye estas inversiones.

### **3.- METODOLOGIA Y PLAN DE TRABAJO.**

#### **3.1.- METODOLOGÍA.**

Basándose en investigaciones previas realizadas por la Compañía y en el estudio detallado de la información disponible, se desarrolló una metodología de trabajo que incluye las siguientes etapas:

##### ***3.1.1.- Etapa de laboratorio.***

- 1.- Caracterización de la Cal Hidráulica existente en el mercado.
- 2.- Extracción en el yacimiento de muestras de tres tipos de mineral de acuerdo a su composición química y mineralógica.
- 3.- Calcinación en horno estático a escala de Laboratorio de las tres muestras de mineral tomadas.
- 4.- Caracterización química y mineralógica de los productos obtenidos de la calcinación de las tres muestras.
- 5.- Mezcla de minerales calcinados, previamente apagados y molidos, con componentes puzolánicos de diversas características para la obtención de distintos tipos de cales hidráulicas.
- 6.- Caracterización físico-mecánica de las distintas cales hidráulicas obtenidas.

##### ***3.1.2.- Etapa planta piloto***

De la etapa anterior se define la muestra más adecuada para someterla al proceso en planta piloto.

Las etapas en planta piloto son las siguientes:

- 7.- Calcinación en Horno Horizontal Polysius a diferentes temperaturas y tiempos de residencia de la muestra obtenida de acuerdo al punto anterior.
- 8.- Caracterización físico-mecánica de cales hidráulicas obtenidas en el punto anterior.

### ***3.1.3.- Etapa planta industrial***

En etapa de planta piloto se define los parámetros óptimos de calcinación para realizar calcinación a escala industrial en el Horno de Calcinación Vertical diseñado para el proyecto. Las etapas en planta industrial son:

9.- Calcinación masiva, de acuerdo a los parámetros definidos en la etapa de planta piloto, en Horno de Calcinación Vertical diseñado y construido para el proyecto.

10.- Tratamiento en Planta de Procesamiento de Cales de productos obtenidos de la calcinación y mezcla con compuestos puzolánicos de acuerdo a los resultados obtenidos en la etapa de laboratorio.

11.- Caracterización de las distintas compósitos de Cal Hidráulica obtenida de la etapa a escala industrial.

### **3.2.- METODOLOGIA DE ANALISIS Y ENSAYES.**

Los ensayos necesarios para caracterizar los productos obtenidos en las diferentes etapas, laboratorio, piloto e industrial se muestran en las siguientes tablas.

### 3.2.1.- Caracterización físico-mecánica.

En la siguiente tabla se muestran los ensayos físico-mecánico necesarios de aplicar en el desarrollo del proyecto. Se incluyen las Normas y Métodos definidos para la aplicación de estos ensayos.

Tabla 10: Ensayos, Normas y Métodos.

Ensayo	Norma o método
Finura	Tamizado ASTM
	Método Blaine
	Granulométrica Rayos X
Retentividad de agua	ASTM C-110, P 10
Plasticidad	Indices de ATTERBERG
Compresión 7-28 días	ASTM C141
	DIN (N°1060)
	AFNOR NF P15-312

### 3.2.2.- Caracterización química.

En la siguiente tabla se muestran los ensayos químicos necesarios de aplicar en el desarrollo del proyecto. Se incluyen las Normas y Métodos definidas para la aplicación de estos ensayos.

Tabla 11: Ensayos Químicos

Ensayo	Norma o método
Preparación de muestra	ASTM C50 o IRAM 1613
Perdida por Calcinación	ASTM C25
Residuo insoluble	ASTM C25 o IRAM 1613
SiO <sub>2</sub>	ASTM C25 o IRAM 1613
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ASTM C25 o IRAM 1613
CaO+MgO totales	ASTM C25 o IRAM 1613



## **4.- DESARROLLO DEL PROYECTO.**

El programa de trabajo se desarrolló de acuerdo a las etapas definidas en la metodología de trabajo y que se expone a continuación.

### **4.1.- Etapa de Laboratorio**

#### ***4.1.1.- Caracterización de Cales actuales en el mercado nacional.***

Se analizaron las dos cales hidráulicas fabricadas actualmente en Chile, CPCAL y Soprocal con el objeto de generar la línea base de comparación de las mejoras de calidad que se obtendrán con el proyecto.

Para la muestra de cal hidráulica de CPCAL se decidió muestrear 5.000 bolsas de cal hidráulica de la producción actual en curso a fin de representar adecuadamente la calidad actual del producto. Esta muestra representa el 25% de la producción de un mes completo.

Los análisis de la cal hidráulica de Soprocal consistieron en un compósito formado por el muestreo sobre 50 bolsas adquiridas en el comercio.

- ***Procedimiento del muestreo de la cal hidráulica.***

Para obtener la muestra desde cada bolsa de cal hidráulica de 25 kg, se usó un muestreador, que tiene forma de cono con el vértice filudo debido al corte diagonal al eje del cono, con un ángulo aproximadamente igual a la cuarta parte del ángulo en la cúspide.

Esta herramienta se introducía por uno de los costados del saco, perpendicularmente al eje de él. Luego se procedía a girarla dos o tres vueltas con un movimiento excéntrico con el fin de que la herramienta se llenara completamente.

El material extraído de cada saco, se guardaba en una bolsa plástica. Una vez recolectadas 120 muestras la bolsa era sellada. Cada bolsa se identificaba con el día y N° de muestras contenidas. Se logró muestrear toda la producción durante el lapso indicado. La muestra se denominó CH2.

La muestra de los sacos de Soprocal se obtuvo de la misma forma en los 50 sacos adquiridos para este efecto. La muestra se denominó CH1.

- ***Resultado del muestreo.***

Entre los resultados principales del muestreo de planta podemos considerar:

- Los sacos controlados alcanzaron a 3.693 bolsas. La muestra extraída de cada saco tuvo un peso promedio de 31 g Por lo tanto, se recolectó un total de 114,5 kg de muestra.
- El color de la Cal hidráulica no es uniforme, pasando desde el color marfil, similar al color de la cal hidráulica, al color gris similar al color del cemento.
- La densidad aparente de la Cal Hidráulica, cambia de acuerdo al color, es decir, cuando el material tiene mayor densidad, el color es gris, y cuando el color era blanco marfil, el saco tiene un volumen con material apreciablemente mayor.

La muestra fue sometida a los ensayos químicos, mineralógicos y físico-mecánicos.

La muestra de Soprocal fue sometida a los mismos tipos de análisis. La muestra recogidas muestran un color mucho más estable no encontrando diferencia apreciable de densidad.

#### 4.1.2.- Obtención de mineral óptimo para la fabricación de Char 2.

Se define como mineral óptimo aquel que tiene presencia de contenidos de arcilla y carbonato de calcio. Con ello se aumenta la probabilidad de obtención, durante el proceso de calcinación, de contenidos significativos de silicatos de calcio, los cuales entregaran al producto resistencia de mediano y largo plazo. Se han definido el rango de valores entre 10 y 30% de arcilla como los óptimos para el aumento de la resistencia.

Para la obtención del mineral óptimo para la producción de Char 2, se realizó un levantamiento de los yacimientos de propiedad de CPCAL en la cercanía de la planta de calcinación, que aseguran el abastecimiento de mineral. Los actuales yacimientos catrastados son:

Tabla 12: Pertenencias Mineras.

Nombre Mensura	N° de las Pertenencias	Área mensura hectárea
Cerro Blanco	16 al 25	100
Cris	1 al 25	58
Dafny	1 al 9	82
Karina	1 al 7	35
Elisa	1 al 20	100
Catalina	1 al 4	16
Don Luis	1 al 7	26
TOTAL		417

Todas las pertenencias están ubicadas en el Sector de la Rinconada en la Comuna de Coquimbo, Provincia de Elqui, IV Región.

Estos yacimientos corresponden a depositaciones calcáreas marinas de tipo coquinas consistentes en conchas de moluscos, de diferentes tamaños cementadas en una matriz compuesta de carbonato de calcio y minerales arcillosos.

En ciertas zonas del yacimiento, el mineral tiene como impurezas clastos de rocas granodioríticas de tamaño menor a 8 mm.

Estructuralmente el yacimiento corresponde a una formación tipo manto que tiene una potencia conocida de al menos 7 m, una inclinación de 2 a 5° al W y una dirección N-S.

En el caso más general, el yacimiento de carbonato de calcio está formado, de acuerdo a su profundidad, por tres tipos de material: Estos son:

**Tabla 13: Tipología de Carbonatos de Calcio Presentes en Pertenencias.**

<b>Tipo</b>	<b>Ley de CaCO<sub>3</sub></b>
Cristalizado	Mayor a 85%
Loza	Entre 65 y 85%
Caliche	Menor a 65%

Además se pueden encontrar dos materiales que corresponden a cristalizado-loza y loza-caliche, ubicados en las zonas de contacto entre ambos materiales, y un tercer material, detectado en las pertenencias Don Luís y Sociedad, que consiste en un caliche o arenisca fina consolidada que contiene una concentración variable de moluscos.

- ***Objetivo y diseño del muestreo de mineral.***

El objetivo del muestreo del mineral fue encontrar tres tipos de minerales de la siguiente composición aproximada:

**Tabla 14: Muestras de Carbonato de Calcio**

<b>Muestra</b>	<b>Contenido de CaCO<sub>3</sub> %</b>	<b>Contenido de Arcilla %</b>
M1	85	10
M2	75	20
M3	65	30

Se decidió analizar la aptitud de estos tres tipos de mineral a la formación de cal hidráulica de alta resistencia para encontrar el óptimo desde el punto de vista de las reservas y de la factibilidad técnica de obtener este producto.

Para ello se realizaron diversas campañas de muestreo:

- **Primera Campaña de Muestreo:** El objetivo de la primera campaña de muestreo superficial fue encontrar en tres tipos de mineral con las leyes  $\text{CaCO}_3$  antes mencionadas. En esta etapa se extrajeron muestras de 20 Kg, las cuales fueron analizadas obteniéndose sus leyes de carbonato de calcio.
- **Segunda Campaña de Muestreo:** La segunda campaña consistió en remuestrear los puntos en que se habían encontrado los valores M1 y M2 y replantear una segunda campaña de muestreo para las leyes no encontradas, M3.
- **Tercera Campaña de Muestreo:** La tercera campaña de muestreo se orientó a encontrar un mineral, dentro de las pertenencias de CPCAL, con las características de M3.
- **Cuarta Campaña de Muestreo:** La cuarta campaña de muestreo buscó extraer las muestras definitivas correspondientes a M1, M2, M3. Se decidió extraer muestras de 50 kg Estas muestras fueron analizadas y con ellas se efectuaron las pruebas de calcinación a escala de laboratorio.

- **Reservas Minerales.**

Un análisis de las reservas potenciales del manto superior arroja los siguientes resultados:

**Tabla 15: Reservas Potenciales del Manto Superior**

Potencia del Manto	11 m
Área	4.170.000 m <sup>2</sup>
Densidad	2,5 kg/m <sup>3</sup>
Ritmo deExplotación	72.000 t/año
Reservas	114.675.000 t.

Disminuyendo el área a sólo las reservas potenciales de las pertenencias de Cerro Blanco tenemos:

**Tabla 16: Reservas Potenciales Pertenencia Cerro Blanco**

Potencia del Manto	6,3-8,1-10,5 m
Área	1.000.000 m <sup>2</sup>
Densidad	2,5 kg/m <sup>3</sup>
Ritmo deExplotación	72.000 t/año

Con ello se realiza una estimación de las reservas obteniéndose los valores que se indican en la siguiente tabla:

**Tabla 17: Reservas Totales.**

Reservas	Toneladas	Vida útil Años
Probadas	15.750.000 t.	218
Probadas inferidas	20.250.000 t.	281
Inferidas	26.250.000 t.	364

En estos resultados se han considerado potencias desde 6,3 a 10,5 m, del manto superior de la formación. No se consideran las potencias del manto inferior existente en el yacimiento ya que se cuenta sólo con información geológica regional no suficiente para cuantificar reservas. Se concluye que no existen problemas de reservas en el yacimiento.

- **Geología y mineralogía de los yacimientos.**

Referente a los siete yacimientos se puede mencionar que se encuentran emplazados en la sección superior de la formación Coquimbo. Esta sección esta formada por areniscas, conglomerado y algunos niveles carbonatados y fosilíferos.

Debido a la presencia de varias fallas locales, en algunas zonas esta sección queda en contacto con la base de formación, que está constituida por areniscas amarillas, del grano medio a grueso, en parte limosa, con algunos niveles de coquinas.

Por lo tanto, para los efectos de estimar las reservas potenciales del grupo de yacimientos, es necesario considerar también los carbonatos de la sección inferior.

En algunas zonas como las pertenencias Don Luís y Sociedad, las dos secciones anteriores están cubiertas por depósitos aluviales cuaternarios y arenales de aproximadamente 1 metro de espesor, lo que asegura un costo de extracción bajo desde el punto de vista del movimiento de tierra de la sobrecarga.

El Carbonato de calcio presente en las dos secciones se encuentra bajo cuatro formas mineralógicas diferentes:

**1.- CaCO<sub>3</sub> blanco e incoloro.** Corresponde a una material llamado cristalino en que los fósiles han perdido parcialmente su forma original y se encuentran cementados adquiriendo una dureza y compacidad tal que su explotación debe hacerse con perforación y tronadura.

**2.- CaCO<sub>3</sub> de color gris claro.** Corresponde a un material llamado loza que se encuentra en capas en el cual los fósiles conservan total o parcialmente su forma original. Hay cementación muy variable, que le confiere al material una dureza y una compacidad mucho menor que el cristalizado. Este material esta mezclado superficialmente con arcilla.

**3.- CaCO<sub>3</sub> de color claro.** Esta representado por los fósiles que están presentes en el caliche de algunas pertenencias. La mayoría de los esqueletos son frágiles y no poseen ningún grado de

cementación. Esta arenisca o caliche calcáreo se puede extraer generalmente sin perforación y tronadura.

**4.- Conchales no aglomerados.** Están presentes bajo la capa de la loza, en dos lugares en las pertenencias de la Cerro Blanco.

- ***Procedimiento de muestreo.***

Se decidió realizar el muestreo en forma manual ya que con el uso de perforación y tronadura se pierde la posibilidad de analizar visualmente la composición mineralógica.

Además el mineral sale proyectado varios metros, mezclándose con minerales existentes en la superficie y con ello desvirtuando la muestra.

Para muestrear la capa o manto que aflora en superficie se saca con una llauca (chuzo de 40 cm de largo) y un combo muestras exploratorias en forma de canales cada 1 metro perpendicularmente al afloramiento según el caso.

Si la composición de la muestra alcanza el valor esperado (85, 75, 65%  $\text{CaCO}_3$ ) se hace un remuestreo de las canaletas excavadas en la etapa inicial, ensanchando hacia ambos lados y en profundidad de las mismas.

Si los análisis químicos de ambas muestras son similares se procede a extraer las muestras para escala de laboratorio en los mismos lugares anteriores, profundizando y ampliando las iniciales.

Cada muestra se divide en dos partes aproximadamente iguales, dejando una muestra testigo y la otra para análisis.



- **Ubicación y composición de la primera campaña de muestreo.**

Por la calidad de los accesos, la distancia a los hornos de calcinación y las reservas potenciales de mineral, se eligió las pertenencias Cerro Blanco (100 ha) y Don Luís (26 ha) para extraer muestras que se ajustasen a las composiciones antes descritas. Para ello en la primera campaña de muestreo se extrajeron siete muestras que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 18: Caracterización Química Muestras.

Muestra	CaCO <sub>3</sub> (%)	Arcilla +SiO <sub>2</sub> (%)	Fierro (%)	Observaciones
1 (C)	76,1	17,3	1,05	Muestra tomada en el campamento
2 (P2)	87,0	8,5	0,5	Muestra tomada en el pique N°2
3 (P1)	91,1	3,2	0,3	Muestra tomada en el pique N°1
4 (P6)	84,4	10	0,6	Muestra tomada en el pique N°6
5 (P7-P8)	90,7	4,15	1,05	Muestra tomada en el pique N°7 y N°8
6 (P9)	92,2	4,05	0,2	Muestra tomada en el pique N°9
7 (L)	49,8	41,15	1,25	Muestra tomada en pertenencia DON Luis

Las muestras 1(C) a 6(P9) están ubicadas en Cerro Blanco y corresponden a un tipo de carbonato conocido como loza. La muestra 7(L) se encuentra en la pertenencia Don Luís. Corresponde a un estrato, que aflora en algunos lugares, conocido como caliche.

- **Conclusiones de la primera campaña de muestreo.**

Considerando que las muestras 1(C) y 4(P6) tienen una composición similar a M1 y M2 se procedió a remuestrear estos dos minerales a fin de confirmar los resultados obtenidos.

Debido a que no se ha encontrado un mineral de las características de M3 se procede a realizar una segunda campaña de muestreo con el fin de localizar un mineral con la calidad requerida.

- **Remuestreo de M1 y M2**

El remuestreo de 1(C) y 4(P6) arroja los siguientes resultados:

Tabla 19: Caracterización Química Muestras.

Muestra	CaCO <sub>3</sub> (%)	Arcilla + SiO <sub>2</sub> (%)	Ubicación
1 (CC)	75,90	17,30	Cerca del Campamento
4 (P6)	76,65	16,70	Pique 6 y Rajo Costado P6

De los resultados se puede concluir:

- La composición de la loza 1(C) prácticamente se mantiene.
- El porcentaje de carbonato de Calcio de la loza 4 (P6) fue menor, y los insolubles en ácido aumentaron. Esto se debió a que al profundizar la muestra se empezó a contaminar con caliche.

• ***Campaña de muestreo para M3***

Con el objeto de encontrar el mineral tipo M3, se recorrió nuevamente las cien hectáreas de la pertenencia Cerro Blanco, extrayendo en dos lugares las muestras CB (SW) y Cerro Blanco rojo, ambas ubicadas en el vértice Sur Norte de la pertenencia.

Los resultados obtenidos con el segundo muestreo de mineral fueron las siguientes:

Tabla 20: Caracterización Química Muestras Cerro Blanco

Muestra	CaCO <sub>3</sub> (%)	Arcilla + SiO <sub>2</sub> (%)	Ubicación
CB	91,25	4,10	SW Pertenencia Cerro Blanco
Cerro Blanco rajo	84,40	7,25	SW Cerro Blanco Rajo

El análisis de los resultados nos permite concluir lo siguiente:

- Las lozas de los afloramientos de Cerro Blanco tienen leyes de carbonato de calcio superiores a la calidad M3 que se busca.
- Debe buscarse un mineral con las características de M3 en otras pertenencias.

Se decidió continuar la búsqueda del mineral tipo M3 en las pertenencias Sociedad, Don Luís y Elisa

Los análisis químicos efectuados a las muestras tomadas en otras pertenencias, indican que estos minerales tienen la siguiente composición:

Tabla 21: Caracterización Química de Muestras

Muestra	CaCO <sub>3</sub> (%)	Ubicación	Material
Sociedad	56,3	Quebrada ACP/A	Loza
Luis Sur	59,2	Sector Sur Perteneciente a Don Luis	Loza
Luis	36,5	Zona Central Perteneciente a Don Luis	Caliche y Concha
Elisa	55,9	Campamentos Hornos de Calcinación	Caliche y Concha

A partir de los resultados obtenidos se definieron las siguientes muestras para ser calcinadas a escala de laboratorio:

Tabla 22: Cantidad de Muestras

Muestra	Nombre Muestra	Cantidad de Muestra (kg)
M1	MP1	44,56
M2	MP3	46,67
M3	MP4	47,67

#### 4.1.3.- *Calcinación a escala de laboratorio de los minerales seleccionados.*

Las muestras fueron reducidas a un diámetro de 2 a 3 cm. Se seleccionaron al azar, conjuntos de 8 a 10 trozos de cada muestra, para luego ser calcinados en hornos eléctricos de cámara a diferentes temperaturas y tiempo de residencia obteniéndose cal viva calcinada a escala de laboratorio.

#### 4.1.4.- *Caracterización de la cal viva calcinada a escala de laboratorio.*

Se analiza la composición mineralógica de la cal viva calcinada mediante difracción de rayos X y la composición química por las normas chilenas del cemento hidráulico. El objetivo es determinar la presencia de contenidos cementicios producto de la clinkerización.

#### ***4.1.5.- Determinación de la mezcla óptima de cal viva con componentes puzolánicos.***

Para la obtención de Char 2 se mezcla la cal viva altamente clinkerizada obtenida de la calcinación con diferentes proporciones y tipos de puzolanas. Se han considerado el uso de puzolanas naturales de propiedad de CPCAL en el sector del Valle del Elqui a 4 km. del pueblo de Pisco y puzolanas artificiales las cuales corresponden a residuos generados por la Central Térmica Guacolda en la ciudad de Huayco en la III Región. Se estudian los siguientes comportamientos de las mezclas diseñadas:

- **Tiempo de fraguado.** Para materiales de diversa composición cal hidráulica/puzolana. Los ensayos se realizaron mediante la aguja de Vicat.
- **Índice de Puzolanidad.** Se utilizó la norma Chilena 161. Of. 69. El índice se determinó usando mezclas de puzolana con cal hidráulica y con cal hidráulica de alta pureza.
- **Reactividad potencial de material puzolánico.** Se utilizó la norma ASTM C-289 que esta orientada a establecer el grado de actividad de los áridos en los hormigones.

Se considera como ensayo válido de caracterización físico mecánica los valores obtenidos de los ensayos de Índice de Puzolanidad.

#### **4.2.- Etapa piloto.**

##### ***4.2.1.- Determinación del mineral óptimo para ser sometido a calcinación en horno horizontal Polysius.***

De acuerdo a los resultados obtenidos en la etapa de caracterización y ensayos en laboratorio, la muestra de mineral MP3 es la que presenta las mejoras características para la ejecución en planta piloto.

#### ***4.2.2.- Calcinación en horno horizontal Polysius del mineral seleccionado.***

Se realizaron dos pruebas de calcinación en planta piloto. Para ello el mineral fue chancado a ½" y alimentado a un ritmo de 50 kg/hora.

Se obtuvieron muestras de material clinkerizado a temperaturas entre 1000 y 1350 °C y tiempos de calcinación entre 30 y 60 minutos.

Se observa que una clinkerización importante empieza a los 1100°C.

#### ***4.2.3.- Caracterización Físico-Mecánica de la Cal Hidráulica de la calcinación.***

Las muestras obtenidas se molieron y fueron sometidas a un apagado agregándole agua pulverizada a fin de eliminar la cal viva proveniente de la calcinación. En esta forma quedaron preparadas para el análisis químico, mineralógico y físico mecánico.

### **4.3.- Etapa Industrial.**

#### ***4.3.1.- Definición de los parámetros óptimos de calcinación en horno vertical industrial.***

Los resultados obtenidos permitieron definir claramente la necesidad de subir la temperatura de calcinación de 1100 °C para lograr la calcinación. En cuanto al tiempo de residencia, quedó en evidencia que el horno vertical lo suministra adecuadamente. Con estos parámetros se diseñó y construyó el horno de calcinación experimental a escala industrial.

#### ***4.3.2.- Calcinación en horno vertical experimental.***

Una vez construido el horno experimental se procedió a realizar las calcinaciones. Se cargaron en forma alternada 9 capas de mineral y de carbón en forma alternada.

Las capas de mineral fueron todas iguales de 6.900 kg cada una.

Las primeras cuatro capas de carbón fueron de 1.540 kg cada una. La quinta a la séptima fue de 1.650 Kg cada una. Las capas octava y novena fueron de 1.760 kg cada una.

Desde el encendido del horno hasta su apagado trascurrió un lapso de 3 días.

La clinkerización fue leve en las primeras capas, aumentando notablemente en las siguientes como consecuencia del aumento de temperatura derivado del aumento de combustible.

#### ***4.3.3.- Procesamiento en planta de la cal viva obtenida en la calcinación.***

Se realizaron las primeras pruebas de procesamiento en planta con cal viva calcinada en el Horno N°1. El proceso se inició con el apagado y mezcla de la cal viva clinkerizada y material puzolánico. Continuó con la molienda y separación aero gravitacional de los diversos productos.

Los productos resultantes fueron muestreados bolsa por bolsa con el mismo procedimiento descrito para la Cal Hidráulica de producción actual.

Las dosificaciones usadas fueron las siguientes:

- **Muestra A:** 2 volúmenes cal viva clinkerizada- 1 volumen puzolana. Se apagaron 16,5 toneladas de cal viva con 9,2 toneladas de puzolana. Se produjeron 1.029 bolsas de Cal Hidráulica de 25 kg cada una.
- **Muestra B:** 1 volúmenes cal viva clinkerizada- 1 volumen puzolana. Se apagaron 16,5 toneladas de cal viva con 18,4 toneladas de puzolana. Se produjeron 1.400 bolsas de Cal Hidráulica de 25 kg cada una.
- **Muestra C:** 1 volumen cal viva clinkerizada- 2 volúmenes puzolana. Se apagaron 11,0 toneladas de cal viva con 18,4 toneladas de puzolana. Se produjeron 1.180 bolsas de Cal Hidráulica de 25 kg cada una.

Posteriormente se realizaron las pruebas correspondientes a la calcinación en el Horno N°3, especialmente construido para el proyecto, con las siguientes dosificaciones en volumen.

- **Muestra A1:** 1 cal viva clinkerizada-1 puzolana. Se apagaron 6,5 toneladas de cal viva obteniéndose una producción de 261 bolsas. Debido a la baja producción alcanzada, se repitió la prueba obteniéndose la muestra A2
- **Muestra A2:** 1 cal viva clinkerizada-1 puzolana. Se apagaron 6,5 toneladas de cal viva obteniéndose una producción de 496 bolsas. La mayor productividad se debe a la menos cantidad de clinker de la cal viva.
- **Muestra B:** 1 cal viva clinkerizada-1 puzolana. Se apagaron 6,5 toneladas de cal viva obteniéndose una producción de 536 bolsas. Es la muestra de mayor productividad.

