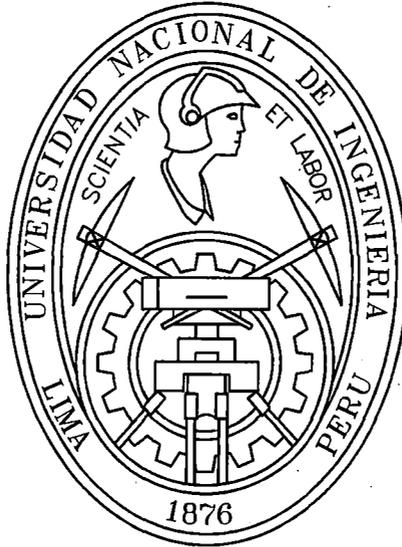


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ANALISIS COMPARATIVO DE ADITIVOS ACELERANTES DE
FRAGUA LIBRES DE ALCALIS PARA CONCRETO PROYECTADO
O SHOTCRETE**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

César Alberto Tengan Shimabukuro

LIMA - PERÚ

2011

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

*A mis padres Raúl Tengan Matsutahara y
Gladys Shimabukuro Kanashiro y a mi hermana
Carolina Tengan Shimabukuro, por su apoyo incondicional
y a Dios por darme una vida plena llena de felicidad.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, un agradecimiento especial para el Dr. Teófilo Vargas, y al maravilloso grupo de trabajo que conocí en el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil (IIFIC), de quienes aprendí mucho durante el período de desarrollo de la tesis en el marco del convenio de investigación UNI-GyM.

A la empresa Graña y Montero S.A. por darme la oportunidad de realizar mi tesis de investigación, y de la misma manera a los colaboradores de las diversas empresas contactas relacionadas con el tema de aditivos para concreto proyectado.

A la Ing. Ana Torre, por su paciencia y su apoyo como asesora de tesis, y a todo el personal del Laboratorio de Ensayo de Materiales (LEM) por todo el apoyo brindado durante el período de preparación de testigos y ensayo de probetas.

A la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, en donde recibí una formación académica y personal de primer nivel, y donde conocí a grandes amigos y colegas.

Y finalmente, a mi familia, gracias papá, mamá y hermana por todo el apoyo brindado y por los consejos brindados.

ÍNDICE DE LA TESIS

RESUMEN	4
LISTA DE TABLAS	5
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE SIMBOLOS	13
INTRODUCCION	15
CAPÍTULO I. CONCRETO PROYECTADO	16
1.1 GENERALIDADES	16
1.2 MÉTODOS DE APLICACIÓN	18
1.2.1 Aplicación por Vía Seca	18
1.2.2 Aplicación por Vía Húmeda	19
1.3 TÉCNICA DE LANZADO	23
1.4 USOS DEL CONCRETO PROYECTADO	24
1.4.1 Estabilización	28
1.4.2 Revestimiento	30
1.5 REQUERIMIENTOS DEL CONCRETO PROYECTADO	31
1.6 PROPIEDADES DEL CONCRETO PROYECTADO	31
1.7 SEGURIDAD EN APLICACIÓN	33
1.8 CALIDAD DEL CONCRETO PROYECTADO	35
CAPÍTULO II. MATERIALES COMPONENTES DEL CONCRETO	36
2.1 EL CEMENTO	36
2.1.1 Generalidades	36
2.1.2 Fabricación del cemento Portland	38
2.1.3 Composición Química del Cemento	38
2.1.4 Tipos de Cemento y sus Aplicaciones	41
2.1.4.1 <i>Cemento Portland Tipo I (común)</i>	43
2.1.4.2 <i>Cemento Portland Tipo II (resistencia moderada al ataque a sulfatos)</i>	43
2.1.4.3 <i>Cemento Portland Tipo III (endurecimiento rápido)</i>	44
2.1.4.4 <i>Cemento Portland Tipo IV (bajo calor de hidratación)</i>	44
2.1.4.5 <i>Cemento Portland Tipo V (alta resistencia al ataque de sulfatos)</i>	44