- **Muestra C:** 2 cal viva clinkerizada-1 puzolana. Se apagaron 6,5 toneladas de cal viva obteniéndose una producción de 325 bolsas.
- **Muestra D:** 1 cal viva altamente clinkerizada-1 cal viva alta ley- 1 Puzolana. Se obtuvieron 50 bolsas mediante dosificación manual.
- **Muestra E:** 1 cal viva altamente clinkerizada escogida a mano-1 cal viva alta ley escogida a mano- 1 puzolana. Se obtuvieron 50 bolsas mediante dosificación manual.

Todas las muestras así obtenidas son caracterizadas física y mecánicamente.



## 5.- RESULTADOS.

### 5.1.- Etapa de Laboratorio.

#### 5.1.1.- Muestra de Materias Primas.

Se analizaron 2 muestras de cal hidráulicas fabricadas actualmente en Chile, cinco muestras de carbonato de calcio, materia prima para la producción de Char 2, y una muestra de cenizas volantes según se describe en la siguiente tabla:

Tabla 23: Muestras Materias Primas

Muestras		
Cal Hidraulica	CH1	Cal Soprocal
	CH2	Cal CPCAL
Carbonato de Calcio	MP1	Conchuela 1 ( C )
	MP2	Conchuela 4(P6)
	MP3	Conchuela 1 ( C )
		Remuestreo ( B )
	MP4	Conchuela sociedad
MP5	Conchuela 7(L) Don Luis	
Cenizas Volantes	CV1	Ceniza Volante Procedente de Central térmica Guacolda

#### 5.1.2.- Análisis y ensayos

Los análisis y ensayos realizados en la primera etapa son fundamentalmente de carácter básico, estos, caracterización y estudio de comportamiento de materias primas y producto.

### 5.1.2.1 Composición Química

a.- Cales hidráulicas (% en peso).

Tabla 24: Caracterización Química de muestras Seleccionadas

Elemento	CH1 (%)	CH2 (%)
Silicio (SiO <sub>2</sub> )	37,97	21,06
Calcio (CaO)	29,72	46,14
Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	9,95	8,53
Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,24	2,61
Magnesio (MgO)	0,78	1,33
Sodio (Na <sub>2</sub> O)	52,22	0,85
Potasio (K <sub>2</sub> O)	2,32	0,77
Humedad	1,19	Nd
P.P.C. a 950°C	6,07	20,65

Del análisis se desprende que la Cal Hidráulica de CPCAL contiene un mayor porcentaje de carbonato de calcio y que el proceso de calcinación es ineficiente debido al alto porcentaje de P.P.C aunque esto puede deberse a una mayor presencia de agua.

b.- Materias primas (% en peso).

Tabla 25: Caracterización de Muestras

Elemento	MP1 (%)	MP2 (%)	MP3 (%)	MP4 (%)	MP5 (%)
Silicio(SiO <sub>2</sub> )	8,32	5,45	14,67	41,28	22,48
Calcio (CaO)	48,65	50,56	44,1	18,2	35,1
Aluminio(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,32	0,81	3,11	9,55	5,64
Hierro(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,64	1,45	1,21	3,74	1,66
Magnesio(MgO)	0,79	0,56	0,72	1,4	0,62
Sodio(Na <sub>2</sub> O)	0,58	0,5	0,84	2,17	1,28
Potasio(K <sub>2</sub> O)	0,48	0,31	0,78	1,97	0,93
Azufre(SO <sub>3</sub> )	Nd	Nd	0,16	0,06	0,11
Humedad	0,2	0,25	0,36	1,15	0,41
P.P.C. a 950°C	37,7	39,72	34,59	16,23	28,63

Nd: no determinado.

### 5.1.2.2 Composición Mineralógica.

Las muestras fueron analizadas por difracción de rayos X, detectándose la presencia de las siguientes especies mineralógicas.

Tabla 26: Composición Mineralógica.

Componente	CH1	CH2	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
Ox. Calcio	+	+	-	-	-	-	-
Portlandita	+	+	-	-	-	-	-
Anortita	+	-	-	-	+	+	+
Anortita Na	-	-	+	-	-	-	-
Cuarzo	+	+	+	-	+	-	-
Calcita	+	+	-	+	+	-	+
Albita	+	-	-	-	+	+	+
Albita Ca	-	-	-	-	+	+	+
Carbón	-	-	-	-	-	-	-
Ilita/Montmor	-	-	+	-	-	-	-
Biotita	-	-	-	-	-	+	-
Silic. Na, Al hidr.	-	-	+	-	-	-	-
Silic. Ca hidr	-	-	-	+	+	-	-

(+) = Detectado  
(-) = No detectado.

### 5.1.2.3 Composición granulométrica.

Las muestras correspondientes a las denominadas cales hidráulicas fueron analizadas por rayos X, mediante un equipo Quantachrome Microscan II. Se adjuntan las respectivas curvas granulométricas y tablas en el anexo N°1 (figura 1 a 4). En la siguiente tabla se muestra el diámetro equivalente esférico calculado para el 80% de la muestra.

Tabla 27: Caracterización Físico Mecánica de Muestras

Muestra	Diámetro Equiv. Esférico D80 (µm)
Cal Soprocal	35.560
Cal CPCAL	25.570

#### 5.1.2.4 *Propiedades Físico-Mecánicas de Cal Hidráulica.*

Las muestras de cal hidráulica CH1 y CH2 fueron sometidas a ensayos normalizados, para determinar sus propiedades físicas y mecánicas, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 28: Caracterización Físico Mecánica de Muestras

	CH1	CH2
<b>Peso Especifico (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	2.402	2.542
<b>Superficie Especifica (cm<sup>2</sup>/g)</b>	7.100	6.800
<b>Retentividad (%)</b>	60	61
<b>Resistencia Compresión 7 días (MPa)</b>	0,5	0,6
<b>Resistencia Compresión 30 días (MPa)</b>	1,3	1,3

#### 5.1.3.- *Comportamiento Térmico.*

Muestras de cada materia prima potencial (MP1, MP3, y MP4) fueron reducidas de tamaño hasta un diámetro de 2 a 3 cm. Se seleccionaron al azar conjuntos de 8 a 10 trozos de cada muestra para luego ser calcinados en un horno eléctrico de cámara a diferentes temperaturas y tiempo de residencia.

En general las temperaturas de tratamiento térmico fueron de 900°, 1000°, 1100° y 200°C en tanto que los tiempos límites de calcinación para cada temperatura fueron de 10 y 60 minutos con intervalos de 10 minutos. Los productos calcinados fueron enfriados bruscamente, para posteriormente una fracción ser molida para análisis de cal libre, y otra observada al microscopio óptico.

Los resultados de las calcinaciones se muestran bajo dos enfoques diferentes, por una parte se presentan gráficos de cal libre determinada químicamente versus cal teórica obtenida de la variación de masa producida por la calcinación (figura 6 a la 14 del anexo N°1.). Por otra parte en la figuras

15 a 17 del mismo anexo, se muestra la variación de la cal libre en función de la temperatura y tiempo de calcinación.

Los tratamientos a 1200°C se efectuaron a 2 tiempos de resistencia: 20 y 40 minutos, registrándose los resultados que se muestran a continuación.

**Tabla 29: Resultados de Calcinación**

Muestra	Tiempo (min)	P.P.C. (%)	Cal Libre (%)
MP1	20	38,1	41,31
	40	38,37	40,54
MP3	20	35,59	35,82
	40	34,43	32,84
MP4	20	17,22	5,66*
	30	18,43	7,13*

(\*) = presenta signos de formación de fase líquida.

#### 5.1.4.- Tiempo de fraguado (cenizas volantes).

La muestra de cenizas volantes (CV1) fue utilizada como adición para la cal hidráulica CPCAL (CH2), para determinar el tiempo de fraguado de las respectivas mezclas. Los ensayos se realizaron mediante la aguja de Vicat, y los resultados se muestran en la tabla a continuación (valores promedio):

**Tabla 30: Tiempos de Fraguado.**

CH1 (%)	CH2 (%)	Relación A/S	Tiempo Fraguado	
			Ti (min)	Tf (min)
95	5	35	120	188
90	10	35	112	182
80	20	30	105	178
70	30	28	85	152
60	40	25	45	122
50	50	25	37	120

En la figura 5 del Anexo N°1, se muestra la variación del tiempo de fraguado en función de la concentración de cenizas volantes, junto con las respectivas curvas teóricas de los mismos parámetros (tiempo inicial y final vs. % CV1)

#### 5.1.5.- Índice de puzonalidad (Cenizas Volantes).

Los ensayos se efectuaron usando mezclas de cenizas volantes (CV1) con cal hidráulica CH2 y cal pura (calidad reactivo químico). Los resultados se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 31: Índice de Puzonalidad

	CH2	Cal Pura
Retenido tamiz #325 (%)	35,8	35,8
Consistencia Normal (%)	32	34,6
Resist. Compresión 7 días (kgf/cm <sup>2</sup> )	46	71

#### 5.1.6.- Reactividad Potencial (cenizas volantes).

El ensayo de reactividad potencial o determinación de la reacción álcali/agregado descrito por la Norma ASTM C-289, está orientado a establecer el grado de actividad de los áridos utilizados en la producción de hormigones. Este ensayo acelerado se aplicó a las cenizas volantes, para determinar la influencia de la molienda sobre la reactividad potencial de las cenizas. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 32: Reactividad Potencial

	Reducción Alcanilidad (Rc)	Sílice Disuelta (Sc)
Sin Molienda	309	127
Con molienda	466	102

De acuerdo al criterio recomendado por la Norma pueden presentarse las siguientes alternativas:

- Si  $R_c$  sobrepasa el valor 70, se considera que el árido es potencialmente reactivo cuando  $S_c > R_c$ .
- Si  $R_c$  es menor que 70, se considera que el árido es potencialmente reactivo cuando  $S_c > 35 + R_c/2$ .

Los valores de  $R_c$  y  $S_c$  en las muestras ensayadas se ubican al lado izquierdo de la línea divisoria del gráfico de la Norma C-289. Las muestras ensayadas se consideran no reactivas, inocuas.

## 5.2.- Etapa Piloto.

### 5.2.1.- Muestra Para fase Piloto.

Con los resultados de la fase de laboratorio se escogió los materiales a utilizar en la fase piloto donde se realizaron calcinaciones y mezclas para obtener el producto óptimo. En la siguiente tabla se muestra el material calcáreo, y de cenizas volantes naturales y artificiales utilizadas, la primera proveniente de la quebrada de Uchumi, Valle del Elqui y la segunda de la Central Térmica Guacolda.

Tabla 33: Muestra Materias Primas Fase Calcinación

Muestras		
Carbonato de Calcio	MP3	Conchuel C1B (colpas de material calcareo con inclusiones arcillosas, de 4 a 6 cm de diametro)
Ceniza Volante	CV1	Ceniza Volantes procedente Central Termica Guacolda
Puzolana Natural	PU1	Puzolana procedente de la IV Región

### 5.2.2.- Análisis y ensayos.

Los análisis y ensayos efectuados en esta segunda etapa corresponden básicamente a aquellos realizados a escala piloto y también a la caracterización física y/o mecánica de productos obtenidos a nivel semi- industrial.

#### o *Materia Prima.*

Conforme a los resultados de caracterización obtenidos en la primera etapa del estudio, se selecciona como materia prima la muestra de conchuela identificada como conchuela 1(C) Remuestreo Sociedad, en adelante C1B (MP3). Esta muestra se caracteriza por estar constituida principalmente por carbonato de calcio y silicatos (tablas 34 y 35)

Tabla 34: Composición Química de Muestras de Laboratorio (MP3) y Planta Piloto (PP)

	M(MP3) (%)	M(PP) (%)
Silicio (SiO <sub>2</sub> )	14,67	13,56
Calcio(CaO)	44,1	41,62
Aluminio(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,11	7,7
Hierro(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,21	0,99
Magnesio(MgO)	0,72	0,51
Sodio(Na <sub>2</sub> O)	0,84	0,94
Potasio(K <sub>2</sub> O)	0,7	0,81
Azufre (SO <sub>3</sub> )	0,16	0,15
Humedad	0,36	0,24
P.P.C. a 950°C	34,59	34,46

Tabla 35: Composición Mineralógica. De Conchuela MP3 por difracción de rayos X (DRX)

Componente	Abundancia (*)
Anortita	++
Cuarzo	+
Calcita	+++++
Albita	+
Albita Ca	++
Silic. Ca hidr	+

(\*) Relativa a la calcita.



### 5.2.3.- Calcificación en planta piloto.

La muestra de conchuela seleccionada (MP3) fue sometida a un proceso de reducción de tamaño en una chancadora de mandíbula Denver, llevando el material a un diámetro final de 1,0 cm. (aprox.). Posteriormente, utilizando un sistema de alimentación de canchales la materia prima fue introducida en un horno rotatorio Polysius-Labor, cuyas características básicas se muestran en la tabla 36.

Tabla 36: Características Generales del Horno Rotativo Polysius-Labor

Características	Unidad	Valor
Largo Total	cm	800
Largo útil	cm	500
Diámetro total	cm	45
Diámetro útil	cm	34
Revoluciones	r.p.m	1.5/12
Consumo Petróleo	Lt/h	15/30
Inclinación	Grados	2.0/2.7
Rango	°C	500/1500
Combustible	Tipo	P. Diesel
Quemador	tipo	Lanza*

\* Inyección forzada por aire

Se efectuaron dos calcificaciones en planta piloto, la primera orientada a obtener productos a diferentes temperaturas y tiempos de resistencia, y una segunda dirigida a obtener un solo producto de acuerdo a condiciones derivadas de la primera calcificación. A continuación se detallan las condiciones y observaciones de cada experimento.

#### o *Calcificación 1.*

Las calcificaciones se efectuaron a tres (3) temperaturas: 1000°, 1300° y 1400°C, variando las revoluciones del horno para conseguir dos tiempos de residencia (30 y 50 min., respectivamente). El control de temperatura del material durante cada tratamiento térmico se realizó a través de mediciones con un pirómetro óptico.

La cantidad de muestra utilizada para cada ensayo de calcinación, o sea para cada condición de temperatura y tiempo de residencia, fue del orden de 40 kilogramos (aprox.). El producto calcinado fue enfriado al aire sobre bandejas metálicas (a temperatura ambiente).

Los productos resultantes de las calcinaciones fueron de cal libre (tabla 37).

Los análisis mineralógicos efectuados a las muestras calcinadas, indican la ausencia total de máximos de difracción correspondientes a la calcita, lo que es indicativo que el proceso de calcinación fue exhaustivo en ese aspecto. Los materiales obtenidos a las tres temperaturas presentan máximos correspondientes al óxido de calcio, que en el caso de 1000°C aparece acompañado de un silicato de calcio. En el caso de los materiales obtenidos a temperatura superiores (1300 y 1400°C) se detecta la presencia de silicatos di cálcico en forma de larnita (ver anexo N°2; gráficos 1 y 2).

La presencia del silicato de di cálcico fue ratificado a través de observaciones efectuadas por microscopía óptica, donde se detectaron núcleos de esta especie mineral, compuestos por cristales pequeños y pobremente desarrollados.

**Tabla 37: Contenido de Cal libre en muestras procesadas en planta piloto**

<b>N°</b>	<b>Temp (°C)</b>	<b>T. Resid. (min)</b>	<b>Cal Libre (% peso)</b>	<b>Observ. (*)</b>
1	1000	50	24,22	blanco/media
2	1300	30	33,34	gris/media
3	1300	50	26,10	gris/media
4	1400	30	20,98	gris/cabeza
5	1400	30	24,86	gris/cola
6	1400	50	24,14	gris/cabeza
7	1400	50	26,73	gris/cola

○ **Calcinación 2.**

Conforme a los resultados obtenidos en la calcinación anterior, se programó y ejecutó una calcinación a 1400°C con un tiempo de residencia de 30 minutos, destinada a producir una partida de cal suficiente para efectuar algunos ensayos comparativos, manteniendo constante la principal materia prima (cal viva).

Las características del material (tamaño de grano de alimentación, etc.) y las condiciones generales de operación de la planta piloto (horno) se mantuvieron absolutamente constantes.

El contenido de cal libre, determinado para el producto obtenido en las condiciones descritas, fue de un 33,50% (promedio). Por su parte, el análisis mineralógico indica, al igual que en la primera calcinación, la presencia de cal (CaO) y silicato di cálcico (larnita). Además, se realizaron determinaciones de distribución de tamaño de partículas, cuyos resultados se presentan en los gráficos 3 al 5 del anexo N°2. En la siguiente tabla se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

**Tabla 38: Resumen de Ensayos Granulometricos**

<b>Muestra</b>	<b>Diámetro Equiv. Esférico D80 (µm)</b>
M1	54.325
M2	65.019
M3	64.893
Cal A	35.314
Cal A2	36.310
Cal B	34.711
Cal C	44.527
Cal C	28.244
Cal E	34.135

#### **5.2.4.- Preparación de la cal hidráulica.**

Las cales obtenidas en planta piloto fueron apagadas utilizando una razón agua/cal libre de 0,30. Posteriormente el material fue sometido a una molienda fina, agregando en esta última etapa las respectivas adiciones de puzolana o cenizas volantes CV1.

En primer término, se preparó una muestra con cal obtenida en la calcinación 1, seleccionando la fracción correspondiente a 1400°C (común experimentos 4, 5 y 6), para disponer de la cantidad necesaria para los ensayos propuestos. Al producto calcinado y apagado se le incorpora un 30% de puzolana PU1, obteniéndose una cal hidráulica identificada en adelante como C1PUZ.

Por otra parte, el material obtenido a través de la calcinación 2, luego del proceso de apagado, fue homogeneizado y a partir de él se prepararon 3 muestras:

- Material puro con molienda regular (M1REG),
- Material puro con molienda fina (M2FIN)
- Material puro con molienda regular y adición de 30% de cenizas volantes CV1 (M3CAFL).

Aparte de las cales hidráulicas preparadas según el procedimiento indicado, se procedió a separar por tamizado la fracción escorificada, rica en silicatos cálcicos, para verificar su grado de hidraulicidad. Este material obtenido en la calcinación 2, apagado con agua ( $r=0,30$ ), fue mezclado con un 30% de puzolana (M4CL).

#### **5.2.5.- Propiedades Físico-Mecánicas de Cal Hidráulica (de planta piloto).**

Las muestras de cal hidráulica preparadas de acuerdo a la descripción anterior (C1PUZ, M1REG, M2FIN y M3CAFL), fueron sometidas a ensayos normalizados, para determinar sus propiedades físicas y mecánicas, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 39.

**Tabla 39: Propiedades físico-mecánicas de cales hidráulicas producidas en planta piloto**

		C1PUZ	M1REG	M2FIN	M3CAFL
Peso Especifico (kg/cm <sup>2</sup> )		2.577	2.865	2.865	2.778
Superficie Especifica (g/cm <sup>2</sup> )		9.750	5.000	5.450	5.900
Retentividad (8%)		93,3	64,6	69,4	57,3
Resistencia Compresión (Mpa)	7 Dias	1,3	1,1	1,1	0,6
	28 Dias	3,6	0,8	1,0	1,8

La muestra M4CL correspondientes a la mezcla de material escorificado con puzolana, fue sometida a ensayos mecánicos exclusivamente. Los resultados se presentan en la tabla 40.

**Tabla 40 : Propiedades mecánicas de material escorificado con adición de Puzolana (M4CL)**

Edad	Resistencias Mecánicas (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Flexión	Compresión
3 días	2	6
7 días	3	8
28 días	(*)	9

(\*) Probetas destruidas

Los resultados de esta ultima serie (tabla 40) son comparativamente bajos respecto a los obtenidos para las cales hidráulicas (muestra C1PUZ) que se muestran en la tabla 39. Por la evolución física de las probetas durante el proceso de curado, se estima que esta disminución de las resistencias podría tener su origen en la presencia de cal libre remanente, que produciría expansiones locales durante el fraguado generando micro fisuras (visibles).

Debe destacarse que el proceso de apagado de la cal viva, para todos los materiales obtenidos a escala de laboratorio o planta piloto, difiere considerablemente de aquel usado a escala industrial (planta CPCAL). En general, por los volúmenes de material que se manejan se observa que el apagado a escala menor es incompleto respecto al proceso industrial.

### 5.3.- Etapa Planta Industrial.

#### 5.3.1.- Materiales producidos en Planta CPCAL.

Aparte de los materiales producidos en planta piloto se produjeron cales hidráulicas en la empresa CPCAL, los cuales fueron sometidos a ensayos físicos y mecánicos los cuales se muestran en el anexo N°2.

Los materiales ensayados corresponden a dos series de pruebas. La primera serie considera las muestras identificadas como A, B y C producidas por CPCAL, cuya dosificación base corresponde a las siguientes razones en volumen cal viva/cenizas: 2:1, 1:1 y 1:2 respectivamente (las cales fueron apagadas antes de la homogenización final). Los resultados se muestran en la tabla 41.

Tabla 41: Propiedades físico-mecánicas de cales hidráulicas producidas en Planta CPCAL

		A	B	C
Peso Especifico (kg/cm <sup>2</sup> )		2.500	2.391	2.350
Superficie Especifica (g/cm <sup>2</sup> )		5.950	6.300	6.800
Retentividad (8%)		61,5	73,8	94,5
Resistencia Compresión (Mpa)	7 Dias	1,4	0,9	0,7
	28 Dias	2,4	2,0	1,7

Las cales de esta serie presentan contenidos de cal libre inferiores a las cales preparadas en planta piloto (tabla 42). Este comportamiento se repite en la segunda serie de experiencias a escala industrial, lo que indica que el proceso de apagado tiene relación directa con las condiciones de operación utilizadas.

Tabla 42: Contenido cal libre de primera serie de ensayos en Planta CPCAL.

Muestra N°	Cal libre (% peso)
A	17,5
B	14,4
C	11,8

La segunda serie de cales hidráulicas se produjo en el horno vertical especialmente diseñado y construido para el proyecto, donde mediciones en terreno indican que la temperatura promedio de calcinación sería del orden de los 1000 a 1500 °C.

De un ciclo de calcinación, se obtuvieron varias muestras, que posteriormente a escala industrial fueron procesadas, variando algunos parámetros de producción y dosificación. Las muestras recibidas para los ensayos mecánicos fueron identificadas como: MA1, MA2, MB, MC, MD y ME (tabla 43).

Tabla 43: Propiedades mecánicas de cales hidráulicas producidas a escala semi-industrial en CPCAL (Edad: 7 días).

Muestra	Resistencia Mecánicas (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Flexión	Compresión
MA1	1	4
MA2	1	3
MB	0	4
MC	0	4
MD	0	3
ME	5	25

Finalmente las cales preparadas a través del nuevo proceso, fueron caracterizadas en los siguientes aspectos: a) Contenido de cal libre (tabla 44), b) las distribuciones granulométricas y c) observación microscópica.

En términos generales, es posible indicar que las muestras analizadas presentan un tamaño medio (d50) entre 10 y 20 ( $\mu\text{m}$ ) y un contenido de finos ligeramente inferior a la cal hidráulica CH1 (ver gráfico 6 al 11 en anexo N°2).

**Tabla 44: Contenido Cal Libre en Muestras Producidas en Planta CPCAL (horno nuevo)**

<b>Muestra N°</b>	<b>Cal libre (% peso)</b>	<b>d50 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
MA1	9,42	10,8
MA2	12,20	10,9
MB	15,02	11,3
MC	17,77	11,2
MD	9,94	10,2
ME	11,19	11,1

En lo que respecta al análisis microscópico de la cal obtenida en la Planta CPCAL (horno nuevo), es posible indicar que se observa un desarrollo homogéneo de granos de óxido de calcio (cal), con núcleos diseminados de material con aspecto vítreo correspondiente a silicatos de calcio y/o aluminio, formados durante el proceso de calcinación a partir de las inclusiones arcillosas de la materia prima.



## 6.- IMPACTO ECONOMICO DEL PROYECTO PRODUCTIVO.

Se realizó la evaluación económica para la producción de Char 2 a escala industrial.

Este proyecto consiste en la readecuación y ampliación del complejo productivo de la compañía desde una capacidad de 30.000 bolsas/año de cal Hidráulica Normal a 1.000.000 bolsas/año de Cal hidráulica de Alta Resistencia y Alta Retentividad.

Las inversiones necesarias para la realizar la evaluación económica considerada se detallan a continuación:

- **Mina:** Se establecieron lo requerimientos para un nivel productivo de 2.200 t/mes.
- **Horno:** Se determinó necesario diseñar y construir 2 Hornos de calcinación. Además se consideró aumentar la capacidad de almacenamiento en buzones y mecanizar el proceso de carguio mediante el uso de un cargador frontal.
- **Planta:** En la planta se considera la ampliación de su capacidad de molienda y clasificación mediante la instalación de un molino de 9\*9 pies con su clasificador y todos los equipos requeridos.

La inversión en Equipos e Instalaciones alcanza a 0,925 MUS\$. Además se considera como parte de la inversión el Proyecto de Investigación Tecnológica Char 2 con un costo de 0,113 MUS\$. Se considera un capital de trabajo de 0,226 MUS\$. En consecuencia la Inversión Total es de 1,264 MUS\$.

## 6.1.- Resultados del Proyecto.

En la siguiente tabla se muestran los índices principales del proyecto.

Tabla 45: Índices Proyecto

TIR	48,51%
VAN (8%)	USD 2.006.514
VAN (10%)	USD 1.779.466
VAN (15%)	USD 1.311.912

El proyecto Industrial desarrollado posee ventajas que agruparemos en tres grandes aspectos:

### 6.1.1.- Beneficios Económicos.

De acuerdo a lo señalado precedentemente el proyecto tiene una alta tasa de retorno de 48,51%, y un valor presente actualizado positivo de USD 1.779.466, con tasa de interés de 10% y de USD 1.311.912 con tasa de interés de 15%.