2.1.4.6	<i>Cemento Portland especial de endurecimiento rápido</i>	45
2.1.4.7	<i>Cemento Portland Tipo IS (de alto horno)</i>	45
2.1.4.8	<i>Cemento Portland Puzolánicos tipo IP, P y I(PM)</i>	46
2.1.4.9	<i>Cementos Expansivos</i>	46
2.1.5	Cementos fabricados en el Perú	47
2.1.6	Cemento a utilizar	48
2.2	LOS AGREGADOS	50
2.2.1	Generalidades de los Agregados	50
2.2.2	Propiedades de los Agregados	53
2.3	EL AGUA	55
2.3.1	Generalidades del Agua	55
2.3.2	Calidad del Agua	56
 CAPÍTULO III. ADITIVOS		61
3.1	GENERALIDADES SOBRE ADITIVOS	61
3.2	COMPOSICIÓN QUÍMICA	65
3.3	REACCIONES QUÍMICAS	65
3.4	ADITIVOS PARA CONCRETO LANZADO	69
3.4.1	Aditivos Acelerantes	69
3.4.1.1	<i>Acelerantes a Base de Aluminatos</i>	70
3.4.1.2	<i>Acelerantes a Base de Silicatos</i>	71
3.4.1.3	<i>Acelerantes Libres de Alkali</i>	72
3.4.2	Aditivos Superplastificantes	75
3.5	Recomendaciones de Uso	76
3.6	Mercado Actual	77
 CAPÍTULO IV. ADICIONES PARA SHOTCRETE		78
4.1	GENERALIDADES	78
4.2	MICROSÍLICE	80
4.3	FIBRA DE ACERO	85
4.4	RECOMENDACIONES DE USO	90

CAPÍTULO V. DISEÑOS DE MEZCLA	91
5.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	91
5.2 DISEÑO DE MEZCLA	92
5.3 TANDAS DE PRUEBA	96
5.3.1 Pruebas para Vía Seca	97
5.3.2 Pruebas para Vía Húmeda	99
CAPÍTULO VI. ENSAYOS REALIZADOS	103
6.1 REFERENCIAS DE ENSAYOS	103
6.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO	106
6.3 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	113
6.4 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA EN COMPRESIÓN EN CAMPO	119
6.5 DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD DEL SHOTCRETE	121
CAPÍTULO VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS	129
7.1 ANÁLISIS PREVIOS	129
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS A EDADES TEMPRANAS	135
7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS A EDADES FINALES	140
CONCLUSIONES	150
RECOMENDACIONES	153
BIBLIOGRAFÍA	155
ANEXOS	160

RESUMEN

La necesidad de obtener un diseño de mezcla para shotcrete óptimo balanceando los conceptos de calidad y costo conllevan a realizar un estudio comparativo entre las diferentes opciones de aditivos acelerantes de fragua existentes en el mercado.

Para ello, contando con las instalaciones del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI-LEM), se realizaron los estudios necesarios para el comparativo de dichos productos: desde la recepción, almacenamiento y estudio de agregados enviados directamente de campo (Cuzco), hasta la elaboración de las probetas para medir el desarrollo de la resistencia a la compresión del shotcrete diseñado, pasando por las tandas de prueba para lograr un diseño de mezcla que cumpla con las dosificaciones requeridas por el proyecto.

La elección de realizar los ensayos sobre probetas cúbicas antes que sobre probetas cilíndricas se debió principalmente a la dificultad del mezclado del shotcrete, ya que con un acelerante de fragua tan rápido, el mezclado en trompo impide una buena combinación de insumos, lo cual no ocurre al moldear pequeños cubos de 5 cm de lado.

Además de contar con los resultados a la compresión de los testigos de shotcrete, también se realizaron ensayos de tenacidad sobre viguetas de shotcrete obtenidas de la colocación de dicho shotcrete en las condiciones de campo y con la maquinaria adecuada. Dicha propiedad está ligada principalmente a la cantidad de fibra de refuerzo que se utilice en la mezcla, pero la resistencia a la compresión también juega un papel importante al ser un factor determinante de la ocurrencia de la primera fractura sobre el concreto.