Los valores señalados lo hacen muy atractivo del punto de vista económico-financiero.

Es muy importante indicar también que aceptando las exigencias sobre todo financieras, se ha desarrollado un Flujo de Caja para un período de sólo 5 años. En efecto, un proyecto de esta naturaleza permanecerá en el mercado plazos mucho mayores, siendo normal una vida útil para un proyecto de este tipo de 15 a 20 años.

### 6.1.2.- Beneficios de Calidad y Costos para las construcciones habitacionales industriales.

Los morteros de pega, junta y revestimiento con el uso de la cal hidráulica mejoran su retentividad, trabajabilidad, plasticidad, impermeabilidad, fisurabilidad y exudación con lo cual se logra optimizar su adherencia, resistencia y durabilidad. La necesidad de mejorar la calidad de la vivienda en Chile es permanente y por esta razón es dable esperar una alta demanda de un producto de esta naturaleza por la implicancia que tiene en la calidad de los morteros de todo tipo. Estas mejoras bastarían por sí solas para justificar su uso.

En forma suplementaria se obtiene una economía en costo al reemplazar parcialmente el uso del cemento hidráulico. Esta economía alcanza entre un 15 a 20% del costo de materiales de un mortero. En el anexo N°4 se muestra el impacto en costo que tiene el uso intensivo de Char 2.

## **6.2.- Evaluación Económica.**

El proyecto industrial consiste en la readecuación y ampliación del complejo productivo desde una capacidad de 300.000 bolsas/año de Cal Hidráulica normal a 1.000.000 bolsas/año de Cal Hidráulica Alta Resistencia y Alta Retentividad, Char 2.

Del resultado de este Proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico, que consiste en el desarrollo de un proceso productivo que incluye las etapas de extracción mina, calcinación en hornos verticales y procesamiento en planta de molienda y clasificación cuyo objetivo es producir CHAR 2, se pretende implementar el proyecto industrial señalado. Se debe tender presente que las inversiones son marginales en el sentido que existe una planta similar en operación la cual debe ser modificada tanto en sus parámetros operacionales como en el diseño para producir las mejoras tecnológicas necesarias para obtener Char 2.

Actualmente la empresa posee yacimientos con minerales adecuados en calidad y cantidad ubicados en el sector la Rinconada, Coquimbo, IV Región y que se encuentran en actual explotación. Sin embargo será necesario aumentar la capacidad de extracción para lo cual se requiere inversiones en el sistema de manejo de mineral. Se ha considerado necesario contar con la siguiente maquinaria adicional: un cargador frontal de 2 yd<sup>3</sup>, dos camiones de volteo de 15 t, un compresor de 180 pie<sup>3</sup>, una perforadora track-drill y un taller para afilado de brocas y mantenimiento de camiones. Para la determinación de esta flota se realizaron simulaciones que consideraron el ciclo productivo.

La planta de calcinación situada a 1,5 km del yacimiento deberá ser ampliada mediante la construcción de dos nuevos hornos de calcinación. El diseño del horno experimental construido para este proyecto probó ser el adecuado para escalar a una etapa productiva. Sin embargo se deberán considerar mejoras de carácter operacional como son la movilidad de parrillas y el sistema de traslado en carro Decauville. Adicionalmente se deben considerar aumentos de capacidad de almacenamiento en buzones de acopio.

Las ampliaciones en la Planta de Procesamiento de Cales incluirán la instalación de un molino de bolas de 9\*9 pies, un clasificador aero gravitacional de 20 pie, elevador de capachos, cintas transportadoras, sistema de llenado y pasaje automático de bolsas, montacargas de 5 t, ampliación maestranza, cargador frontal de 2 yd<sup>3</sup>, subestación eléctrica de 1.000 kva.

### **6.3.- Antecedentes del mercado**

La demanda potencial del producto Char 2 puede calcularse a partir del consumo de cemento hidráulico en el país. Las cuatro plantas de cemento, Polpaico, Melón, Bio.-Bio e Inacesa producen en conjunto 8. Mt/año, equivalentes a 188.235.294 bolsas de 42,5 kg al año.

Según cifras internacionales se estima que el 70% del cemento hidráulico producido se utiliza en hormigones y el 30% en morteros de sobrelozas, radieres, estucos y de albañilería. Los morteros representan, por lo tanto, un consumo aproximado de 55,5 Mbolsas/año.

Se estima factible lograr un reemplazo de 5% del cemento con lo cual se alcanzaría un consumo de Char 2 de 2,775 Mbolsas/año. La evaluación de proyecto se realizó considerando un crecimiento lineal del consumo, alcanzándose en el quinto año el 36% del potencial de consumo es decir un millón de bolsas.

En el año 2002 la compañía empezó a producir y comercializar cal hidráulica, producto que hasta esa fecha era comercializada por un solo productor, Soprocal.

Desde entonces las ventas han evolucionado de acuerdo al cuadro siguiente:

**Tabla 46 Ventas de sacos de Cal Hidráulica CPCAL**

	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>
Enero	2.457	7.854	19.785
Febrero	4.248	13.372	14.818
Marzo	2.365	15.945	19.215
Abril	2.420	12.461	22.514
Mayo	4.915	11.199	23.389
Junio	4.407	10.799	22.622
Julio	5.991	9.419	
Agosto	6.139	12.142	
Septiembre	6.804	11.141	
Octubre	6.696	15.687	
Noviembre	6.821	17.904	
Diciembre	7.338	17.837	
<b>Total</b>	<b>60.601</b>	<b>155.760</b>	<b>122.343</b>

Como puede observarse, entre el año 2002 y 2004 las ventas de cal hidráulica aumentaron desde 60.601 a 155.760 lo que representa un 157,3% de aumento. Entre los meses de Enero a Junio del año 2003 y el mismo periodo de 2004 subieron de 71.630 a 122.343 bolsas lo que representa un 70,8% de aumento. Se estima que en el año en curso el nivel de ventas alcanzará las 300.000 bolsas.

Estas cifras de ventas reales significan un aumento respecto a las ventas planteadas en el Proyecto de Innovación Tecnológica.

Considerando además, las proyecciones de la Cámara Chilena de la Construcción de 180.000 soluciones habitacionales para el año 2004, se han definido los siguientes consumos de Char 2.

Tabla 47: Ventas Anuales

Ventas	
N° Sacos/año	
Año 1	436.000
Año 2	590.000
Año 3	774.000
Año 4	889.000
Año 5	1.000.000
Total	3.689.000

#### 6.4.- Estimación de Precios.

La significativa mejora en la calidad del producto Char 2, así como la disminución de costos logrados con su utilización no han sido traspasadas a precio, manteniéndose constante e igual al que se comercializa actualmente.

La principal razón para mantener el precio es impedir una reacción por parte de las industrias cementeras del país. En efecto, manteniendo un precio significativamente más bajo que el cemento por bolsa, se impediría la reacción de las industria cementeras ya que un producto sustitutivo de la cal hidráulica, como el cemento de albañilería, debiese ser vendido en un nivel de precios similar a ella y como la venta de este producto les significaría desplazar la misma cantidad de bolsas de cemento, el resultado final sería una pérdida de rentabilidad.

El precio considerado es de 2,83 US\$/bolsa de 25 kilos.

#### 6.5.- Comercialización y distribución.

CPCAL tiene actualmente un Departamento de Ventas que se encarga de la promoción, comercialización y ventas de sus productos. Este trabaja en permanente contacto con el departamento de Accesorio Técnico el cual se encarga de hacer demostraciones en obra del producto, recomendar las dosificaciones y controlar los resultados.

Por otra parte, se ha iniciado la construcción de un Laboratorio múltiple para el control de las calidades de Cales, el cual estará equipado para realizar los siguientes ensayos:

- Ensayo de resistencia a la compresión de morteros en probetas de 4\*4\*16.
- Ensayos de trabajabilidad de morteros de cales.
- Ensayos de pesos y superficies específicas según Blaine.
- Granulometría de áridos finos
- Determinación de finos bajo 200 mallas
- Determinación de materias orgánicas de las arenas.

La inversión para el laboratorio no se ha considerado en el proyecto debido a que se considera parte de la inversión de la actual línea productiva.

La distribución la realiza directamente la compañía desde su bodega ubicada en Santiago.

#### **6.6.- Resultados de la Evaluación Económica**

El proyecto ha sido concebido como una ampliación y readecuación de los procesos actuales de extracción, calcinación, molienda y clasificación para producir 1.000.000 de bolsas/año de Char 2.

Existiría la posibilidad de diseñar un crecimiento modular instalando sucesivos equipos de menor tamaño. Sin embargo, con él no se obtendrían las economías de escala indispensables para hacer competitivo el proyecto desde su inicio. En consecuencia, el proyecto tendrá una capacidad inicial de 1.000.000 bolsas/año y su utilización estará en relación a la demanda efectiva del producto.

<b>Inversiones</b>	<b>Cantidad</b>	<b>PU (USD)</b>	<b>Total (USD)</b>
<b>Mina</b>			
1 Perforadora tipo Track-Drill	1	56.604	56.604
2 Compresores de 180 pie3	2	15.094	30.189
2 Camiones Tolva de 15 t.	2	37.736	75.472
1 Cargador Frontal de 2 yd3	1	56.604	56.604
Taller de Mantenimiento Camiones	1	18.868	18.868
<b>Planta de Calcinación</b>			
Hornos de Calcinación 4m*5m	2	18.868	37.736
Buzon de cargio de Cal Viva	1	18.868	18.868
1 Cargador Frontal de 2 yd3	1	56.604	56.604
<b>Planta de Procesamiento de Cales</b>			
Molino de Bolas 9*9 pie	1	245.283	245.283
Clasificador Aero Gravitacional	1	56.604	56.604
Elevador de Capachos	1	18.868	18.868
Correa Transportadora	1	37.736	37.736
Sistema de llenado y pesaje automatico de bolsas	1	94.340	94.340
Sub- Estación Eléctrica 1.000 KVA	1	37.736	37.736
Cargador Frontal 2 yd3	1	56.604	56.604
Montacargas para 5 ton	1	26.415	26.415
		<b>Total</b>	<b>924.528</b>



### 6.7.- Recuperación de la inversión.

Se considera que en el año 5° del proyecto se recupera un 20% de la inversión total equivalente a 0,256 US\$

### 6.8.- Capital de Trabajo.

Se considera 1,5 veces las ventas promedio mensuales

Tabla 48: Capital de Trabajo

	Total (USD)
Ventas 5 años proyecto	10.440.566
Ventas Promedio Mensual	174.009
Capital de Trabajo	261.014

### 6.9.- Producción.

Las producciones necesarias para cumplir con los requerimientos en el año 5 del proyecto se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 49: Producción

	Produccion		CHAR	Cal Hidratada	Cal Viva	Mineral
	Bolsas/año	t/año	t/mes	t/mes	t/mes	t/mes
Año 1	436.000	10.900	908	454	378	530
Año 2	590.000	14.750	1.229	615	512	717
Año 3	774.000	19.350	1.613	807	672	940
Año 4	889.000	22.225	1.852	926	772	1.080
Año 5	1.000.000	25.000	2.083	1.042	868	1.215

Considerando la producción anual y un precio de venta de 2,83 US\$/bolsa los ingresos estimados anuales son de:

Tabla 50: Ventas Anuales Proyecto

	Ventas	
	N° Sacos	US\$
Año 1	436.000	1.233.962
Año 2	590.000	1.669.811
Año 3	774.000	2.190.566
Año 4	889.000	2.516.038
Año 5	1.000.000	2.830.189

## 6.10.-Costos

De acuerdo a la experiencia de CPCAL y considerando los mayores costos del nuevo producto, se estableció la siguiente estructura de costos unitarios por saco de 25kg:

Tabla 51: Costos Operacionales Proyecto.

	AÑO				
	1	2	3	4	5
Costo Fijo (USD/saco)	0,27	0,26	0,25	0,23	0,22
Costo Variable (USD/saco)	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Gastos Adm y Ventas (USD/saco)	0,38	0,36	0,34	0,32	0,30
Costo total sin depreciación (USD/saco)	1,68	1,65	1,62	1,59	1,56
Depreciación (USD/saco)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
<b>Costo Total (USD/saco)</b>	<b>2,03</b>	<b>2,00</b>	<b>1,97</b>	<b>1,94</b>	<b>1,91</b>

La depreciación como esta señalada en la tabla se consideró de 0,35 US\$/saco.

Con esto es posible realizar la evaluación económica obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 52: Flujo Caja

Año	0	1	2	3	4	5
<b>INGRESOS (USD)</b>						
Producción (sacos)		436.000	590.000	774.000	889.000	1.000.000
Precio (USD)		2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Ingresos Totales (USD)		1.233.962	1.669.811	2.190.566	2.516.038	2.830.189
<b>EGRESOS</b>						
Costo Fijo (USD)		115.992	151.396	189.849	207.992	220.755
Costo Variable (USD)		452.453	612.264	803.208	922.547	1.037.736
Gastos Adm y Ventas (USD)		164.528	211.509	262.868	285.151	301.887
Depreciación (USD/saco)		152.189	205.943	270.170	310.311	345.104
Egresos Totales (USD)		885.162	1.181.113	1.526.094	1.726.002	1.905.481
Utilidad antes de Impuesto (USD)		348.800	488.698	664.472	790.036	924.708
Impuesto (USD) (15%)		52.320	73.305	99.671	118.505	138.706
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTO (USD)		296.480	415.393	564.801	671.530	786.001
Utilidad mas depreciación (USD)		448.669	621.337	834.971	981.842	1.131.105
<b>Inversiones</b>						
Proyecto de Innov. Tecno (USD)	113.208					
Proyecto Producción (USD)	924.528					
Capital de Trabajo (USD)	226.415					226.415
Valor Residual (USD)						256.604
<b>FLUJO DE CAJA NETO (USD)</b>	<b>-1.264.151</b>	<b>448.669</b>	<b>621.337</b>	<b>834.971</b>	<b>981.842</b>	<b>1.614.124</b>

## 6.11.-Flujo de Caja

El perfil de flujo de caja se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 53: Flujo de Caja.

Flujo de Caja	
Año 0	-USD 1.264.151
Año 1	USD 448.669
Año 2	USD 621.337
Año 3	USD 834.971
Año 4	USD 981.842
Año 5	USD 1.614.124

Los indicadores financieros son los siguientes:

Tabla 54: Indicadores Financieros.

Tasa Interna de Retorno (TIR)	48,51%
Valo Presente Neto 8%	USD 2.006.514
Valor Presente Neto 10%	USD 1.779.466
Valor Presente Neto 15%	USD 1.311.912
Horizonte Evaluación	5 años
Valor Residual	USD 256.604

## 6.12.-Beneficios Esperados.

El proyecto industrial desarrollado posee ventajas que agruparemos en tres grandes aspectos:

### 6.12.1.- *Beneficios Económicos*

De acuerdo a lo señalado precedentemente el proyecto tiene una alta tasa de retorno de 48,51 y un valor presente actualizado positivo de 2.006.514 US\$ con una tasa de descuento de 8%, 1.779.466 US\$ con tasa de descuento de 10% y de 1.311.912 US\$ con una tasa de descuento de 15%. Los valores señalados lo hacen muy atractivo desde el punto de vista económico financiero.

Debe señalarse además que el mercado ha sido desarrollado hasta la fecha por la compañía, obteniendo una alta aceptación en más de 200 empresas constructoras del país.

Es muy importante señalar también que aceptando las exigencias sobre todo financieras, se ha desarrollado un Flujo de Caja para un periodo de solo 5 años. En efecto, un proyecto de esta naturaleza permanecerá en el mercado en plazos mucho mayores y en todo caso deben acercarse a la industria del cemento.

**6.12.2.- *Beneficios de calidad y costo para las construcciones habitacionales e industriales.***

De acuerdo a lo expresado anteriormente en este informe los morteros de pega, junta y revestimiento con el uso de la cal hidráulica mejoraran en su retentividad, trabajabilidad, plasticidad, impermeabilidad, fisurabilidad y exudación con lo cual se logrará optimizar la adherencia, resistencias y durabilidad. Lo anterior está en concordancia con todos los esfuerzos en desarrollo actual en el país para mejorar la calidad en la construcción.

Estas mejoras bastarían por si solas para justificar su uso. Sin embargo, en forma suplementaria se obtiene una economía en costo al reemplazar parcialmente el uso del cemento hidráulico. Esta economía según la compañía ha podido probar en numerosas construcciones alcanza un 15 a 20% del costo de materiales de un mortero (ver anexo 4).

## **7.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.**

### **7.1.- Etapa de Laboratorio: Del estudio de la cal hidráulica de producción actual.**

#### **7.1.1.- Resistencia a la compresión.**

La resistencia a la compresión de la cal hidráulica de CPCAL es de 6 kg/cm<sup>2</sup> a los 7 días y de 13 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días.

La resistencia a la compresión de cal hidráulica Soprocal producida en el país es de 5 kg/cm<sup>2</sup> a los 7 días y de 10 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días.

Estos valores están dentro de los supuestos del proyecto que postuló una resistencia a la compresión del producto actual a los 28 días entre 10 y 20 kg/cm<sup>2</sup>.

#### **7.1.2.- Retentividad.**

La retentividad de la cal hidráulica de CPCAL fue de 61% en tanto la de la otra fue de 60%.

Debe señalarse que ninguna de las normas consultadas, ASTM, DIN, IS, IRAM y AFNOR tienen exigencias para este parámetro.

Sin embargo, la retentividad es una de las cualidades principales que aporta este producto a las mezclas con cemento hidráulico y resulta de alto interés maximizarlo.

#### **7.1.3.- Superficie específica.**

La superficie específica de Blaine de cal hidráulica CPCAL dio 6800 cm<sup>2</sup>/g, en tanto para la cal hidráulica Soprocal es de 7.100 cm<sup>2</sup>/g.

De acuerdo a los valores publicados es recomendable alcanzar un valor sobre 10.000 cm<sup>2</sup>/g, ya que existe una fuerte correlación entre este índice y la retentividad.

## **7.2.- Etapa Piloto: De las pruebas de calcinación en horno horizontal Polysius de IDIEM.**

### **7.2.1.- *Aptitud de mineral.***

Los yacimientos de CPCAL poseen reservas minerales en cantidad y calidad suficientes para generar un proyecto industrial para producir Char 2. Las características de los minerales indican ser adecuadas tanto en su composición química, su distribución y tamaño de las especies mineralógicas para producir en el proceso de calcinación componentes cementicios tales como silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio. La muestra de materia prima MP3 (conchuela C1B), es la que presenta como unidad las mejores características para la ejecución de la segunda etapa del estudio a escala piloto. Sin embargo, la utilización de una materia prima con una distribución poco homogénea de los compuestos silicatados, podría limitar la formación de fases hidráulicas durante la calcinación.

### **7.2.2.- *Formación de compuestos cementicios.***

Los análisis mineralógicos y la observación microscópica óptica permitieron definir que a temperaturas sobre 1000°C se obtuvo la formación abundante del componente cementicio silicato bicálcico denominado larnita que es fuertemente hidráulico.

La temperatura de formación de ese compuesto se observó en forma localizada en el Horno Vertical N°3 construido especialmente para el proyecto.

### **7.2.3.- *Propiedades físico-mecánicas de cal hidráulica.***

Se obtuvieron resistencias a la compresión de 18 y 36 kilos/cm<sup>2</sup> a los 28 días.

Debe señalarse que estos valores, aunque representan un aumento de la resistencia entre 46 y 177% respecto al producto actual, resultan claramente subvalorados debido a que el proceso de apagado de la cal viva para todos los materiales obtenidos a escala de laboratorio y planta piloto difieren y

resulta incompleto respecto al usado a escala industrial. En efecto, se estima que quedó un remanente de cal viva que con su poder expansivo contribuye fuertemente a disminuir las resistencias generando micro-fisuras en las probetas de prueba. El proceso industrial de fabricación del mortero da un tiempo mucho mayor para la mezcla con agua, por lo tanto, la resistencia del producto será significativamente mayor a esa escala.

### **7.3.- Fase industrial: De las pruebas de calcinación en horno vertical N°3 construido especialmente para el proyecto.**

El diseño de un horno vertical de baja altura y gran diámetro (5 metros de Diámetro y 4 metros de altura) resultó adecuado para calcinar los minerales de CPCAL.

Debe señalarse que los minerales de carbonato de calcio, denominados coquinas, resultan extraordinariamente blandos una vez calcinados y al tener la presión sobre yacente de los minerales crudos, se muelen provocando una disminución de tiraje que impide alcanzar la alta temperatura necesaria para la calcinación-clinkerización.

La obtención de cal viva con excelente grado de calcinación y abundante clinkerización demostraron las altas temperaturas logradas, en torno a los 1.000-1.150°C.

#### ***7.3.1.- Temperatura de calcinación***

De acuerdo a mediciones realizadas con termocuplas se constató que el horno puede alcanzar temperaturas entre 1000 y 1150 °C. Es posible extrapolar que en el contacto del carbón encendido con la capa de mineral sobreyacente se alcanzan temperaturas similares al horno de calcinación horizontal y que posibilitan la formación de compuestos con alto grado de hidraulicidad como el silicato bicálcico y silicato tricálcico.

#### **7.4.- Fase Industrial: De la producción de cal hidráulica en planta de tratamiento de cales CPCAL.**

##### *o Problemas operativos del procesamiento para producir Cal Hidráulica de alta resistencia*

###### a.- Molienda del Clinker

La cantidad de clinker obtenida en la calcinación realizada en horno N°3 representa un fuerte cambio en los parámetros de molienda y clasificación. Por ello fue necesario aumentar la capacidad y la fineza en el chancado y molienda mediante la puesta en operación de un nuevo molino de bolas de 5\*5 pie y además subir la fineza de la clasificación disminuyendo la velocidad de succión del clasificador aero gravitacional.

###### b.- Apagado y mezclado.

El nuevo proceso requerirá de un cuidadoso apagado y mezclado con el necesario tiempo de reposo. En efecto, las mayores temperaturas de calcinación, hacen que la cal viva resultante sea más difícil de apagar que la de producción actual. Este hecho es ampliamente recogido por la literatura con el nombre de “hard lime”.

Por otra parte, será necesario mezclar la cal viva, según se da cuenta en el punto siguiente, con probablemente dos componente puzolánicos en forma de lograr un producto homogéneo.

El proceso de apagado a escala menor es poco eficiente comparado con el proceso industrial. Sin embargo, a escala industrial también se observan algunas deficiencias derivadas de la operación misma, que se realiza cuantificando los componentes principalmente en volumen, mezclándolos con elementos mecánicos poco eficientes. Esto es susceptible de ser mejorado.



En consecuencia, será necesario que el proceso de apagado y mezclado sea sometido a un estricto control de calidad.

#### ***7.4.1.- Resultados físico-mecánicos.***

Las muestras A y B de las primeras pruebas alcanzaron resistencia a la compresión de 24 y 20 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente en tanto la muestra E de la segunda etapa alcanzo 25 kg/cm<sup>2</sup> a los 7 días y de 63 a los 28 días.

Los valores anteriores, a pesar de significar un gran incremento, se consideran subvalorados ya que se constató que las muestras tenían cal viva expansiva debido a dificultades en el apagado y mezclado y representan una importante disminución de la resistencia.

Las muestra B y C de la primera etapa alcanzaron retentividad de 73,8 y 94,5 %, cifras que aumentan la retentividad en un 23 y 57,5% respectivamente.

#### ***7.4.2.- Del agregado de productos puzolánicos.***

Los resultados de las pruebas demuestran la necesidad de mezclar cal viva clinkerizada con productos puzolánicos para lograr optimizar la resistencia a la compresión y la retentividad.

Esta información confirma la referencia bibliográfica N°56 según la cual mezclando cal hidratada con puzolanas italianas se obtuvieron resistencias de 450 kg/cm<sup>2</sup> para una muestra sometida durante 28 días a una temperatura de 40°C.

Por nuestra parte se obtuvieron resistencias a los 7 días de 46 y 71 kg/cm<sup>2</sup> para mezclas de cenizas volantes y cal pura respectivamente.

La puzolana IV Región dio resistencias a los 7 días de 77,5 kg/cm<sup>2</sup>.

Las cifras anteriores permiten asegurar que la mezcla de cal viva clinkerizada adecuadamente apagada con puzolana permitirá alcanzar resistencias a la compresión del orden de 100 kg/cm<sup>2</sup>.

La adición de puzolana y/o cenizas tiende a mejorar la resistencia mecánica del producto final. Sin embargo, como desarrollo futuro, la dosificación debería ser cuidadosamente optimizada para alcanzar la resistencia máxima.

## **7.5.- Conclusiones Generales del proyecto.**

### ***7.5.1.- Cal hidráulica de alta resistencia y alta retentividad, Char 2.***

El proyecto de Investigación tecnológica desarrollado permite concluir la factibilidad técnica económica de fabricar Cal Hidráulica de alta resistencia y alta retentividad.

La resistencia a la compresión alcanzable está en el rango de 50 a 100 kg/cm<sup>2</sup>. La retentividad alcanzable esta en el rango de 75-90%.

La producción de Char 2 requerirá producir cal viva con alto grado de clinkerización que deberá apagarse y mezclarse con cenizas volantes y puzolanas en una proporción aproximada de 50, 25 y 25% respectivamente.

La optimización de este proceso permitirá llegar a resistencias sobre 100 kg/cm<sup>2</sup>.

### ***7.5.2.- Mineral y puzolana para cal hidráulica de alta resistencia y alta retentividad.***

El mineral elegido es adecuado para producir Char 2

Las reservas de mineral son suficientes para plantear un proyecto de gran envergadura. También se dispone de materiales puzolánicos y de abastecimiento de cenizas volantes, para realizar las mezclas convenientes.

### ***7.5.3.- Hornos de calcinación vertical N°3.***

El horno construido especialmente para el proyecto es adecuado para realizar la calcinación requerida por el producto.

Hasta realizar nuevas investigaciones se postula que cualquier aumento de producción sería sobre la base de construir nuevos hornos iguales al desarrollado.

### ***7.5.4.- Planta de procesamiento de cales***

La planta con las implementaciones realizadas permite procesar el producto en forma conveniente.

Será indispensable desarrollar un sistema de Control de Calidad de todo el proceso, incluyendo mina, horno y planta que asegure la homogeneidad y calidad del producto.

Los experimentos realizados a nivel industrial hasta la fecha, son concluyentes con los antecedentes que se dispone en el sentido que el proyecto es factible técnica y económicamente. Sin embargo se debe mejorar el dominio real del manejo del horno, y por otra, que las dosificaciones y operaciones específicas para obtener el material propuesto deben ser optimizadas en relación al nuevo producto calcinado (cal con inclusiones silico calcáreas)

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- “Chemistry and Technology of lime and limestone ”  
Robert S. Boyton.  
John Wiley. 1980.
- 2.- “SME Mineral Processing Handbook ”  
Section 26. Portland Cement.  
S.W. Mudd. Series. 1985
- 3.- “Building Limes ”  
Norma DIN 1060.
- 4.- “Chaux Hydrauliques Naturelles XHN ”  
Norma Francesa : NF P 15-310. 1969.
- 5.- “Chaux Hydraulique Artificieelles XHA.”  
Norma Francesa NF P 15- 312. 1969.
- 6.- “Influence of the Fineness of Pozzolan on the strength of Lime Natural-  
Pozzolan Cement Paste”.  
Robert L. Day y Caijan Shi.  
Cement and Concrete Research, Vol. 24. 1994.
- 7.- “Estudio Experimental de la Adherencia entre mortero y bloques de  
hormigón”.  
Atilano Lamana, Federico Delfín, y Marcelo Bullemore.  
Revista IDIEM , vol. 9, n° 1. 1970.
- 8.- “Adherencia entre Mortero y Bloques de Hormigón: influencia de  
diferentes variables”.  
Revista del IDIEM , vol 9, n° 2. 1970.

- 9.- “Cales hidráulicas con componentes puzolánicos”  
Joaquín Porrero.  
Revista IDIEM, vol 4, N° 3. 1965.
- 10.- “La Carbonatación de la pasta hidratada de cemento Pórtland.  
Interpretación físico-química”.  
J.M. Fernández París.  
Instituto Eduardo Torroja n° 310, 1973.
- 11.- “Carbonation of Lime Putties to produce High Grade Buildings Units”  
Nissan Zalmanoff.  
Rock Products, 1956.
- 12.- “Parpaings en terre stabilisée a la chaux”.  
J.R. Coat.  
Batiment International 1979.
- 13.- “Test of Structural Bond of Mansonry Mortars to Concrete Block”  
R.E. Copeland y Edwin L. Saver.  
Journal of the American Concrete Institute. 1964.
- 14.- “Noveau Trauté de Chimie Industrielle”  
Wagner y L.Gautier. 1878.
- 15.- “Cementos Puzolánicos”  
José Calleja,  
Instituto Eduardo Torroja., 1978
- 16.- “X Jornadas Chilenas de Hormigón ”  
Varios Autores.  
IDIEM 1994.

- 17.- “El uso de la Cal en la Construcción. Proposición de norma para Control de Calidad ”  
Margarita Moya Olmedo.  
Memoria para optar al título de Ingeniero Civil U.de Ch. 1984.
- 18.- “Estudio Experimental de Morteros para Albañilería”  
Memoria para optar al título de Ingeniero Civil U.de Ch. 1980..  
Miguel Muñoz Parada y Jorge Nusser Arend.
- 19.- “Propiedades físico-químicas de Suelos Finos tratados con Cal”  
Miguel Carrasco Pacheco.  
Memoria para optar al título de Ingeniero Civil U.de Ch. 1982.
- 20.- “Introducción al estudio e las Puzolanas Chilenas”.  
Eduardo Alvarez Arnold.  
Memoria para optar al título de Ingeniero Civil U.de Ch. 1979.
- 21.- “Tecnología de la Calcinación de la Cal ”  
Florian Scharzkoph.  
Ingeniería Industrial Anahuac S.A. de C.V, México 1975.
- 22.- “La Cal Hidráulica como Aglomerante en Construcción”  
Hernán Arnes Valencia.  
Memoria para optar al Título de Constructor Civil U. de Ch. 1973.
- 23.- “Le Traitement de Soil a la Chaux et au Ciment ”  
Michael Venuat. Cerril 1980.
- 24.- “Industrie de la Chaux, du Ciment et du Platre ”  
M. Papadakis y M.Venuat Dunod 1970.
- 25.- “Cal Hidráulica. Propiedades y Aplicación en morteros de albañilería”

Alberto Bucicardi, Nelson Murúa y Rodrigo Téllez.

Memoria para optar al Título de Constructor Civil U.de C. 1972

26.- “Estudio comparativo de las mezclas de cemento y cal”.

Alejandro Mujica Mesa.

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil U.de Ch. 1920.

27.- “Acción de la Cal Hidratada como Reductor del Endurecimiento de los  
Asfaltos ”.

Hernán Hernández Mesa.

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil U.de Ch. 1992

28.- “Producción de Áridos para Hormigón a partir de Cenizas Volantes”

René Ossandón Moreira.

Memoria para optar al Título de Técnico Universitario U.de Ch. 1988.

29.- “Estudio físico-químico y técnico de diversos tipos de Cenizas y su  
empleo en la Construcción ”

Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción. 1989

30.- “Cement, Limes and Plasters ”

Edwin Eckel

John Wiley 1928.

31.- “Manual del Mortero ”

Hernán Zabaleta y Juan Egaña

Instituto Chileno del Cemento y Hormigón, 1989.

32.- “Albañilerías Armadas de Bloques ”

Hernán Zabaleta.

Instituto Chileno del Cemento y Hormigón, 1991

- 33.- “Manual del Hormigón Premezclado ”.
- Asociación Chilena de Empresas Productoras de Hormigón  
Premezclado A.G. 1994
- 34.- “Manual de Ensayos- Áridos y Hormigón ”
- Instituto Chileno del Cemento y Hormigón 1989.
- 35.- “Manual de Hormigón”
- Instituto Chileno del Cemento y Hormigón 1989.
- 36.- “Manual de Aditivos ”
- Hernán Zabaleta y Jorge Montegu  
Instituto Chileno del Cemento y Hormigón 1990.
- 37.- “Compendio de Tecnología del Hormigón ”
- Hernán Zabaleta  
Instituto Chileno del Cemento y Hormigón 1988.
- 38.- “Incidencia del método de curado en el comportamiento mecánico  
obtenido en probetas de mortero expuestas a diferentes condiciones  
ambientales”
- Renato Vargas, Arnoldo Bucarey y Roberto Combeau. 1986
- 39.- “Dosificación de Morteros ”
- Armando Soto Olivares,  
IV Jornadas Chilenas de Hormigón. 1982



## **ANEXO**

## **ANEXO N° 1 : GRÁFICOS Y TABLAS FASE LABORATORIO**

File Name..... SUPROCAL.FRD	Data Type..... Raw
Operator..... A. URRUTIA	Moving Point Avg.... 41
Sample ID..... SUPROCAL	Sample Density..... 2.402000 g/cc
Sample Description..	

**Mass Cumulative/Histogram**

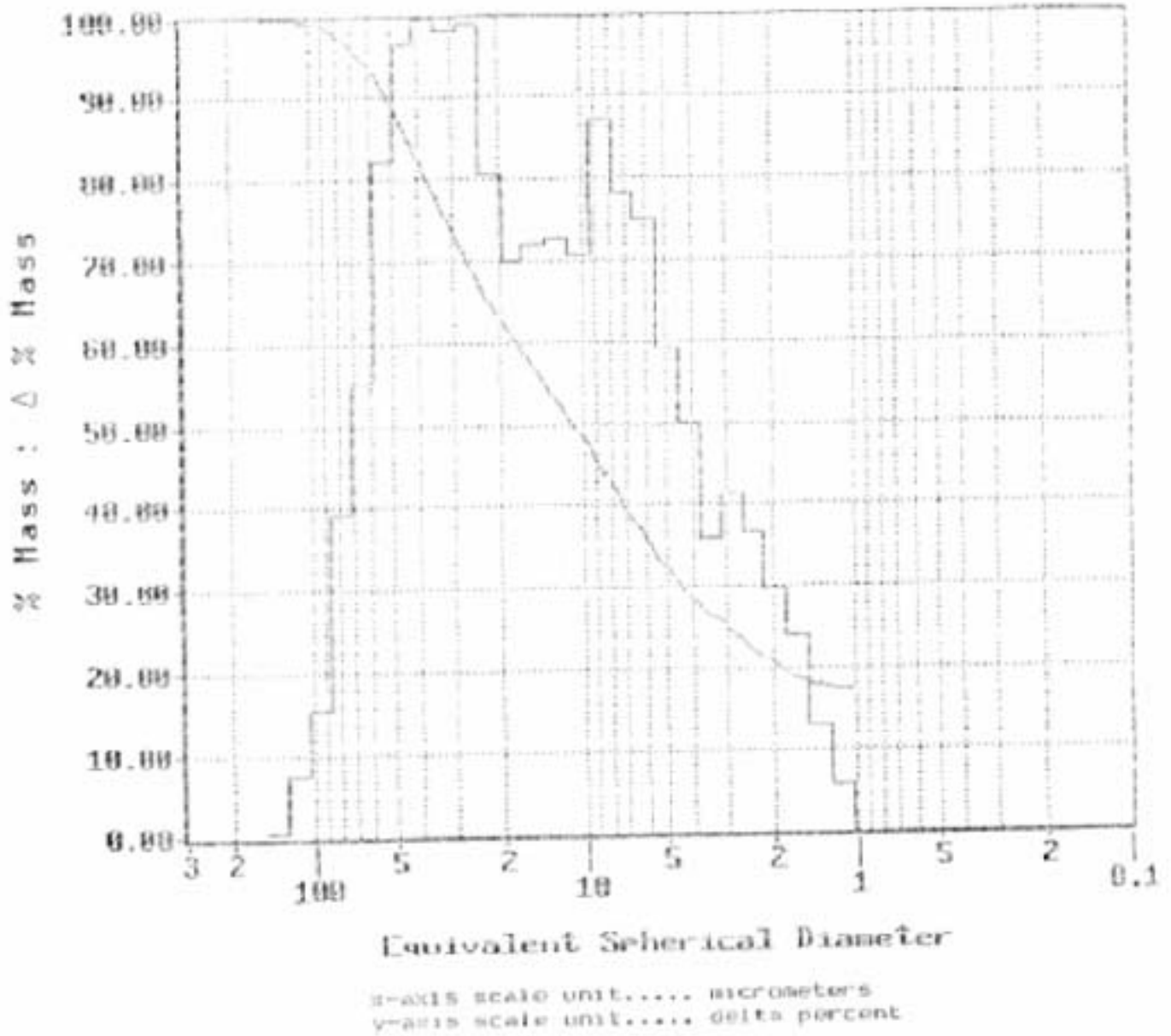
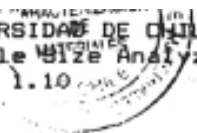


Figura 1.



I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
 Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report  
 Version 1.10



File Name.....	DAL-CPC.MRD	Data Type.....	Raw
Operator.....	A. ORTIZ	Moving Point Avg....	41
Sample ID.....	DAL-CPC	Sample Density.....	2.542000 g/cc
Sample Description..			

Mass Cumulative/Histogram

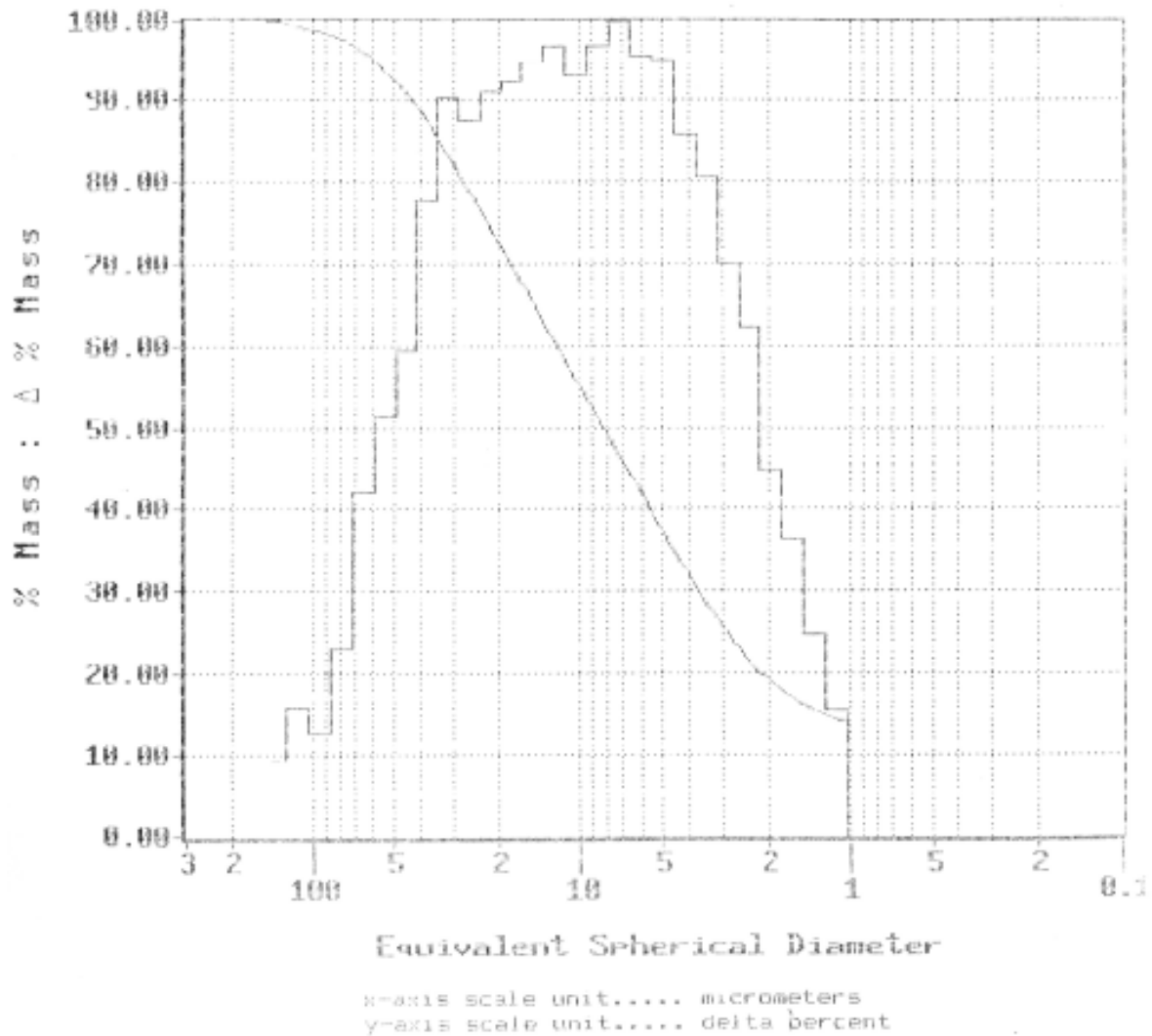


Figura 3.

**I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report**  
 Version 2.10



File Name..... CAL-CPC.MRD                      Data Type..... Raw  
 Operator..... A. ORTIZ                              Moving Point Avg.... 41  
 Sample ID..... CAL-CPC                              Sample Density..... 2.542000 g/cc  
 Sample Description..

**Interpolated % Mass vs. Diameter**

Percent Mass % finer	Equivalent Spherical Diameter micrometers
19.04	2.000
25.74	3.000
31.89	4.000
37.15	5.000
41.97	6.000
45.87	7.000
49.50	8.000
52.55	9.000
55.20	10.000
72.70	20.000
82.38	30.000
88.89	40.000
92.52	50.000
95.02	60.000
96.79	70.000
97.82	80.000
98.30	90.000
98.66	100.000
99.00	110.000
99.37	120.000
99.74	130.000
99.97	140.000
100.00	150.000

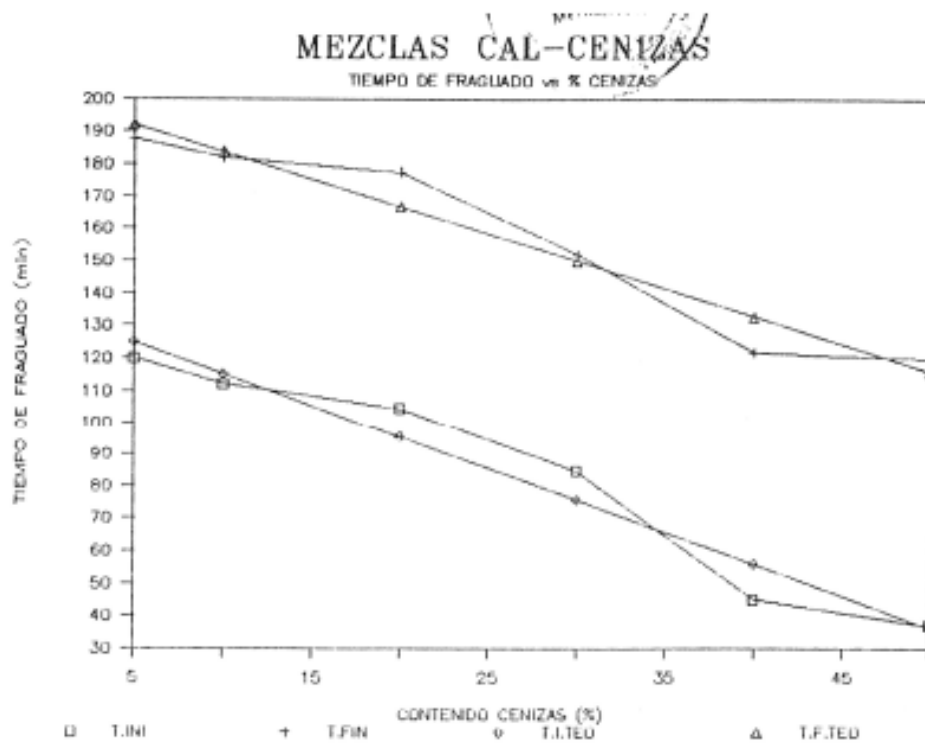


Figura 5.

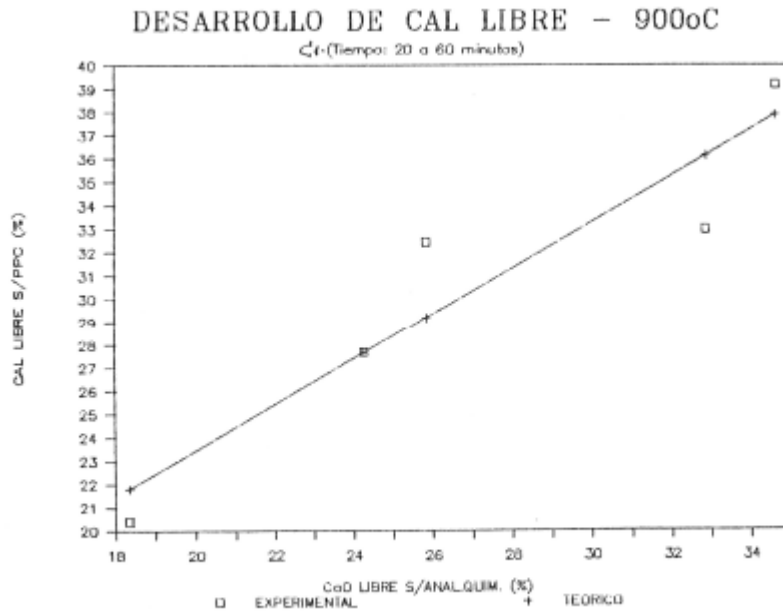


Figura 6

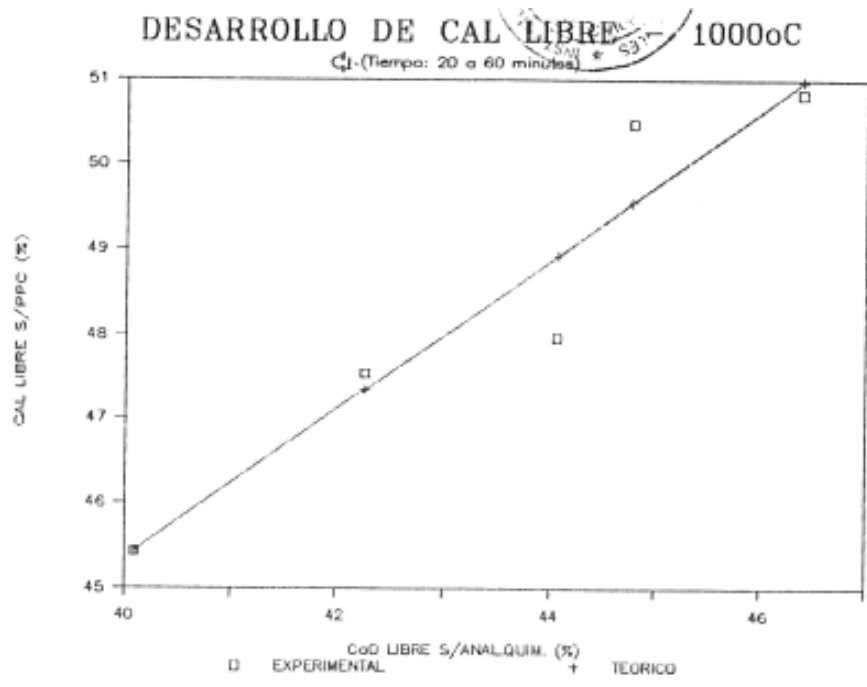


Figura 7.

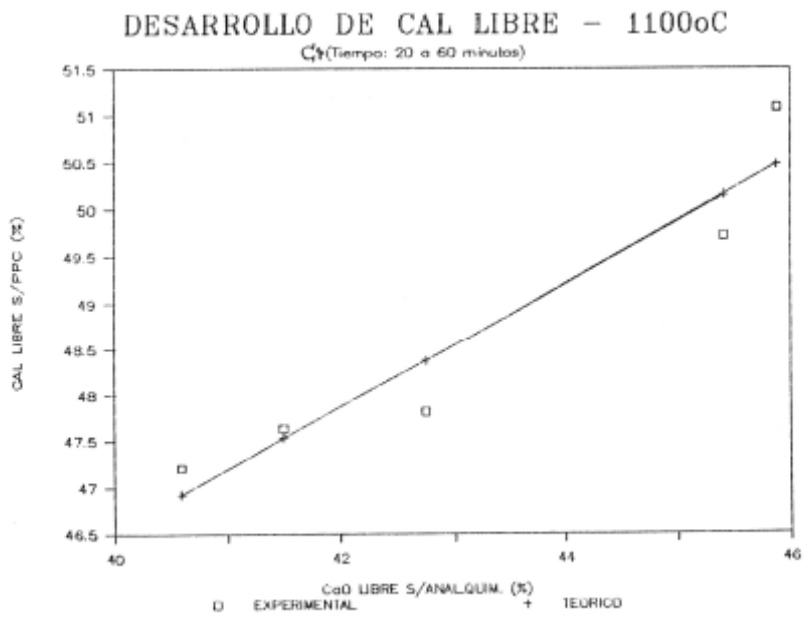


Figura 8.



### DESARROLLO DE CAL LIBRE - 900oC

C1B (Tiempo: 20 a 60 minutos)

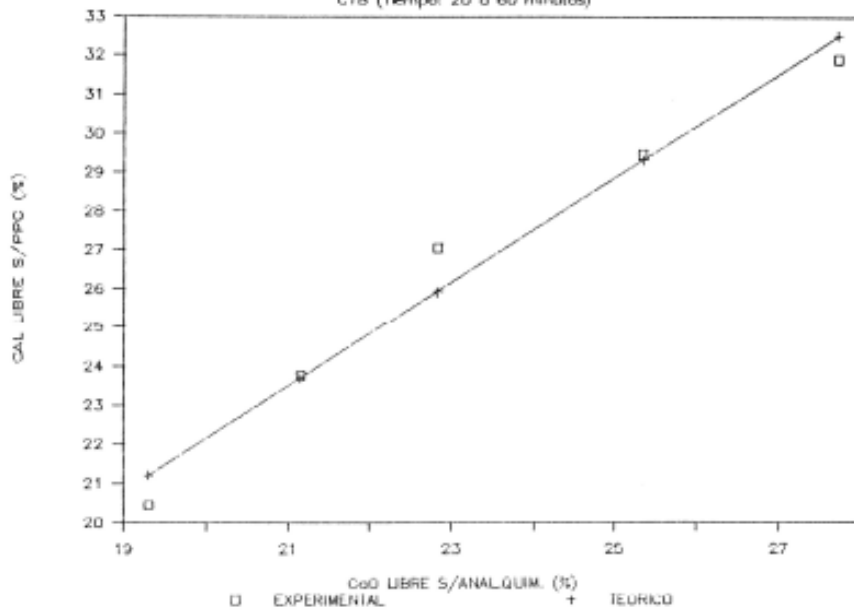
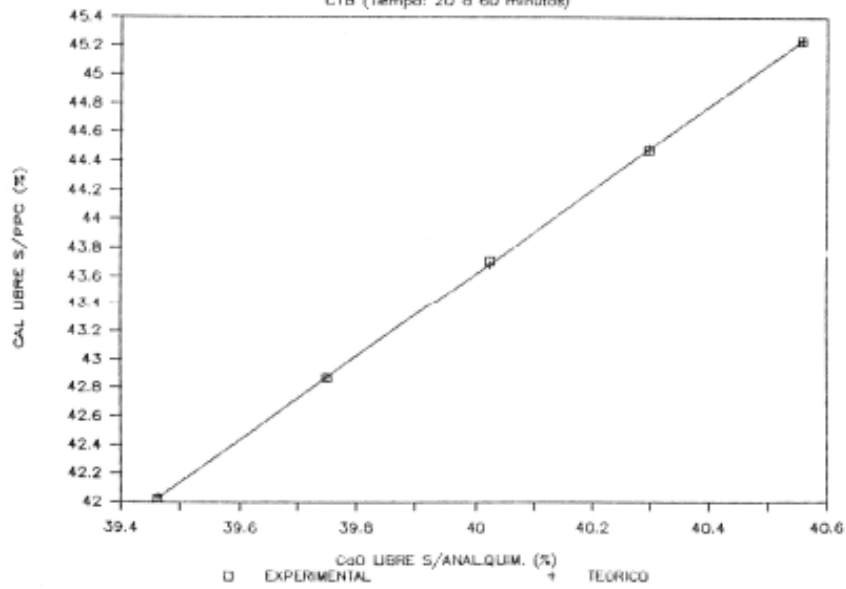


Figura 9.