Los resultados obtenidos de los ensayos de compresión indican que, a pesar de que los 3 aditivos utilizados en el estudio logran cumplir con las Especificaciones Técnicas del proyecto, el aditivo Meyco SA160 logra optimizar los costos por metro cúbico de shotcrete.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.	Comparación de revestimiento con ambos concretos: proyectado y vaciado convencional (Fuente: SIKA).	30
Tabla 1.2.	Parámetros de Calidad (Fuente: SIKA).	35
Tabla 2.1.	Valores Promedios Típicos de la composición de cementos Portland (Fuente: Neville, Adam. "Tecnología del Concreto". México, 1998).	42
Tabla 2.2.	Composición Química del Cemento Yura Tipo I.	49
Tabla 2.3.	Límites Máximos Permisibles de Sustancias en el Agua (Fuente N.T.P. 338-088).	57
Tabla 2.4.	Límites en la cantidad de cloruros en porcentaje de cemento (Fuente: ACI 318).	58
Tabla 3.1.	Efecto sobre el endurecimiento de morteros de los aditivos acelerantes.	69
Tabla 3.2.	Composición Base de los Acelerantes de Fragua (Fuente: SIKA).	70
Tabla 3.3.	Efectos de la Composición Química sobre las propiedades del shotcrete. (Fuente: SIKA).	73
Tabla 4.1.	Tabla de análisis químico de diferentes puzolanas. (Fuente: Design and Control of Concrete Mixtures, 2004).	80
Tabla 4.2.	Tabla con los requerimientos en la composición química del microsílíce (Fuente: ASTM C-1240).	81
Tabla 5.1.	Gradación N° 2 según ACI 506R-90.	91
Tabla 5.2.	Cantidades de material para la primera tanda de prueba.	93
Tabla 5.3.	Cantidades de material para la tanda de prueba para vía seca.	97

Tabla 5.4.	Cantidades de material para la tanda de prueba corregida para vía seca.	98
Tabla 5.5.	Cantidades de material de la tanda final para vía seca.	99
Tabla 5.6.	Cantidades de material para la tanda de prueba para vía húmeda (superplastificante al 1.2%).	100
Tabla 5.7.	Cantidades de material para la tanda de prueba para vía húmeda (superplastificante al 2.0%).	101
Tabla 5.8.	Cantidades de material para la tanda de prueba corregida para vía húmeda (superplastificante al 2.0%).	101
Tabla 5.9.	Cantidades de material de la tanda final para vía húmeda (superplastificante al 2.0%).	102
Tabla 6.1.	Diseño de Mezcla utilizada en la unidad minera de referencia (Arequipa).	103
Tabla 6.2.	Resultados de ensayos a compresión a 7 días de testigos tomados de los paneles.	105
Tabla 6.3.	Resultados de ensayos de rebote.	105
Tabla 6.4.	Husos Granulométricos Fuente: Comité ACI 506R-90.	107
Tabla 6.5.	Resultados de la Granulometría.	109
Tabla 6.6.	Comparación con la Gradación N°2 del ACI506R.	109
Tabla 6.7.	Resultados a compresión con el Sigunit L-50 AF.	116
Tabla 6.8.	Resultados a compresión con el Sureshot AF.	117
Tabla 6.9.	Resultados a compresión con el Meyco SA160.	117
Tabla 6.10.	Resultados a compresión del shotcrete vía húmeda patrón.	118
Tabla 6.11.	Resultados a compresión del shotcrete vía húmeda lanzados en campo.	120