### DESARROLLO DE CAL LIBRE - 1000oC

C1B (Tiempo: 20 a 60 minutos)



## DESARROLLO DE CAL LIBRE 1100oC

C18 (Tiempo: 20 a 60 minutos)

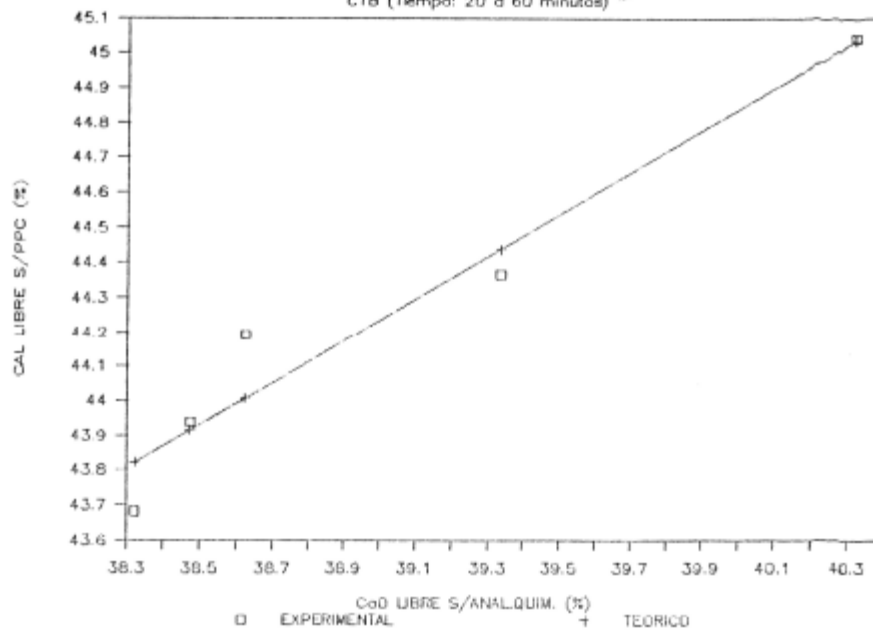
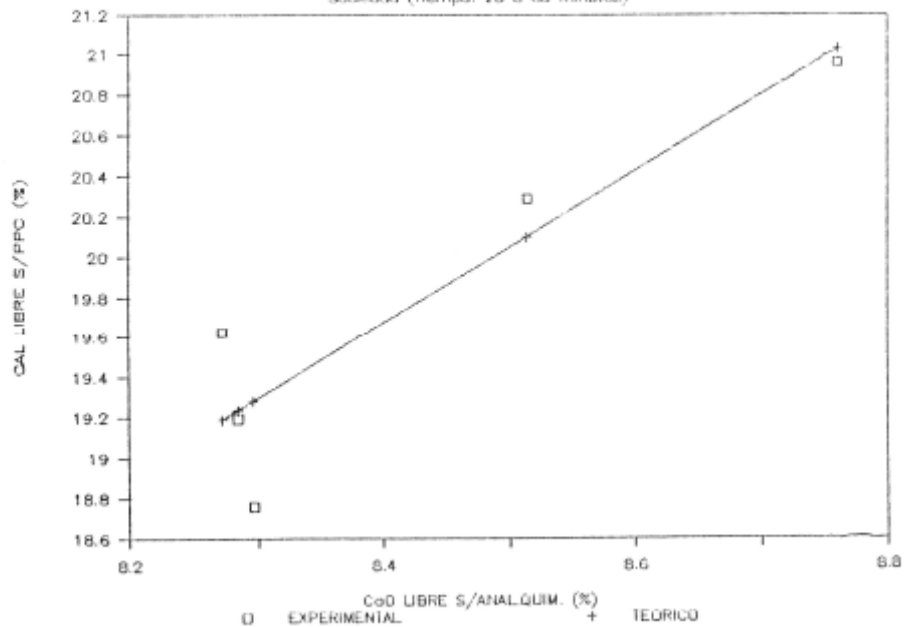


Figura 11.

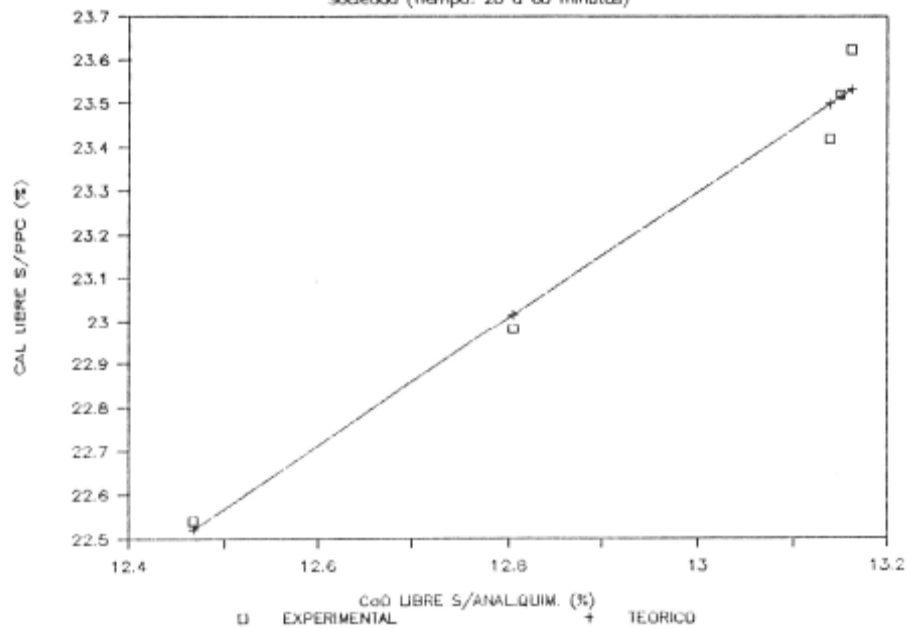
## DESARROLLO DE CAL LIBRE - 900oC

Sociedad (Tiempo: 20 a 60 minutos)



## DESARROLLO DE CAL LIBRE <sup>60 1710</sup> - 1000oC

Sociedad (Tiempo: 20 a 60 minutos)

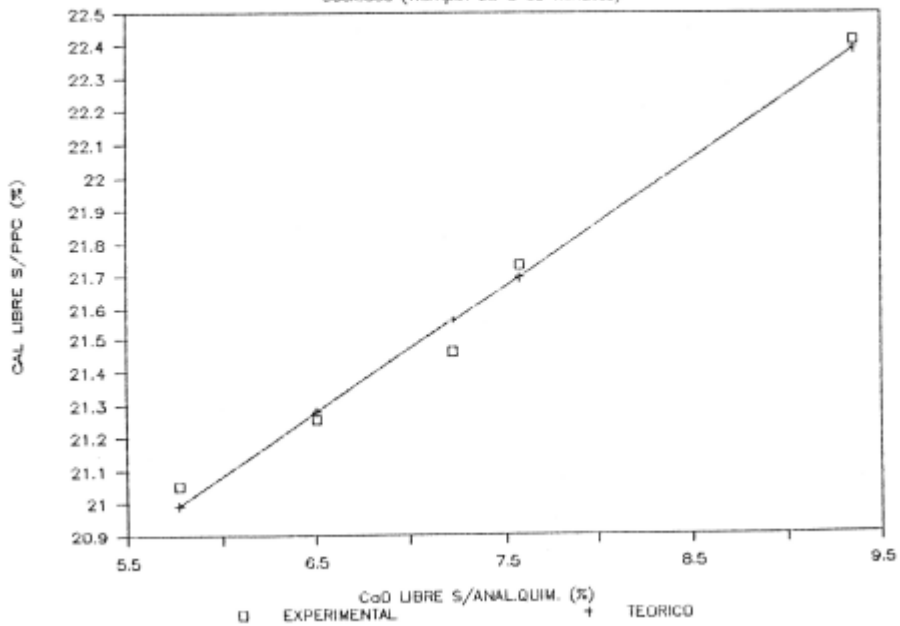


Ofigura 13.

Figura 13.

## DESARROLLO DE CAL LIBRE - 1100oC

Sociedad (Tiempo: 20 a 60 minutos)



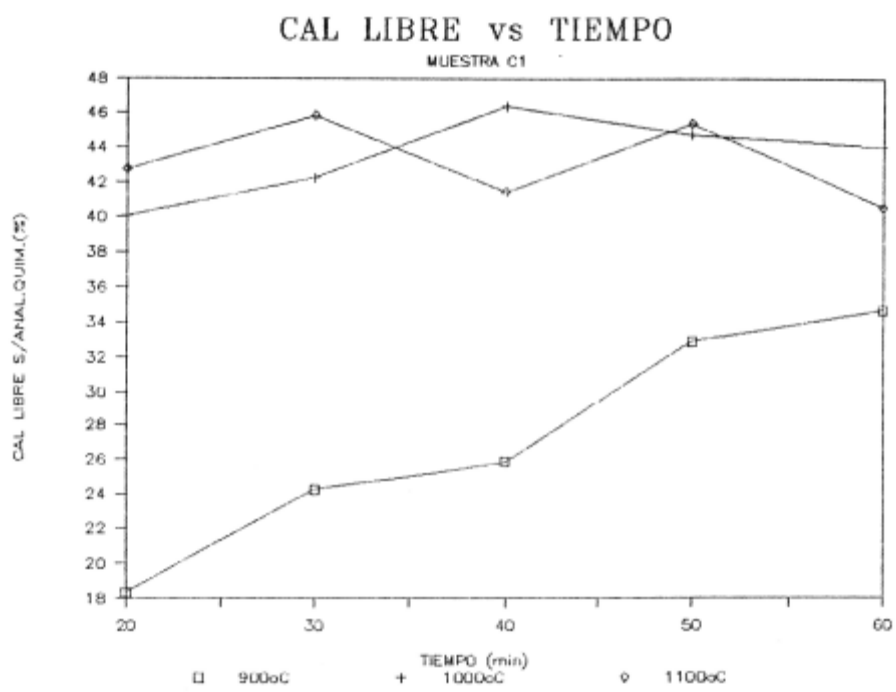
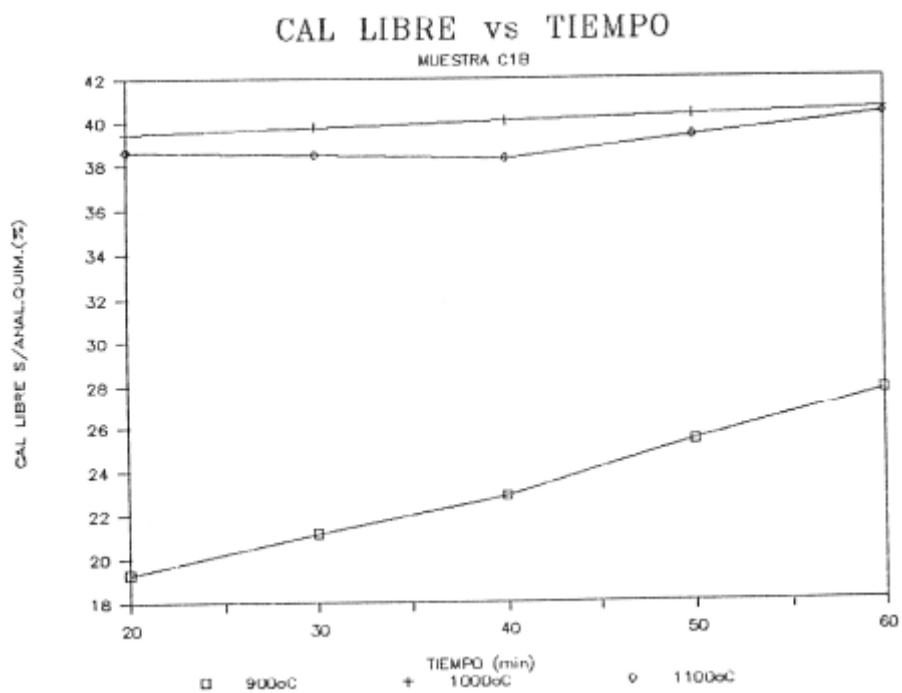


Figura 15.



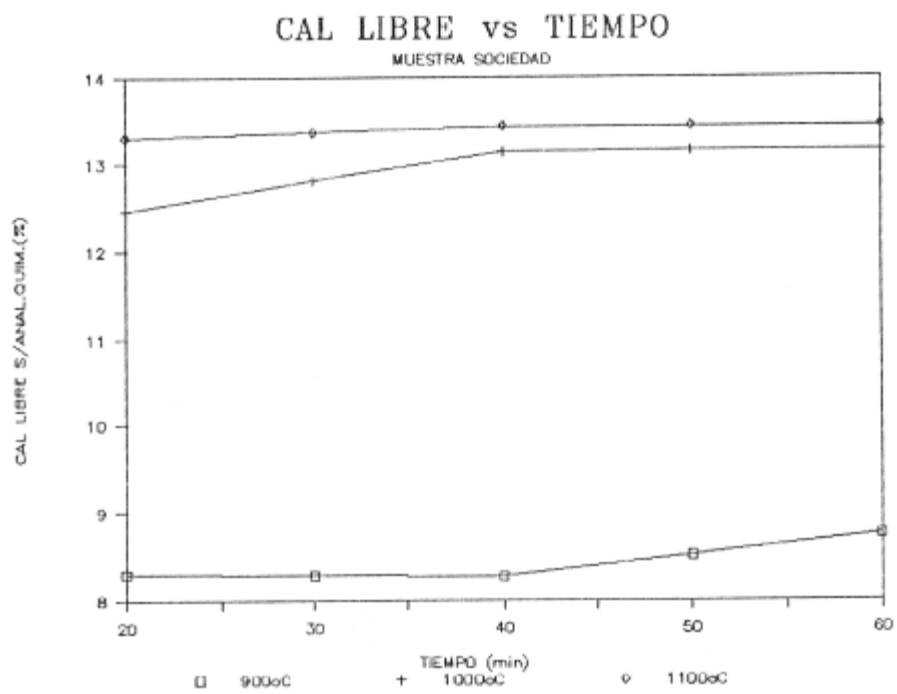
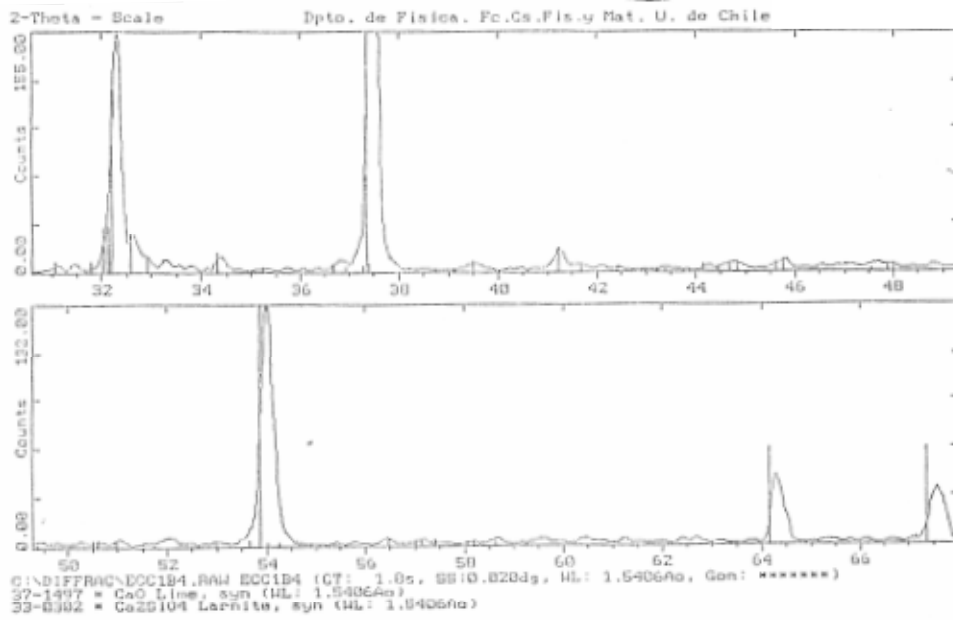


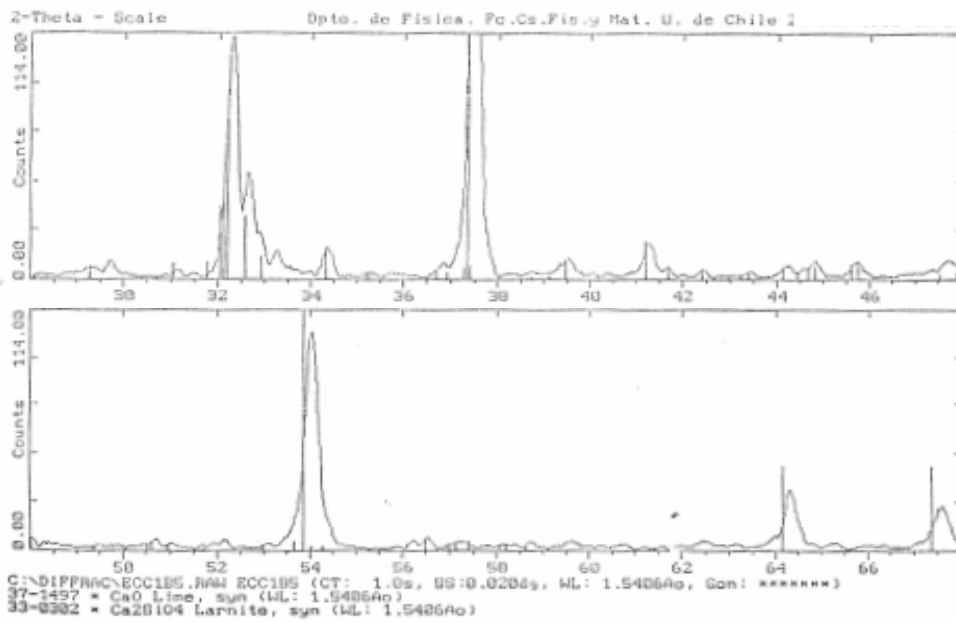
Figura 17.

## **ANEXO N° 2 : GRÁFICOS Y TABLAS FASE PILOTO E INDUSTRIAL**



CAL CRB 1400°C 30'  
(4)

Gráfico 1.



CAL CRB 1400°C 50'  
(5)

Gráfico 2.

File Name..... CAL-MI.MRD                      Data Type..... Raw  
 Operator..... A. ORTIZ                          Moving Point Avg.... 41  
 Sample ID..... CAL-MI                          Sample Density..... 2.540000 g/cc  
 Sample Description.. CAL GRUESA M-1

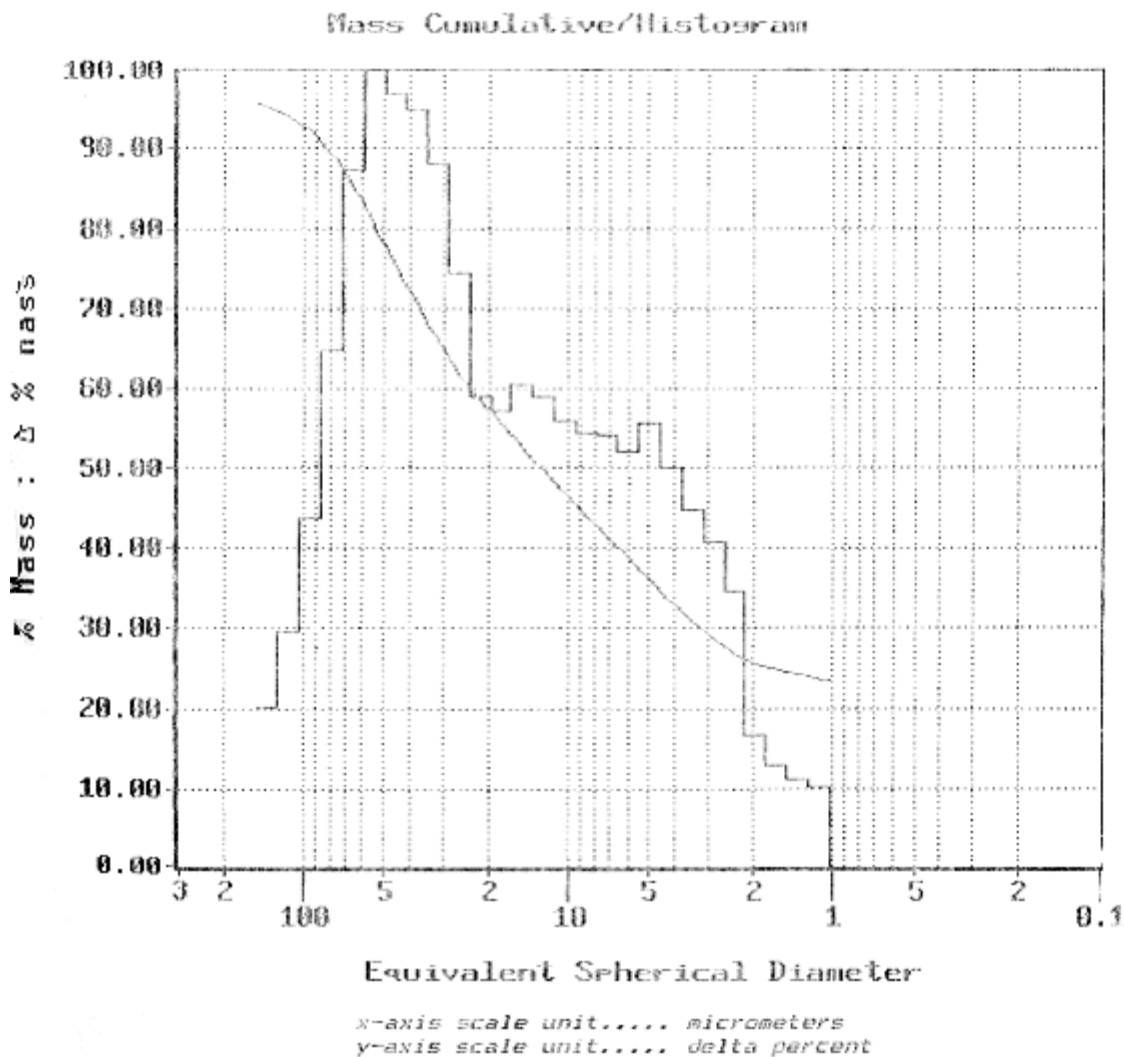


Gráfico 3.



I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
 Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report  
 Version 1.10



File Name..... CAL-M1.MRD                      Data Type..... Raw  
 Operator..... A. GRTIZ                          Moving Point Avg.... 41  
 Sample ID..... CAL-M1                          Sample Density..... 2.540000 g/cc  
 Sample Description.. CAL GRUESA M-1

**Interpolated % Mass vs. Diameter**

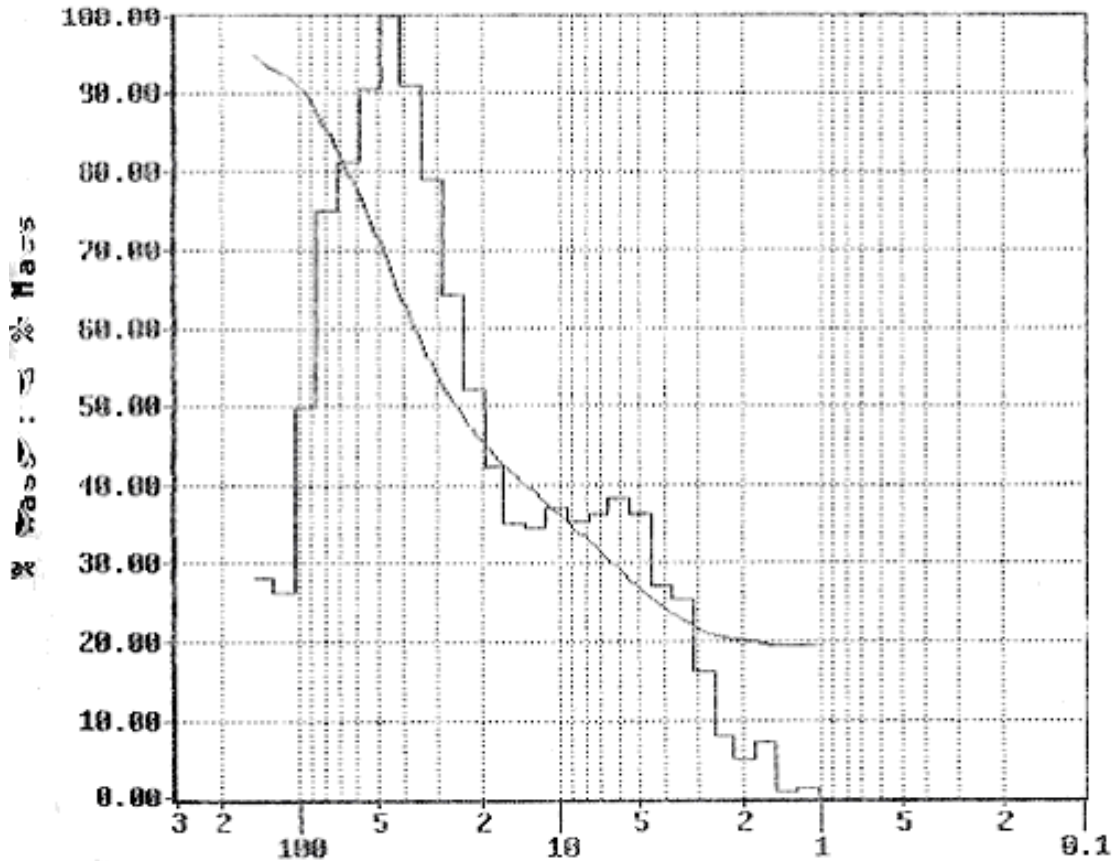
Percent Mass % finer	Equivalent Spherical Diameter micrometers
25.53	2.000
29.27	3.000
32.83	4.000
36.07	5.000
38.77	6.000
41.00	7.000
42.99	8.000
44.74	9.000
46.35	10.000
57.44	20.000
65.14	30.000
72.42	40.000
78.34	50.000
83.30	60.000
87.08	70.000
89.60	80.000
91.56	90.000
92.80	100.000
93.59	110.000
94.30	120.000
94.89	130.000
95.31	140.000
95.61	150.000

I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report  
Version 1.10



File Name..... CAL-M2.MRD                      Data Type..... Raw  
Operator..... A. ORTIZ                            Moving Point Avg.... 41  
Sample ID..... CAL-M2                            Sample Density..... 2.540000 g/cc  
Sample Description.. CAL FINA M-2

Mass Cumulative/Histogram



Equivalent Spherical Diameter

x-axis scale unit..... micrometers  
y-axis scale unit..... delta percent

Gráfico 4.