Tabla 6.12.	Resultados a compresión del shotcrete vía húmeda lanzados en campo con aditivo alcalino.	121
Tabla 6.13.	Registro de datos del ensayo a tenacidad en el LEM.	127
Tabla 7.1.	Resultados a compresión con el Sigunit L-50 AF corregidos.	
Tabla 7.2.	Resultados a compresión con el Sureshot AF corregidos.	
Tabla 7.3.	Resultados a compresión con el Meyco SA160 corregidos.	
Tabla 7.4.	Resultados a compresión del shotcrete vía húmeda patrón corregidos.	
Tabla 7.5.	Relaciones de resistencia a la compresión de 3 días.	
Tabla 7.6.	Registro de datos del ensayo a tenacidad en el LEM.	
Tabla 7.7.	Relaciones de resistencia a la compresión de 3 y 7 días hacia los 28 días.	
Tabla 7.8.	Relaciones de resistencia a la compresión de 1, 3 y 7 días hacia los 28 días.	
Tabla 7.9.	Relaciones de resistencia a la compresión de 1 y 3 días hacia los 7 días.	
Tabla 7.10.	Relación de precios y presentaciones de los aditivos estudiados.	
Tabla 7.11.	Rendimiento de los aditivos acelerantes de fragua libres de álcali.	
Tabla 7.12.	Rendimiento de los aditivos acelerantes de fragua libres de álcali a la mejor dosificación.	

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1.	Concreto Proyectado o Shotcrete.	16
Fig. 1.2.	Esquema de una mezcladora típica de Shotcrete mediante vía seca. (Mahar, 1975).	18
Fig. 1.3.	Aplicación de shotcrete mediante vía seca.	19
Fig. 1.4.	Esquema de una mezcladora típica de Shotcrete mediante vía húmeda. (Mahar, 1975).	19
Fig. 1.5.	Aplicación de shotcrete mediante vía húmeda.	20
Fig. 1.6.	Manejo de la manguera. (Mediante pequeños movimientos circulares).	24
Fig. 1.7.	Influencia del ángulo en el rebote.	24
Fig. 1.8.	Utilización del shotcrete para construcción de canales. (Carretera del Pacífico, Australia).	25
Fig. 1.9.	Utilización del shotcrete para estabilización de taludes en California.	25
Fig. 1.10.	Aplicación de shotcrete como sostenimiento de galería para minería (Orcopampa, Arequipa).	26
Fig. 1.11.	Preparación de shotcrete con fibra para sostenimiento (La Granja, Cajamarca).	26
Fig. 1.12.	Sostenimiento con shotcrete de chimenea de equilibrio (Platanal, Cañete).	27
Fig. 1.13.	Estabilización de un talud adyacente a la vía. (Carretera de Hume, Australia).	28
Fig. 1.14.	Avance en paredes de galería. (Fuente: SIKA).	29
Fig. 1.15.	Método de Núcleo Uetiberg (núcleo alemán).	29

Fig. 1.16.	Método de Penetración con Aguja – Resistencia Muy Temprana.	32
Fig. 1.17.	Método de Proyectoil – Resistencia Temprana.	33
Fig. 2.1.	Faro de Eddystone, en la costa de Cornish.	36
Fig. 2.2.	Bolsa de Cemento Portland Tipo I de la marca Yura.	49
Fig. 2.3.	Agregado a utilizar para la mezcla.	51
Fig. 3.1.	Evolución del calor de concretos conteniendo cloruro y formiato de calcio.	68
Fig. 3.2.	Influencia del pH sobre la piel humana (Fuente: BASF).	74
Fig. 3.3.	Gráfico explicando la influencia del pH de los aditivos. (Fuente: SIKA).	74
Fig. 4.1.	Apariencia de la microsíllice.	81
Fig. 4.2.	Comparación de tamaños de la microsíllice y cenizas volantes. (Fuente: Design and Control of Concrete Mixtures, 2004).	82
Fig. 4.3.	Efectos de las diferentes modificaciones de microsíllice en la segregación del concreto.	84
Fig. 4.4.	Apariencia de la Fibra de Acero.	86
Fig. 4.5. y 4.6.	Esquema de funcionamiento de un shotcrete sin fibra y shotcrete con fibra. (Fuente: Tesis PUCP - Aleksey Beresovsky De Las Casas).	87
Fig. 4.7.	Panel de shotcrete luego de ser ensayado. (dentro de las grietas el shotcrete se mantiene unido gracias a la fibra de acero).	88
Fig. 4.8.	Cuadro de Clasificación de Rocas y Energía Absorbida para estabilizar cada una de ellas. (incluyendo la necesidad de pernos) (Fuente: SIKA).	89
Fig. 5.1.	Medición del Slump	93
Fig. 5.2.	Probetas de 4" x 8" para ser ensayadas a los 7 días.	94