I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
 Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report  
 Version 1.10



File Name..... CAL-M2.MRD                      Data Type..... Raw  
 Operator..... A. GRTIZ                          Moving Point Avg.... 41  
 Sample ID..... CAL-M2                          Sample Density..... 2.540000 g/cc  
 Sample Description.. CAL FINA N-2

**Interpolated % Mass vs. Diameter**

Percent Mass % finer	Equivalent Spherical Diameter micrometers
20.09	2.000
21.51	3.000
24.10	4.000
26.62	5.000
29.16	6.000
31.30	7.000
33.03	8.000
34.55	9.000
35.95	10.000
45.43	20.000
54.40	30.000
63.44	40.000
71.56	50.000
77.57	60.000
82.16	70.000
85.98	80.000
89.00	90.000
90.68	100.000
91.95	110.000
92.75	120.000
93.44	130.000
94.14	140.000
94.96	150.000



I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report  
Version 1.10

File Name..... CAL-MS.MRD                      Data Type..... Raw  
Operator..... A. BRTIZ                            Moving Point Avg.... 41  
Sample ID..... CAL-MS                            Sample Density..... 2.470000 g/cc  
Sample Description.. CAL/CENIZA M-E CAFLY

Mass Cumulative/Histogram

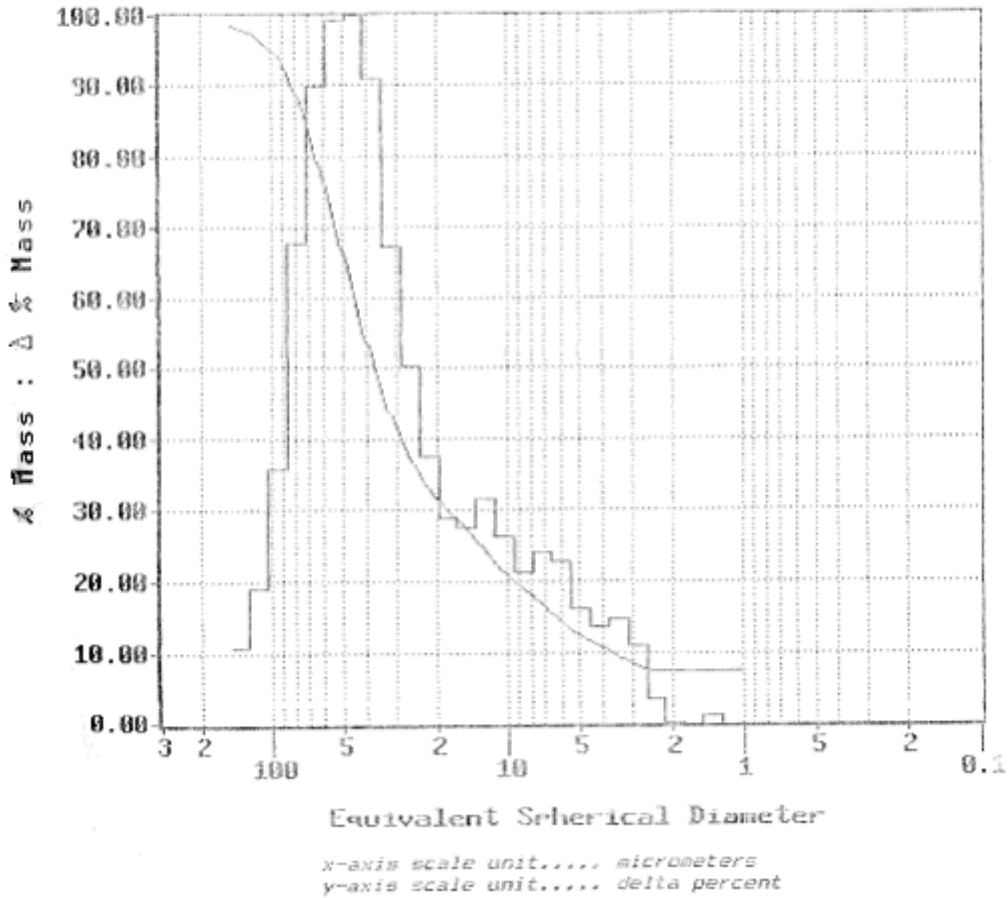


Gráfico 5.

**I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report**  
**Version 1.10**

File Name.....	CAL-M3.MRD	Data Type.....	Raw
Operator.....	A. ORTIZ	Moving Point Avg....	41
Sample ID.....	CAL-M3	Sample Density.....	2.470000 g/cc
Sample Description..	CAL/CENIZA M-E CAFLY		

**Interpolated X Mass vs. Diameter**

Percent Mass % finer	Equivalent Spherical Diameter micrometers
7.30	2.000
8.40	3.000
10.66	4.000
12.32	5.000
14.31	6.000
16.32	7.000
18.03	8.000
19.39	9.000
20.63	10.000
31.56	20.000
41.71	30.000
54.29	40.000
66.39	50.000
76.21	60.000
83.83	70.000
89.33	80.000
92.90	90.000
94.87	100.000
96.06	110.000
96.94	120.000
97.56	130.000
98.04	140.000
98.33	150.000



File Name..... CAL-4.DSD  
 Operator..... M. OJEDA  
 Sample ID..... CAL-4  
 Sample Description.. PIEDRA 0

Date of Measurement: Sep  
 Sample Density..... 2.540000 g/cc

Mass Cumulative/Histogram

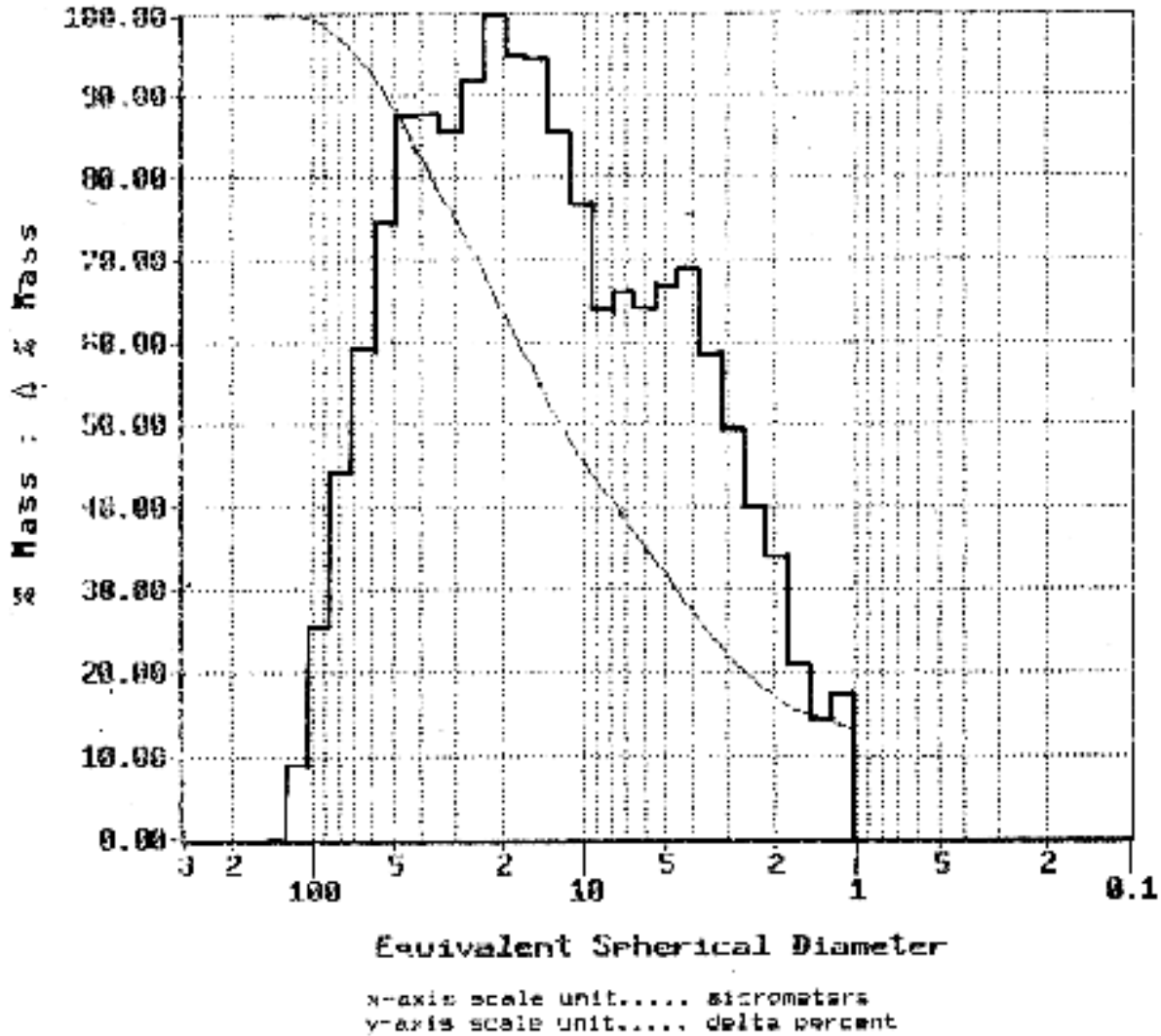


Gráfico 6.

I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
 Quantachrome Microscan Particle Size Analyser Data Report  
 Version 1.10



File Name..... CAL-A.MRD                      Data Type..... Raw  
 Operator..... G. BRTIZ                      Moving Point Avg.... 41  
 Sample ID..... CAL-A                      Sample Density..... 2.540000 g/cc  
 Sample Description.. MUESTRA A

Interpolated % Mass vs. Diameter

Percent Mass	Equivalent Spherical Diameter
µm Filter	micrometers
17.05	2.000
22.09	3.000
27.17	4.000
31.79	5.000
35.28	6.000
38.70	7.000
40.00	8.000
43.14	9.000
45.28	10.000
48.78	20.000
73.20	30.000
82.66	40.000
88.49	50.000
92.52	60.000
95.27	70.000
97.21	80.000
98.54	90.000
99.21	100.000
99.77	110.000
99.90	120.000
100.00	130.000
100.00	140.000
100.00	150.000

I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
 Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report  
 Version 1.10



File Name..... CAL-92.N99                      Date Type..... Raw  
 Operator..... A. ORTIZ                          Moving Point Avg.... 41  
 Sample ID..... CAL-92                            Sample Density..... 2.540000 g/cc  
 Sample Description.. NUESTRA 02

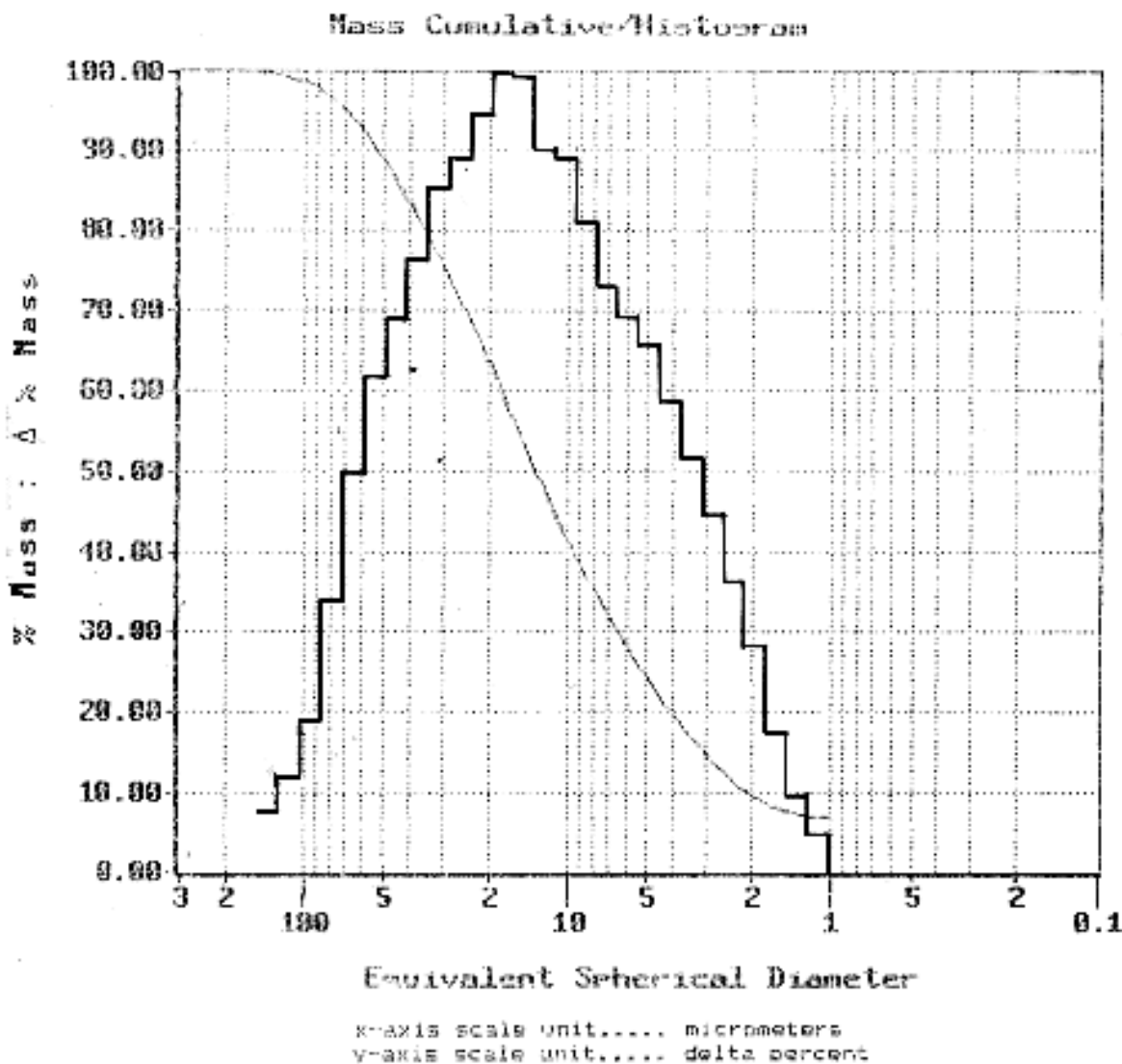


Gráfico 7.



I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
 Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer  
 Version 1.10



File Name..... DAL-42.MFD                      Data Type..... Raw  
 Operator..... A. ORTIZ                          Moving Point AVG.... 41  
 Sample ID..... DAL-42                          Sample Density..... 2.540000 g/cc  
 Sample Description.. NUESERA 42

Interpolated % Mass vs. Diameter

Percent Mass % finer	Equivalent Spherical Diameter micrometers
9.60	2.000
14.72	3.000
19.70	4.000
24.37	5.000
28.43	6.000
32.11	7.000
35.40	8.000
38.54	9.000
41.57	10.000
43.59	20.000
45.52	30.000
46.64	40.000
48.01	50.000
49.56	60.000
51.19	70.000
52.67	80.000
54.09	90.000
55.63	100.000
57.04	110.000
58.40	120.000
59.69	130.000
60.92	140.000
62.00	150.000

I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
Quantachrome Microscan Particle Size Analyser  
Version 1.10



File Name.....	CAL-8.000	Data type.....	Raw
Operator.....	A. OPTIZ	Flowing Point Avg....	41
Sample ID.....	CAL-8	Sample Density.....	2.540000 g/cc
Sample Description..	MUESTRA B		

### Mass Cumulative/Histogram

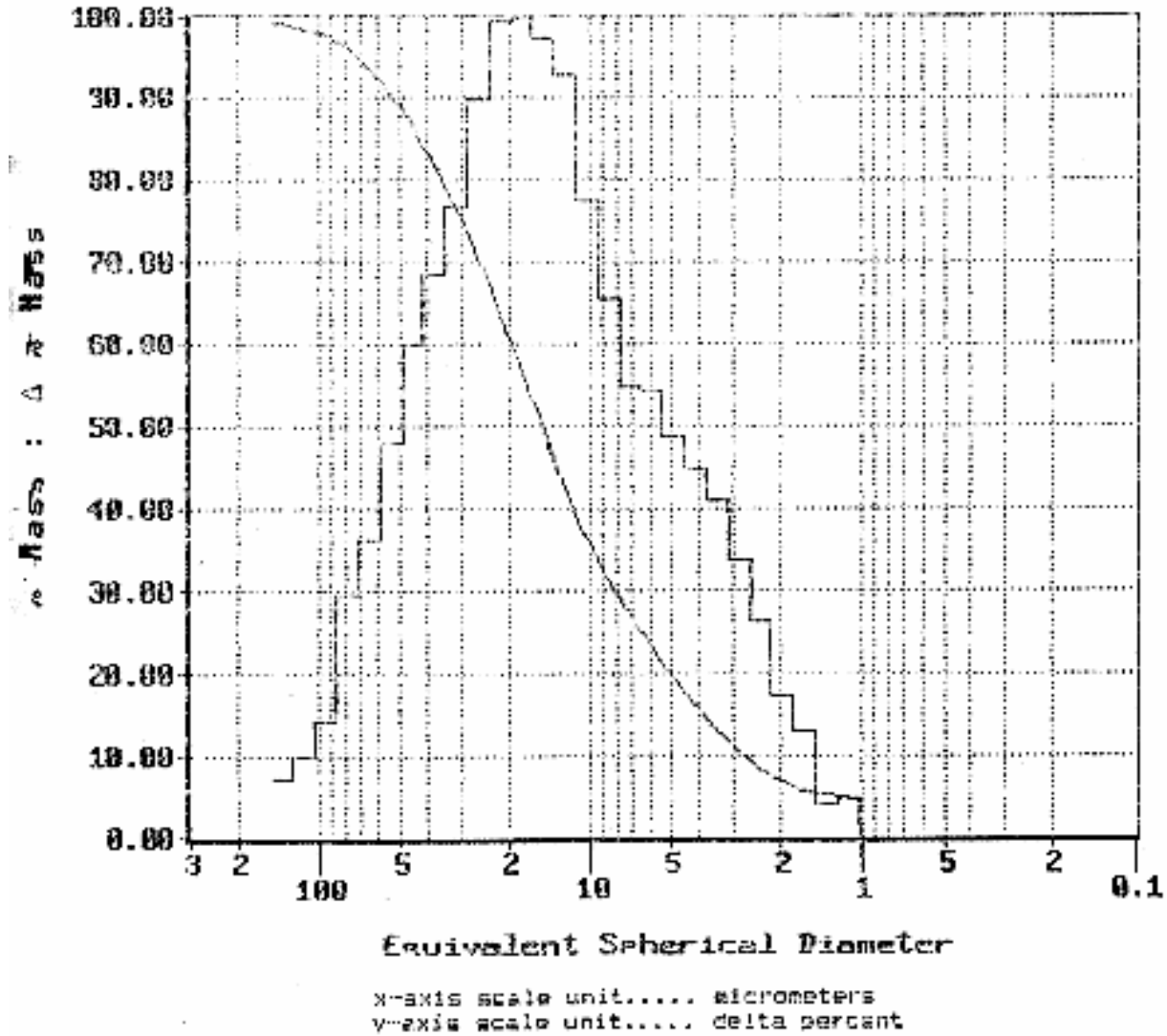


Gráfico 8.

**I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report**  
**Version 1.10**



File Name..... CAL-B.MRD  
 Operator..... A. URTIZ  
 Sample ID..... CAL-B  
 Sample Description.. MUESTRA B

Date Type..... Raw  
 Moving Point Avg.... 41  
 Sample Density..... 2.540000 g/cc

**Interpolated % Mass vs. Diameter**

Percent Mass % finer	Equivalent Spherical Diameter micrometers
6.82	2.000
11.09	3.000
15.71	4.000
19.66	5.000
23.45	6.000
26.68	7.000
29.61	8.000
32.57	9.000
35.30	10.000
60.33	20.000
75.54	30.000
83.67	40.000
88.95	50.000
92.34	60.000
94.54	70.000
96.24	80.000
97.32	90.000
97.87	100.000
98.24	110.000
98.58	120.000
98.87	130.000
99.07	140.000
99.24	150.000

**I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report**  
**Version 1.10**



File Name.....	CYL-1.M02	File Type.....	Raw
Operator.....	A. OSTIZ	Normal Point Ang....	90
Sample ID.....	CYL-0	Sample Density.....	2.540000 g/cc
Sample Description..	MAGNETA 0		

Mass Cumulative/Histogram

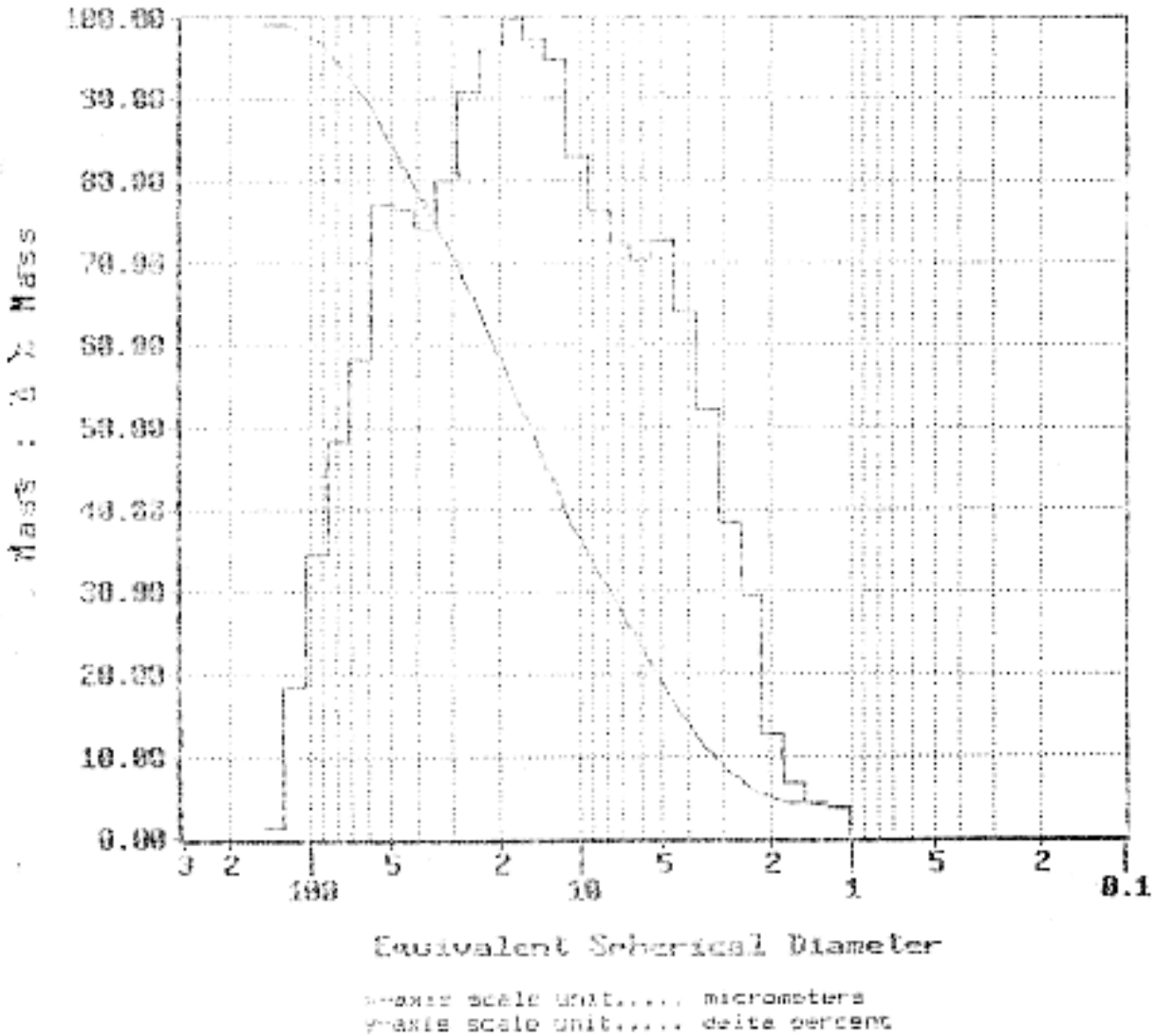


Gráfico 9.

I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
 Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report  
 Version 1.10

File Name..... CAL-C.MKD                      Data Type..... Raw  
 Operator..... R. ORTIZ                      Moving Point Avg.... 41  
 Sample ID..... CAL-C                      Sample Density..... 2.540000 g/cc  
 Sample Description.. PLASTER C

**Interpolated % Mass vs. Diameter**

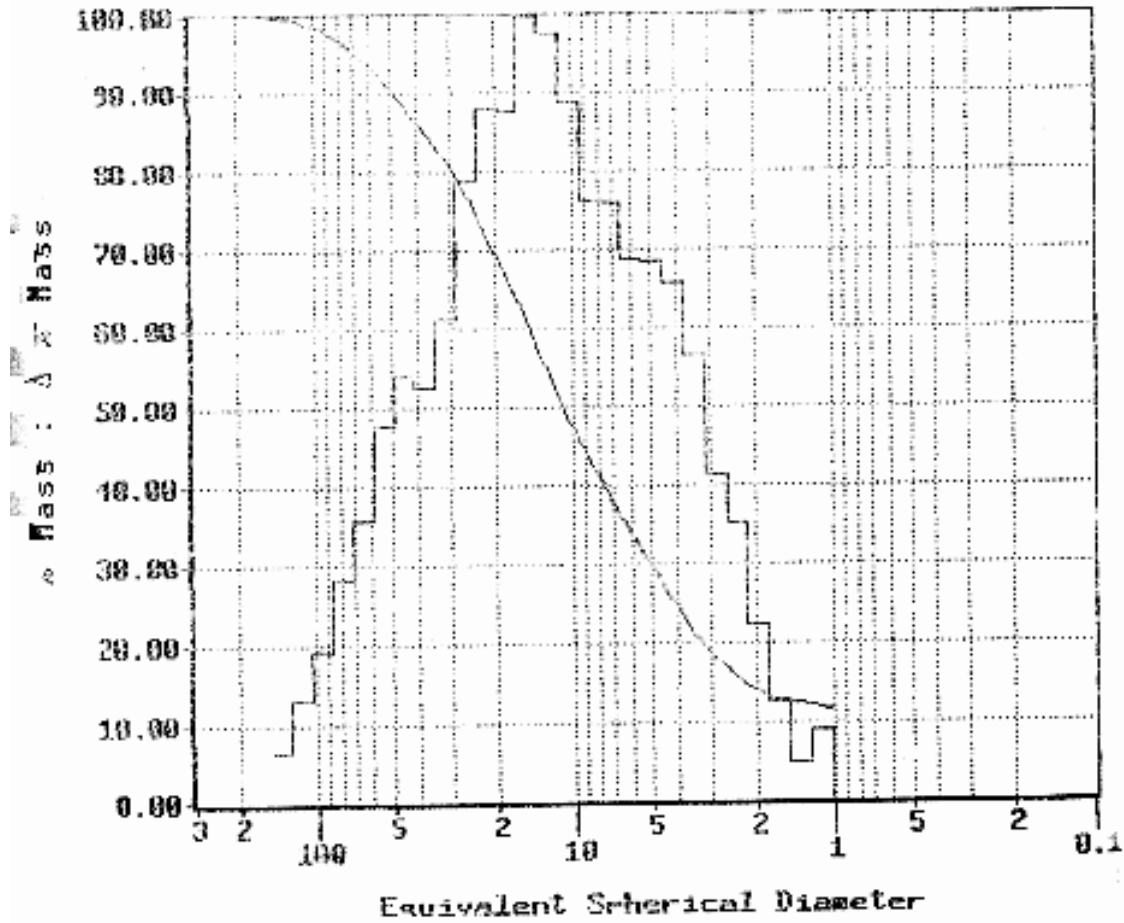
Percent Mass % Finer	Equivalent Spherical Diameter micrometers
4.77	2.000
6.03	3.000
13.04	4.000
19.10	5.000
23.56	6.000
27.22	7.000
30.53	8.000
33.58	9.000
36.35	10.000
53.66	20.000
71.30	30.000
78.72	40.000
84.49	50.000
89.23	60.000
92.30	70.000
94.57	80.000
96.35	90.000
97.25	100.000
98.36	110.000
98.88	120.000
99.15	130.000
99.18	140.000
99.12	150.000

I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
 Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report  
 Version 1.10



File Name..... CAL-D.1783                      Data Type..... Raw  
 Operator..... A. MTEI                          Moving Point Avg.... 41  
 Sample ID..... CAL-D                            Sample Density..... 2.540000 g/cc  
 Sample Description.. MUESTRA 1

Mass Cumulative/Histogram



x-axis scale unit..... micrometers  
 y-axis scale unit..... delta percent

Gráfico 10.

I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
 Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer  
 Version 1.10



File Name..... CAL-D.MRD                      Data Type..... Raw  
 Operator..... A. GORTIZ                      Moving Point Avg.... 41  
 Sample ID..... CAL-P                      Sample Density..... 2.540000 g/cc  
 Sample Description.. MUESTRA B

**Interpolated % Mass vs. Diameter**

Percent Mass % finer	Equivalent Spherical Diameter micrometers
13.95	2.000
18.81	3.000
24.39	4.000
29.59	5.000
33.82	6.000
37.64	7.000
41.19	8.000
44.27	9.000
47.14	10.000
59.60	20.000
80.87	30.000
86.42	40.000
90.54	50.000
93.82	60.000
95.45	70.000
96.81	80.000
97.96	90.000
98.54	100.000
99.00	110.000
99.40	120.000
99.70	130.000
99.88	140.000
99.97	150.000

I.D.I.E.M. - UNIVERSIDAD DE CHILE  
Quantachrome Microscan Particle Size Analyzer Data Report  
Version 1.10

File Name.....	CAL-E.M50	Date Type.....	Raw
Operator.....	A. GRTIZ	Moving Point Avg....	41
Sample ID.....	CAL-E	Sample Density.....	2.540000 g/cc
Sample Description..	MUESTRA E		

Mass Cumulative/Histogram

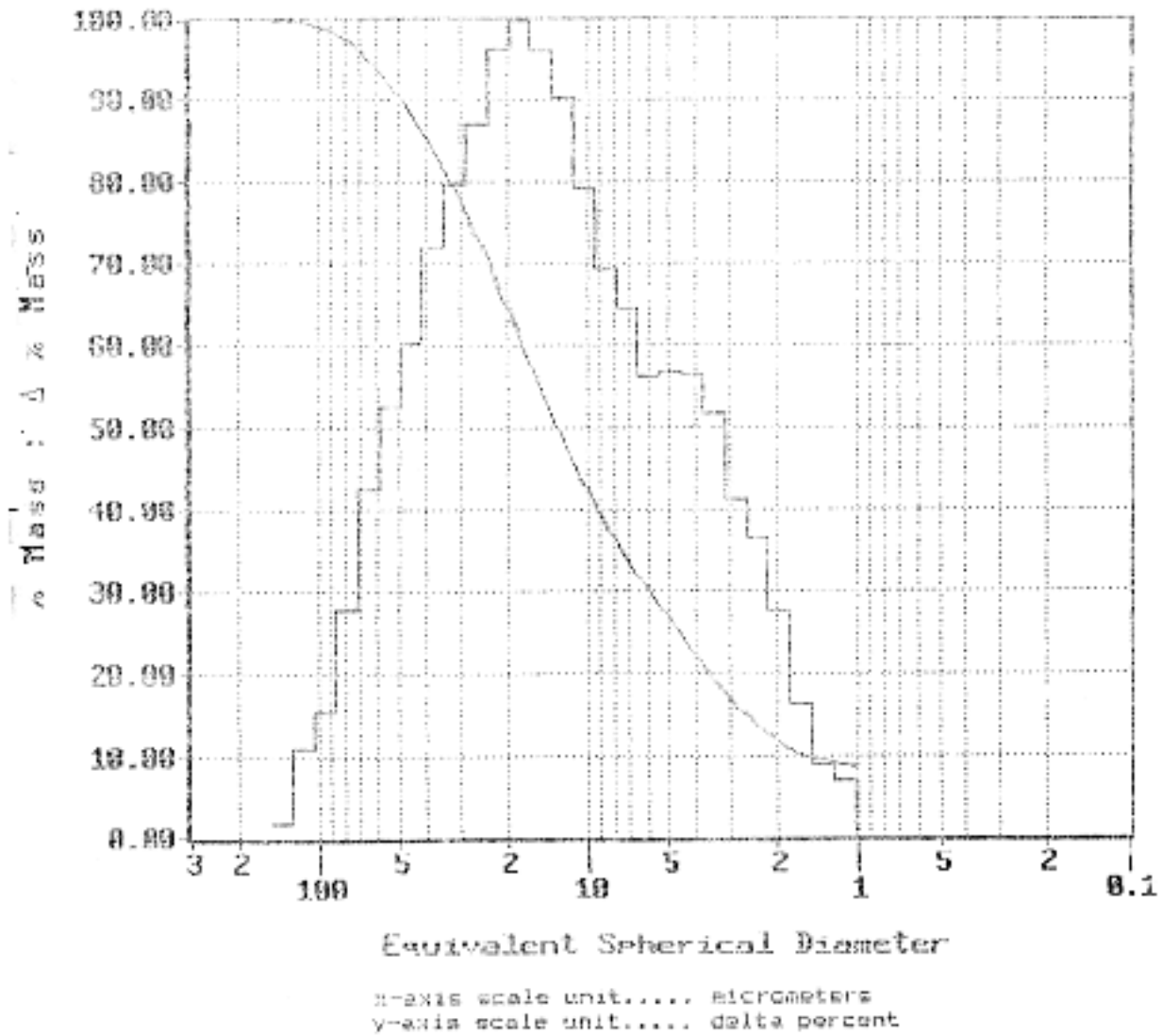


Gráfico 11.





**ANEXO N° 3 : TECNOLOGÍA DEL ESTUCO PARA PANELES  
ESTRUCTURALES.**

En el mortero para panel, cada capa está emplazada en un extremo en forma rígida a la estructura de acero y en la cara externa tiene total libertad para deformarse.

Como consecuencia se originan esfuerzos desde el inicio del fraguado y durante toda la vida útil de tracción/compresión diferenciales en forma adicional a los esfuerzos normales de un estuco sobre albañilería.

El panel estructural terminado es una especie de mortero armado con diferencias fundamentales con el hormigón armado:

1) La retracción del mortero es 4 veces mayor que el hormigón armado. En efecto, el mortero tiene retracción del orden de 1 mm/m en tanto el hormigón armado de 0,25 mm/m.

2) La superficie expuesta en el mortero en un panel es muchas veces la de un hormigón armado del mismo volumen. Si se hace la comparación entre un panel de 2,44 x 1,22 m con un hormigón en una viga de un volumen equivalente se llega a que el mortero está 13,3 veces mas expuesto que el hormigón.

#### Características para el diseño de morteros para paneles.

1) El mortero tanto durante el fraguado como una vez endurecido y por toda su vida útil es sometido a esfuerzos derivados de su relación con el medio ambiente de tracción/compresión mucho mayores que los de estuco sobre una albañilería corriente y mucho mayores que los de un hormigón armado.

2) El mortero para aceptar dichas sollicitaciones deberá tener una elasticidad adecuada para evitar su destrucción que se inicia con la fisuración

3) La solución en empleo actual en los países desarrollados es el uso de la cal, en nuestro país la de tipo hidráulico, que permite junto con disminuir la retracción aumentar el alargamiento de rotura T/M que es la relación de la resistencia a la tracción dividida por el módulo de rotura a la tracción en un tiempo dado. *El alargamiento de rotura es tanto mayor cuanto menor es la resistencia a la tracción del mortero.*

**Tabla N°1**

**Dosificación Estuco para Paneles**

<b>Cemento</b>	<b>Cal Hidráulica</b>	<b>Arena Seca</b>
1 volumen	2 volúmenes	9 volúmenes

**c) Retracción, Fisurabilidad y Resiliencia.**

La retracción del mortero es cuatro veces superior al hormigón. En efecto el mortero tiene una retracción de 1 mm/m en tanto el hormigón de 0.25 mm/m (“Manual del Mortero” pagina 34 Instituto Chileno del Cemento y Hormigón). Por tanto es de vital importancia controlar los fenómenos de retracción. El mecanismo para evitar la fisuración es lograr un mortero con una elasticidad que permita absorber las deformaciones y que además el desarrollo de ella sea posterior a la obtención gradual de resistencia por parte del mortero.

El tratado “Fisuras y Grietas en Morteros y Hormigones” de Albert Joisel establece (pagina 16) que “el alargamiento de rotura de un mortero es tanto mayor cuanto menor es su resistencia”, lo que se puede expresar en que el aumento de resistencia va acompañado de una disminución del alargamiento de rotura.

Por lo tanto es vital preocuparse que los morteros tengan siempre un valor de la resistencia lo más cercano al mínimo requerido y en ningún caso exceder la resistencia ya que con ello se disminuye la elasticidad y se obtiene una gran fisuración junto a un mayor costo.

El mismo Joisel establece (pagina 39) que “los conglomerantes de endurecimiento lento son menos propensos a la fisuración que los conglomerantes de endurecimiento rápido aun teniendo la misma retracción hidráulica y la misma resistencia a la tracción a largo plazo. Establece en el mismo capítulo remedios para las fisuras mediante el uso de cales hidráulicas.

Conclusiones similares se alcanzaron en el estudio nacional “Fenómenos de Contracción en Morteros para Estuco” Carlos. Urrutia y otros. Jornadas Chilenas del Hormigón. En el se señala, además, que el mortero tendrá una mayor capacidad de evitar fisuración si se logra obtener una alta retentividad del mortero fresco que evita las contracciones de secado en el proceso de fraguado.

***d) Relación en volumen conglomerante árido.***

Su valor es fundamental en la obtención de impermeabilidad. Las arenas poseen en promedio un 38% de huecos, razón por la cual es necesaria una relación en volumen mínima de 1: 3, estando el árido seco. Si se considera la arena húmeda con un esponjamiento de 25%, esta relación se obtiene aproximadamente con una dosificación de 1 volumen de conglomerante: 4 volúmenes de arena húmeda.

***e) Relación en volumen cemento cal hidráulica.***

De acuerdo a la experiencia obtenida el control de morteros para paneles estructurales con el producto cal hidráulica de CPCAL, recomendamos la relación en volumen de 1 cemento: 2 cal hidráulica. Con esta relación se solucionan los problemas de excesiva resistencia, baja resiliencia, poca trabajabilidad,

baja adherencia, fraguado excesivamente rápido, alta fisurabilidad, gran retracción y alto costo propio de los morteros de solo cemento. Estos hechos son reconocidos por la Norma Francesa NF P 15-201-1 "Enduits aux mortiers de cimients, de chaux et de mélatige platre et chaux acrienne." que en el capítulo 9 "Execcution de enduits sur supports en treillis metalliques." No se permite en ninguna dosificación el uso de solo cemento hidráulico permitiéndose sí el uso de solo cal hidráulica como conglomerante o combinaciones de cales hidráulicas con cemento.

#### f) Tipos de cal hidráulica

La cal hidráulica es un conglomerante intermedio entre la cal hidratada y el cemento hidráulico y por lo tanto sus características son necesarias definirías. Tanto la Norma Alemana como Francesa definen cales hidráulicas según su resistencia a la compresión dentro del rango de 30 a 100 Kg /cm<sup>2</sup>. La cal hidráulica CPCAL tiene una resistencia a la compresión de 60 Kg /cm<sup>2</sup> a los 28 días. Todas las recomendaciones que se dan en el presente documento están basadas en el resultado controlado del comportamiento en obra de la cal hidráulica de CPCAL razón por la cual sólo son válidas para su uso. Para la utilización de otras cales hidráulicas será necesario previamente realizar experiencia controlada para definir los comportamientos. El uso de cal hidratada no es recomendable en el mortero para paneles pues si bien otorga retentividad y trabajabilflidad produce una disminución en la resistencia a la compresión obligando a un mayor uso del cemento con lo cual hay un aumento significativo de costo.

#### g) Características de la arena

El árido debe cumplir con la Norma Chilena 163 Áridos para morteros y hormigones. En la tabla n°2 se muestra la banda granulométrica del árido permitido por la norma.

**Tabla N° 2**

<b>Tamices Empleados (ASTM)</b>	<b>% que pasa en peso</b>
<b>3/4"</b>	100
<b># 4</b>	95-100
<b># 8</b>	80-100
<b># 16</b>	50-85
<b># 30</b>	25-60
<b># 50</b>	10-30
<b># 100</b>	2.10

De acuerdo a la experiencia de CPCAL es frecuente encontrar áridos utilizados en morteros que no cumplen con la norma en cuanto a granulometría y contenido máximo de partículas menores de 0.080 mm, que es de 5 % en peso. Si la banda granulométrica está fuera de la norma, se deben realizar pruebas especiales de acuerdo con la misma.

h) Bombeabilidad.

En los casos cada vez más frecuentes de utilización de maquina estucadora o revocadora, se deben seguir las recomendaciones de las curvas granulométricas dadas por los fabricantes. Es frecuente el uso de cal hidráulica para la lubricación de las maquinas, pero no debe confundirse este uso con los requerimientos reales de cal hidráulica para el mortero que son mucho mayores. Si se compara las curvas granulométricas de los fabricantes de máquinas estucadoras con la N Ch 163 Áridos para Morteros se observa sobre la malla 50 ( 0,315 mm ) sus requerimientos son de una arena más gruesa que la Norma Chilena, en tanto bajo esta malla son mas finos que ella. Es importante señalar que la citada norma permite el uso de áridos que salgan de la banda siempre que se pruebe que el mortero resultante cumpla con los requisitos especificados.

Por otra parte, la banda si bien es en general más gruesa que la Norma Chilena también establece valores máximos de partículas finas debido a que las maquinas se atascan no-solo por el exceso de partículas gruesas (decantación debido a al mayor peso) sino que lo mismo ocurre por exceso de partículas finas (aumento de fricción, disminución de la velocidad y decantación) de manera que es necesario disponer de una arena gruesa y otra fina para hacer las mezclas que aseguren la bombeabilidad.

El agregado de los conglomerantes que se recomiendan en este escrito produce una excelente bombeabilidad si se mantiene la granulometría requerida. Sí se modifica la relación conglomerante árido o se altera la proporción cemento y cal hidráulica, deberá modificarse la granulometría de la arena en el sentido que corresponda. Por ejemplo, si se aumenta la cantidad de aglomerante con relación al árido, deberá utilizarse una arena más gruesa de forma de mantener lo más constante la granulometría de la Pulpa.

Tabla N°3

<b>Variable físicas de Cálculo</b>	<b>Kg./litro</b>
Densidad Aparente Cemento	3,00
Densidad Aparente Cal Hidráulica	2,45
Densidad Aparente Arena	2,65
Peso Especifico Cemento	1,2
Peso Especifico Cal Hidráulica	0,8
Peso Especifico Arena	1,7



**Calculo de la dosificación del mortero.**

La ecuación básica establece que el sistema de los volúmenes absolutos de los componentes del mortero conforma su volumen total.

$$\frac{C}{cp} + \frac{K}{pk} + \frac{F}{pf} + A + H = 1000 \quad \text{litros}$$

$C$	= Dosis de cemento por $m^3$ de mortero	[kg.]
$cp$	= Peso específico real del cemento	$\left[ \frac{kg.}{litro} \right]$
$k$	= Dosis de cal por $m^3$ de mortero	[kg.]
$pk$	= Peso específico o real de la cal hidraulica	$\left[ \frac{kg.}{litro} \right]$
$F$	= Dosis de arena por $m^3$ de mortero	[kg.]
$pf$	= Peso específico real de la arena	[kg.]
$A$	= Dosis de agua libre por $m^3$ de mortero	[litros]
$H$	= Contenido de aire por $m^3$ de mortero	[litros]

Utilizando los valores físicos descritos en la tabla 3, se procede a transformar la dosificación recomendada en volumen a valores en peso, valiéndonos de las densidades aparentes. El resultado se muestra en tabla N°4.

Tabla N°4

<b>Dosificación Recomendada</b>		
<b>Materiales</b>	<b>Volumen</b>	<b>Peso</b>
<b>Cemento</b>	1	1
<b>Cal Hidráulica</b>	2	1.34
<b>Arena Seca</b>	9	12.75

Se estima que la arena tiene un módulo de finura de 2.70. Para calcular la cantidad de agua necesaria para obtener la fluidez necesaria, se utilizan la Tabla 7.1 del Manual del Mortero del Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón donde:

A = cantidad de agua = 300 lt/m<sup>3</sup> de mortero

H = cantidad de aire = 30 lt/m<sup>3</sup> de mortero

Reemplazando en la ecuación general se obtiene una dosificación por m<sup>3</sup>:

Tabla N° 5

<b>Dosificación Estuco para paneles</b>	
Cemento	118 Kg./m <sup>3</sup> <b>de mortero</b>
Cal Hidráulica	158 Kg./m <sup>3</sup> <b>de mortero</b>
Arena Seca	1502 Kg./m <sup>3</sup> <b>de mortero</b>

El valor de la arena seca deberá corregirse en la práctica operacional donde se utilizará arena húmeda, aumentando su peso en el porcentaje de humedad que contenga.

***Rendimiento de morteros de estuco para paneles estructurales.***

Supongamos que el espesor del estuco utilizado en paneles sea de 2.5 cm. por cada lado y que la perdida por rebote, desplome y otros sea de un 20 %, entonces se requerirá **60 litros de estuco por m<sup>2</sup> de panel estructural.**

1 m<sup>2</sup> de Panel estructural requerirá:

$$0,118 \times 60 = 7,08 \text{ Kg de cemento equivalente a } 5,9 \text{ lt. de cemento.}$$

$$0,158 \times 60 = 9,48 \text{ kg de cal hidráulica equivalente a } 11,8 \text{ lt. de cal hidráulica}$$

$$1,502 \times 60 = 90,12 \text{ kg de arena seca equivalente a } 53 \text{ lt. de arena seca.}$$

En las tablas 6 y 7 se calculan las dosificaciones por m<sup>2</sup> de panel y por panel de 1,22 m de ancho \* 2.44 m de alto, considerando que el cemento y la cal tienen aproximadamente 30 litros.

Considerando que la bolsa de cemento y cal hidráulica tienen aproximadamente un volumen de 30 litros, se calculan los requerimientos tendrá que:

Tabla N°6

<b>Dosificación por m<sup>2</sup> de panel estructural requiere</b>	
Cemento	0.20 Saco
Cal Hidráulica	0.4 saco
Arena	53 lt arena seca
	70.7 lt. Arena húmeda (25% Esponjamiento)

Tabla N° 6

<b>Dosificación por panel estructural de 1,22 m. de ancho * 2,44 m. de alto (6 m2 de estuco)</b>	
Cemento	1.2 saco
Cal Hidráulica	2.4 saco
Arena	318 lt arena seca
	424 lt de arena húmeda
	(25 % de esponjamiento)

### **Equivalencia de la dosificación en valores aplicables directamente al terreno.**

En la tabla 8 se muestran una serie de dosificaciones equivalente para una fácil aplicación en obra. Para realizar el cálculo se ha supuesto un esponjamiento de 25 %, un volumen de los sacos de cal hidráulica y cemento de 30 litros y un volumen de 90 litros por carretillada de arena.

Uso de revocadoras en estuco

BIT, Boletín información tecnológica, de la Cámara Chilena de la Construcción, Mayo 96, pagina 55, de Richard Honour.

Tabla 8

<b>Tipo de dosificación</b>	<b>Cemento</b>	<b>Cal Hidráulica</b>	<b>Arena</b>
Volumen Arena Seca	1	2	9
Volumen Arena Húmeda	1	2	12
Sacos-arena húmeda en litros	1	2	360
Sacos-arena húmeda en carretilladas	1	2	4

Para muros y cielos con aplicaciones sobre albañilería, hormigón armado, sistemas prefabricados u otros, las revocadoras ofrecen una economía del 50% y permiten la aplicación del mortero con una adherencia y espesor aproximado de 1 cm., imposible de alcanzar mediante operación manual.

Las Revocadoras son una herramienta de apoyo indispensable en cualquier obra hoy en día. Su versatilidad para aplicar el mortero en distintas superficies y formas dan una relación beneficio costo difícil de igualar con el antiguo «chicoteo».

Con las revocadoras se pueden lograr rendimientos con economías de hasta un 50%, debido a que no requiere mano de obra especializada ni cursos de capacitación.

Las revocadoras maniobradas por un ayudante, permiten la aplicación de mortero con una adherencia imposible de alcanzar mediante una operación manual.

Las revocadoras en un principio fueron utilizadas para el revoque de paneles de malla de alambre con alma de poliestireno. Su eficiente resultado en la homogeneidad y compacidad de mortero, más la rapidez traducida en una enorme economía en la obra, fue motivo para que empresas, subcontratistas y maestros las empezaran a usar en otras superficies para revocar e incluso dar distintas terminaciones de graneado.

Las revocadoras están hechas con materiales resistentes al exigente uso de las faenas. Su uso en el mercado por largo tiempo, sin presentar problemas de mantención, da la garantía de una excelente inversión.

Además de su aparente simpleza, es la única herramienta con característica manual/neumática que se ofrece en el mercado.

El obrero que trabaja con la revocadora, con un aporte continuo de material cercano, puede llegar a revocar en una hora de trabajo hasta  $60 \text{ m}^2$ , con un espesor de mortero de aproximadamente 1 cm.

Las revocadoras se suministran en dos versiones: para muros y para cielos.

Ambos modelos tienen cuatro orificios para revoque grueso, graneado, etc. y se entregan con las brocas necesarias para su limpieza luego del uso.

Para lograr distintas terminaciones el obrero puede trabajar a mayor o menor distancia de la pared a terminar.

Además se caracterizan por ser una herramienta durable y de fácil traslado. Su calidad de fabricación está respaldada por tecnología europea, y es distribuida a lo largo del país.

#### INTRUCCIONES PARA SU USO

Es conveniente trabajar con una presión de aire constante, de 70 a 120 libras.

No es necesario utilizar morteros especiales ni preparar la superficie del panel a proyectar.

En el revoque de muros, el capacho debe distanciarse de la pared unos 10 a 20 cm. y para granear sobre platachado la distancia aumenta a 1 m.

Para revocar cielos rasos, el borde superior del capacho debe casi rozar la losa, a una distancia máxima de 2 a 3 cm.

## MANTENCION

1) En las pausas que normalmente se tienen entre dos revoques, es conveniente sumergir el capacho en un recipiente con agua y accionarla dos a tres veces en vacío.

2) Por lo menos una vez a la semana quitar las tuercas laterales y lavar la revocadora internamente.

## COMPRESIONES

Se pueden utilizar compresores con motor a explosión o eléctricos considerando los valores de la tabla N° 4.

<b>Potencia Motor (HP)</b>	<b>Producción de Aire</b>	<b>Numero de revocadoras utilizables</b>
De 3 a 4	350/400	1
De 5 a 6	600/700	De 2 a 3
De 8 a 10	900/1000	De 3 a 4

## RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de mangueras de 1/2", de alta presión y cuya longitud no exceda los 30 metros lineales.

Cuando se utiliza una sola revocadora, el óptimo en capacidad cúbica del estanque del compresor es 220 litros (no menos de 130 litros, pero con regulador de presión)

**ANEXO N° 4 : INCIDENCIA DEL COSTO DEL MORTERO EN LAS  
VIVIENDAS ECONÓMICAS.**

## **COMPARACIÓN ENTRE MORTERO PREPARADO EN OBRA Y MORTERO PREDOSIFICADO SECO.**

Las viviendas económicas tienen como objetivo dar solución al problema habitacional a los sectores de menores ingresos en las mejores condiciones de calidad. Ello exige una optimización de todas las etapas del proceso constructivo. Compañía Productora de Cal desde hace un tiempo ha desarrollado la "*dosificación y control de los morteros preparados en obra*". En este sistema CPCAL dosifica el mortero de albañilería, controla sistemáticamente la calidad del árido y mide la resistencia a la compresión del mortero; en esta forma la empresa constructora tiene a seguridad que los morteros fabricados cumplen con el requerimiento especificados.

El presente Informe pretende ser una contribución a fin que se tenga la información necesaria al momento de tomar la decisión en la realización del mortero. Además se realiza una comparación de costo entre el mortero fabricado en obra y el "redosificado seco" y la incidencia en la rentabilidad de la obra.

### ***COSTO Y RENTABILIDAD DE LAS VIVIENDAS SOCIALES.***

Se ha estimado una vivienda social de 50 m<sup>2</sup> construido en albañilería de ladrillos prensado a la vista. El precio de venta se ha supuesto en 500 UF y su rentabilidad final sobre el costo de 10%. Por lo tanto, el costo final por vivienda es de 454,58 UF y su margen de 45,5 UF.

### ***PARÁMETROS DE CONSTRUCCIÓN.***

Sobre la base de diversas experiencias se a tomado el valor de **1 m<sup>2</sup> de albañilería por m<sup>2</sup> de superficie construida.** Por otra parte, tanto la práctica como el cálculo teórico indican un valor **60 litros de mortero de junta por m<sup>2</sup> de albañilería de ladrillos prensados.** Lo anterior nos conduce a determinar que una vivienda económica requiere de  $50 \times 60 = 3.000$  **litros de mortero.**



### ***COSTO DEL MORTERO SOBRE LA BASE DE PREDOSIFICADO SECO.***

La situación de extrema competencia entre los tres fabricantes del producto mantienen en la actualidad precios de escasa a nula rentabilidad. El **precio actual se estima en \$ 50,0 el litro de mortero entregado en silo y \$ 55 el litro entregado en bolsas de 28 litros.** Debe señalarse que tanto las altas inversiones, que alcanzaron en un caso a 20 millones de dólares, como los costos de operación de secado de la arena, significan que en forma permanente tendrán un costo mucho mayor que el predosificado en obra, dado que las materias primas del mortero, aglomerante y árido, tendrán un costo similar.

### **COSTO DEL MORTERO FABRICADO EN OBRA DOSIFICADO Y CONTROLADO POR CPCAL.**

De acuerdo al cálculo detallado del Anexo 1 el costo del mortero *CPCAL* sobre la misma base que el predosificado es de \$ 23,79 litro.

### ***GASTO EN MORTERO EN UNA VIVIENDA EN AMBAS***

#### ***ALTERNATIVAS.***

El costo total por vivienda de mortero de junta propuesto por *CPCAL* alcanza a  $3.000 \times 23,79 = \$ 71.370$  equivalente a 4,98 UF (1 UF=\$ 14.313,55 al 9 de Junio de 1998).

El costo total por vivienda de mortero de junta con predosificado seco alcanza a  $3.000 \times 40 = \$ 120.000$  equivalente a 8,38 UF

El ahorro alcanza, por lo tanto, a  $8,38 - 4,98 = 3,40$  UF o \$ 48.666 por vivienda. Para 100 viviendas la economía alcanza a \$ 4.866.000.

## DISMINUCIÓN DE LA RENTABILIDAD AL USAR MORTERO PREDOSIFICADO.

Suponiendo que la vivienda se estaba construyendo con predosificado en obra al cambiar a predosificado seco hay un aumento del costo de 4,38 por vivienda. Este aumento representa una disminución de la utilidad por vivienda de  $4,38/45,5 = 9,63 \%$  de la utilidad por este solo concepto.

Debemos señalar que la calidad de ambos morteros es equivalente.

### Apéndice 1 del Anexo 4

#### *Costo mortero dosificado y controlado en obra por CPCAL*

Se requieren 1.495 kg de arena seca por m<sup>3</sup> de mortero que es equivalentes a  $1.9495/1,7 = 879,4$  litros. Suponiendo un esponjamiento promedio de 25% de la arena húmeda se requerirá  $879,4/0,75$  es decir 1,17 litros de arena húmeda por litro de mortero.

La dosificación recomendada es:

<b>Mortero de Junta de Albañilería , Ladrillos Prensado R<sub>28</sub> &gt; 100 Kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Cemento</b>	<b>Cal Hidráulica</b>	<b>Arena Húmeda</b>
<b>Volumen</b>	1	1	8
<b>Sacos-litros</b>	1	1	240

#### *Costo Materia prima por cachada.*

<b>1 bolsa de cemento</b>	\$ 1.900
<b>1 bolsas de cal hidráulica</b>	\$ 1.420
<b>240 lt. arena 4,0 \$/lt</b>	\$ 960
<b>Total</b>	\$ 4.280

#### *Costo mezclado y arriendo betonera*

El rendimiento de la betonera se estima en 12 m<sup>3</sup>/día y la operan dos personas. El costo de arriendo de la betonera se estima en \$ 10.000 por día y el costo de la mano de obra de mezclado incluyendo la supervisión en \$ 20.00 por día. Por lo tanto, el costo total por día es de \$ 30.000 y el costo por litro de arena harneada es de \$ 2,5.

<b>Costo mezclado 240 lt. x 2,5\$/lt.</b>	600 \$
<b>Costo materiales</b>	4.280 \$
<b>Costo Total (materiales y mezclado)</b>	4.880 \$

De acuerdo al factor de corrección 240 lt. de arena húmeda producirán  $240/1,17 = 205,12$ , litros de mortero.

<b>Costo litro de mortero CPCAL</b>	<b><math>4880/205,12 = \\$ 23,79</math></b>
-------------------------------------	---

**Apéndice 2 del Anexo 4**

Cálculo de la Dosificación del Mortero.

Formula	$\frac{C}{cp} + \frac{K}{pk} + \frac{F}{pf} + A + H = 1000$	litros
<i>C</i>	= Dosis de cemento por m <sup>3</sup> de mortero	[kg.]
<i>pc</i>	= Peso específico real del cemento	$\left[ \frac{kg.}{litro} \right]$
<i>k</i>	= Dosis de cal por m <sup>3</sup> de mortero	[kg.]
<i>pk</i>	= Peso específico o real de la cal hidráulica	$\left[ \frac{kg.}{litro} \right]$
<i>F</i>	= Dosis de arena por m <sup>3</sup> de mortero	[kg.]
<i>pf</i>	= Peso específico real de la arena	[kg.]
<i>A</i>	= Dosis de agua libre por m <sup>3</sup> de mortero	[litros]
<i>H</i>	= Contenido de aire por m <sup>3</sup> de mortero	[litros]

La ecuación básica establece que la suma de los volúmenes absolutos de los componentes del mortero conforma su volumen total.

**Utilizaremos los siguientes valores aproximados:**

Variable físicas de Cálculo	Kg./litro
Densidad Aparente Cemento	3
Densidad Aparente Cal Hidráulica	2,45
Densidad Aparente Arena	2,65
Peso específica Cemento	1,2
Peso Especifico Cal Hidráulica	0,8
Peso Especifico Arena	1,7

En primer lugar, procederemos a transformar la dosificación recomendada en volumen a valores en peso, valiéndonos de las densidades aparentes:

***Dosificación recomendada en volumen : 1 cemento: 1 cal hidráulica: 6 arena***

***Dosificación equivalente en peso : 1 cemento: 0,67 cal hidráulica: 8,5 arena***

Se estima que la arena tiene un módulo de finura de 2.70- Para calcular la cantidad de agua necesaria para obtener la fluidez necesaria, se utilizan la Tabla 7. 1 del Manual del Mortero del Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón:

$$A = \text{cantidad de agua} = 300 \text{ It/m}^3 \text{ de mortero}$$

$$H = \text{cantidad de aire} = 30 \text{ It/m}^3 \text{ de mortero}$$

**Reemplazando en la fórmula (1) se obtiene:**

**Dosificación Mortero de Junta:**

$$\text{Cemento} = 176 \text{ kg/m}^3 \text{ de mortero}$$

$$\text{Cal Hidráulica} = 118 \text{ Kg /m}^3 \text{ de mortero}$$

$$\text{Arena Seca} = 1.495 \text{ Kg /m}^3 \text{ de mortero}$$

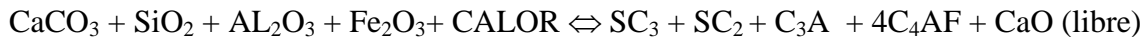
**ANEXO N° 5 : INTRODUCCIÓN A LOS CEMENTOS TIPO POR TLAND.**

Los primeros aglomerantes hidráulicos estaban compuestos por cal hidratada y arenas finas o molidas de origen volcánico. Estas arenas formadas principalmente con sílice en estado vítreo, se conocen hoy día con el nombre de puzolana debido a que se encontraban en forma natural en la ciudad de Pouzzole en Italia.

#### CAL+PUZULANAS+ AGUA-> AGLOMERANTE CEMENTICIO

Posteriormente se desarrolla la calcinación de calizas que contienen uniformemente distribuidos los compuestos de sílice, alúmina y óxido de fierro que forman los silicatos bi y tricálcico y el aluminato tricálcico y el ferro aluminato tetracálcico llamados clinker.

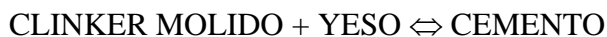
La reacción producida es siguiente:



#### CLINKER

A continuación viene una etapa de molienda del clinker y adición de yeso para retardar el fraguado.

Así



#### ***FABRICACION DE CAL HIDRAÚLICA***

El proceso inicial consiste en la calcinación de calizas que junto al carbonato de calcio contiene sílice, alúmina y óxido de fierro. Durante él se producen parcialmente los compuestos químicos del cemento, la activación del material puzolánico y cal viva.

El producto obtenido se somete en planta a tres procesos:

**1.-Apagado:** Se agrega la cantidad de agua necesaria para transformar la cal viva ( $\text{CaO}$ ) en cal apagada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).

**2.- Separación Aero Gravitacional:** Mediante ella se regula la proporción de cal apagada, componentes cementicios y puzolánicos.

**3.- Molienda:** Con la disminución del tamaño de las partículas se logra acelerar la reacción físico química del fraguado y como consecuencia, aumentar la resistencia a la compresión y flexo tracción

### ***FRAGUADO DE LA CAL HIDRAÚLICA***

El endurecimiento de, la cal hidráulica de *CPCAL* se realiza por tres procesos:

1.- Reacción de hidratación de los silicatos cálcicos, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico (similar al cemento). De este proceso se obtiene resistencia en el corto plazo.

2.- Reacción entre las puzolanas y la cal hidratada, que desarrolla como productos finales compuestos similares a los de la reacción descrita en el punto 1, (cal romana). De este proceso se obtiene resistencia en el mediano plazo.

3.- Reacción de recarbonatación por combinación de la cal hidratada con el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) de la atmosférica (cal pre-romana). De este proceso se obtiene resistencia en el largo plazo.



## ***VENTAJAS DEL USO DE LA CAL HIDRAULICA***

### **TRABAJABILIDAD**

La trabajabilidad es un concepto que mide la facilidad con que un mortero cubre una superficie y la calidad futura de la adherencia.

Generalmente es el albañil quien juzga la calidad de un mortero en estado fresco.

Al inicio el mortero se encuentra en un estado plástico, es decir acepta deformaciones con un mínimo de energía. Para ello deben vencerse Fluidez del mortero, o frotamiento de las partículas granulares y la Consistencia del mortero o cohesión de la masa (liga). Estos dos conceptos definen la trabajabilidad.

Así,

<b>TRABAJABILIDAD</b>	<b>CONTENIDO DE</b>	
	<b>AGUA</b>	<b>GRANOS FINOS</b>
<b>FLUIDEZ</b>	↗	↘
<b>CONSISTENCIA</b>	↘	↗

Por actuar el contenido de agua y de granos finos en sentido opuesto debe buscarse un equilibrio entre ambos conceptos. El aumento de la trabajabilidad vía la incorporación de granos finos de cal hidráulica, retentora de agua, permite la colocación del mortero sin aumentar la cantidad de agua y con ello no se influye en la resistencia además de aumentar la compacidad e impermeabilidad.

### **EXUDACIÓN Y RETENTIVIDAD DEL AGUA DE AMASADO**

La retentividad es una medida de la capacidad de retención de agua durante el fraguado. Cuando la retentividad es insuficiente se produce el efecto de exudación. Así al estar el mortero compuesto por materiales de diferente peso específico se produce decantación (los sólidos bajan y el agua sube).

Esto produce

- Menor resistencia de la superficie.
- El ascenso de agua da origen a conductos capilares.
- Se produce pérdida de trabajabilidad.

Para eliminar los efectos de la exudación deberá se debe:

- Adicionar granos finos de cal.
- Aumentar el **tiempo** de amasado (poco eficiente).
- Aditivos (Incorporadores de aire etc., **solución** cara).

En el caso de la pega de unidades de albañilería si consideramos el procedimiento habitual utilizado por los albañiles de colocar mortero sobre varias unidades, con un espesor un poco mayor del requerido, para luego colocar las unidades superiores sobre la capa de mortero golpeándolas hasta conseguir el espesor de junta especificado, tendremos que durante ese tiempo de interrupción, la unidad inferior de albañilería ha absorbido agua del mortero con lo cual este disminuye su trabajabilidad y al ser colocada la **unidad** superior, **tendrá** mayor dificultad de asentarse uniformemente. Por otra parte, si se acepta que la adherencia se produce por la penetración de la pasta del mortero **en** los capilares de la Unidad de albañilería a **consecuencia** de la **succión** que esta ejerce, la menor cantidad de pasta hará que la adherencia con la unidad superior sea menor. A todas luces esto debe evitarse mediante la adición de cal ya que por ser la partícula, microscópicamente, como un gran queso tiene la facultad de retener agua **en** sus poros.

### ***AGRIETAMIENTO PLÁSTICO***

El secado o fraguado de las capas de mortero se produce desde la capa en contacto con el aire hacia el interior de la capa de mortero. Al secarse se contraen las capas externas mientras que las interiores no

han variado si volumen por lo cual se produce a agrietamiento plástico (mismo concepto del termostato). En especial esto es nocivo en zonas de mucho viento y calor.

### ***IMPERMEABILIDAD***

La permeabilidad depende de la cantidad de huecos que queden una vez hidratada la mezcla de mortero. Así un hormigón es más impermeable mientras más compacto sea es decir mientras mejor sea la cantidad de huecos. La cal mejora la impermeabilidad por dos efectos:

4. 1.- Por poseer partículas finas que aumentan la compacidad y

4.2.- Por la reacción de carbonatación.

La carbonatación se define a través de la siguiente ecuación:



Esta reacción ocurre en forma espontánea.

Los fenómenos que acompañan la carbonatación de la pasta endurecida de mortero de cemento cal arena son muy interesantes, puesto que cambia su estructura, tanto física como química, modificando lentamente cualidades, tales como resistencias mecánicas, porosidad, permeabilidad, durabilidad frente agentes salinos, e indirectamente la protección de las armaduras en hormigones armados y pretensados. El estudio de la carbonatación de los conglomerantes hidráulicos se remonta a investigaciones realizadas por F. M. Lea en la década de 1930, pero en la actualidad ha cobrado vigencia una vez reconocida su influencia positiva en tres puntos trascendentales para los morteros:

- Comportamiento de los hormigones en función del tiempo
- Durabilidad frente a agentes salinos

- Resistencias mecánicas y retracción.

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ocupa aproximadamente **un 0,03 % en volumen** de la atmósfera. El diámetro molecular del CO<sub>2</sub> es del orden de 5,8 A, mientras que el del H<sub>2</sub>O es de 6,2 A, lo que facilita su capacidad de sustitución y capacidad de acceso. No obstante, a la lentitud de esta reacción se ha observado en obras construidas hace 70 años en las cuales no se había utilizado cal libre que las armaduras manifiestan alta corrosión.

Al estudiar las causas que motivaron este fenómeno, el investigador Hainada, de la Universidad de Tokio, estableció que con el correr de los años morteros y hormigones se van neutralizando desde la superficie, por acción del dióxido de carbono contenido en la atmósfera. Esta reacción, establece el Sr. Hainada, produce aumentos infinitesimales de volumen los cuales aumentan la impermeabilidad con lo cual la velocidad de penetración del CO<sub>2</sub> disminuye protegiéndose la corrosión de la enfierradura.

Como se ha hecho notar en esta reacción se verifican dos hechos fundamentales, desde el punto de vista físico-químico:

- Acción de neutralización
- Formación de compuestos cristalinos muy estables. El investigador Lafuma indica que la carbonatación espontánea del mortero cambia la estructura cristalina favoreciendo la resistencia.

### ***ADHERENCIA***

Hay dos aspectos que se logran con una buena adherencia

- Se impide el paso de aire y de la humedad a través del muro.
- Se obtiene una adecuada resistencia al corte y a la tracción en las juntas para cargas que actúan sobre la albañilería.

Los principales factores influyen la adherencia de los morteros son:

- Composición del Mortero.
- Fluidez inicial del mortero.
- La retentividad.
- Calidad y tipo de materiales utilizados.
- Tiempo de interrupción.
- Espesor de las juntas del mortero.
- Estado de humedad del elemento al momento de su colocación en el caso de pega de unidades de albañilería o del muro en el caso del mortero de estuco. Mano de obra.
- Curado.

La cal hidráulica mejora la adherencia de las unidades de albañilería al evitar la pérdida de agua, al producir una mejor trabajabilidad, al disminuir el tiempo de interrupción y por otorgar a la mezcla un mejor fraguado.

### ***DISMINUYE LA RETRACCIÓN HIDRAULICA***

Es importante el efecto de la cal en la retracción en un mortero, puesto que esta puede desarrollar grietas o manifestarse en una unión deficiente entre el mortero y la unidad de albañilería.

La retracción de hidratación de la mezcla produce aumentos y disminuciones de volumen por dos causas:

- i.- Debido a la reacción química de hidratación del cemento durante el Fraguado y el endurecimiento.
- ii.- Debido a la evaporación del agua excedente a la hidratación.

En general la retracción aumenta cuando aumenta la cantidad de cemento en un mortero, pero además depende de la naturaleza y composición del cemento, la finura de él y de la cantidad de agua en el amasado.

Según Kampf mencionado por Delfin y Bullemore la cal reduce la retracción ya que al adicionarla impide la evaporación del agua hasta que esté avanzado el endurecimiento. Así se mantiene el mortero en un ambiente de alta humedad.

Para evitar la retracción se recomienda:

- Evitar el exceso de cemento y que este sea del mayor tiempo posible de fraguado.
- Elegir áridos del mayor tamaño posible ya que así aceptarían mayores aumentos y disminuciones de volumen. Sin embargo esto tiene el efecto negativo de disminuir la impermeabilidad.
- Asegurar un apropiado curado que se logra con la adición de cal.

### ***ELASTICIDAD***

Es sabido que en la pega de unidades de albañilería una de las variables principales en el comportamiento estructural del mortero endurecido es la elasticidad.

Así al tener canterías con alta resistencia y unidades de albañilería con resistencia mucho menor se producirá una diferencial de rigidez en el comportamiento estructural de la pared entre cantería y unidad de albañilería, la que provocará ante cualquier sollicitación fractura de la cantería.

La cal hidráulica mejora la diferencial de elasticidad entre el mortero y las unidades de albañilería (Bloque y ladrillos).

## ***CORRIGE LA IMPERFECCIÓN DE LOS ÁRIDOS***

La dosificación óptima de un mortero se ha determinado como la de 1:3 sobre la base de que las arenas poseen entre un 25 a 30 % de huecos. Así el aglomerante se dosifica con el objeto de llenar todos los huecos disminuyendo los espacios de aire.

Numerosos estudios demuestran que esta dosificación de morteros no se logra debido al bajo contenido de finos. Para evitar esto se debe adicionar cal.

## ***RESISTENCIA***

Como ya ha expuesto la resistencia de la cal hidráulica aumenta con el correr de los días y se prolonga hasta que la reacción de carbonatación ha concluido.

## ***COSTOS***

En el anexo 1 se detalla un estudio de costo donde se demuestra que el porcentaje de ahorro bordea el 20%.

## ***USOS DE LA CAL HIDRAULICA***

El campo de uso de la cal hidráulica es muy amplio. A continuación se muestran algunas de ellos:

- 1.- Mortero de junta (Bloque y ladrillos).
- 2.- Mortero de estuco
- 3.- Mortero de pega (Baldosas, pastelones, elementos cerámicos, etc.)
- 4.- Morteros de relleno (Losas radieres etc.).

5.- Mortero proyectado.

6.- Fabricación de prefabricados.



## **ANEXO N° 6 : DOSIFICACIONES PARA MORTEROS**

Las dosificaciones que se recomiendan a continuación consideran que el árido debe cumplir la Norma Chilena 163 Áridos para Hormigones y Morteros. Es recomendable ocupar un árido lo más grueso posible compatible con la terminación que desee obtenerse. Es conveniente que las arenas tengan un modulo de finura entre 2.8 y 3.3. Se exceptúan las arenas para morteros de junta de unidades de albañilería, enchapes y pega de baldosas que deberá tener un tamaño máximo de 3 mm.

<b>Mortero de Junta de Albañilería , Ladrillos Prensado <math>R_{28} &gt; 100 \text{ Kg/cm}^2</math></b>	<b>Cemento</b>	<b>Cal Hidráulica</b>	<b>Arena húmeda</b>
<b>Volumen</b>	1	1	8
<b>Sacos-litros</b>	1	1	240

La dosificación requiere que la arena tenga un modulo de finura de 2,8. Si la arena es más fina **CPCAL** recomendará el ajuste necesario en la dosificación.

<b>Mortero de Pega Baldosas</b>	<b>Cemento</b>	<b>Cal Hidráulica</b>	<b>Arena húmeda</b>
<b>Volumen</b>	1	2	9
<b>Sacos-litros</b>	1	2	270

<b>Mortero de Estuco Exterior sobre Albañilería</b>	<b>Cemento</b>	<b>Cal Hidráulica</b>	<b>Arena húmeda</b>
<b>Volumen</b>	1	2	10.5
<b>Sacos-litros</b>	1	2	315

La capa de terminación de los estucos podrá colocarse con arena fina, siempre que tenga bajo contenido de arcilla, sin exceder en ningún caso el 5% de la Norma Chilena 163.

<b>Mortero de Estuco Interior sobre Albañilería</b>	<b>Cemento</b>	<b>Cal Hidráulica</b>	<b>Arena húmeda</b>
<b>Volumen</b>	1	2	12
<b>Sacos-litros</b>	1	2	360

La capa de terminación de los estucos podrá colocarse con arena fina, siempre que tenga bajo contenido de arcilla, sin exceder en ningún caso el 5% de la Norma Chilena 163.

<b>Mortero de Estuco sobre Paneles Estructurales</b>	<b>Cemento</b>	<b>Cal Hidráulica</b>	<b>Arena húmeda</b>
<b>Volumen</b>	1	2	12
<b>Sacos-litros</b>	1	2	360

La capa de terminación de los estucos podrá colocarse con arena fina, siempre que tenga bajo contenido de arcilla, sin exceder en ningún caso el 5% de la Norma Chilena 163.

<b>Mortero de Estuco Exterior sobre Albañilería</b>	<b>Cemento</b>	<b>Cal Hidráulica</b>	<b>Arena húmeda</b>
<b>Volumen</b>	1	2	10.5
<b>Sacos-litros</b>	1	2	315

<b>Mortero de Sobreloza</b>	<b>Cemento</b>	<b>Cal Hidráulica</b>	<b>Arena húmeda</b>
<b>Volumen</b>	1	1 ½	8,75
<b>Sacos-litros</b>	1	1 ½	263