Fig. 5.3.	Ensayo de una de las probetas de la primera tanda de prueba.	94
Fig. 5.4.	Probetas cilíndricas con manchas debido por falta de mezclado del aditivo y vacíos por la rápida fragua.	95
Fig. 5.5.	Moldes cúbicos a utilizar para las siguientes tandas de prueba.	96
Fig. 5.6.	Moldeado de las probetas cúbicas de 5 cm de lado.	98
Fig. 5.7.	Medición del slump para la mezcla vía húmeda.	100
Fig. 6.1.	Agregados a ensayar.	106
Fig. 6.2.	Tamices Fino y Grueso.	107
Fig. 6.3.	Granulometría del Agregado.	109
Fig. 6.4.	Balde de 1/2 pie ³ .	112
Fig. 6.5.	Varilla para compactación normada.	112
Fig. 6.6.	Muestras de Laboratorio del Sigunit L-50 AF, Meyco SA160 y Sureshot AF.	114
Fig. 6.7.	Equipos de Ensayo del LEM.	118
Fig. 6.8.	Ensayo a Compresión de los testigos cúbicos.	118
Fig. 6.9.	Esquema de Ensayo a Flexión de una Viga (ASTM C78, 1994).	122
Fig. 6.10.	Muestra enviada de campo para ser ensayada a flexión.	123
Fig. 6.11.	Medidor de deformaciones utilizado.	123
Fig. 6.12.	Disposición de la muestra para ser ensayada.	124
Fig. 6.13.	Acercamiento al medidor de deformaciones.	124
Fig. 6.14.	Modelos de curvas obtenidas del ensayo a flexión: (a) cóncavo hacia arriba antes de la primera rajadura, (b) convexo hacia arriba antes de la primera rajadura (ASTM C78, 1994).	125

Fig. 6.15.	Observación de la grieta en el punto de aplicación de carga.	126
Fig. 6.16.	Gráfico elaborado con menos puntos registrados.	126
Fig. 6.17.	Gráfico elaborado con los datos del ensayo de tenacidad en el LEM.	127
Fig. 6.18.	Gráfico elaborado por SENCICO con los datos del ensayo de tenacidad.	128
Fig. 6.18.	Observación del trabajo de las fibras de acero luego de la fractura.	128
Fig. 7.1.	Resistencia a Compresión a las 8 horas (por cada aditivo, azul = mínima dosificación, rojo = dosificación media, verde = máxima dosificación).	136
Fig. 7.2.	Resistencia a Compresión a 1 día (por cada aditivo, azul = mínima dosificación, rojo = dosificación media, verde = máxima dosificación).	137
Fig. 7.3.	Acercamiento al inicio de la curva de ganancia de resistencia (inicial).	138
Fig. 7.4.	Resistencia a Compresión a los 3 días (por cada aditivo, azul = mínima dosificación, rojo = dosificación media, verde = máxima dosificación).	139
Fig. 7.5.	Resistencia a Compresión a los 7 días (por cada aditivo, azul = mínima dosificación, rojo = dosificación media, verde = máxima dosificación).	140
Fig. 7.6.	Resistencia a Compresión a los 28 días (por cada aditivo, azul = mínima dosificación, rojo = dosificación media, verde = máxima dosificación).	141
Fig. 7.7.	Resultados de los ensayos a compresión del Sigunit L-50 AF.	142
Fig. 7.8.	Resultados de los ensayos a compresión del Sureshot AF.	142

Fig. 7.9.	Resultados de los ensayos a compresión del Meyco SA160.	143
Fig. 7.10.	Resultados obtenidos de resistencia al os 28 días comparados con el patrón.	144
Fig. 7.11.	Porcentaje de resistencia ganada con respecto a la alcanzada a los 28 días.	146
Fig. 7.12.	Porcentaje de resistencia ganada con respecto a la alcanzada a los 28 días.	147

LISTA DE SIMBOLOS

Abs	= Absorción
Al	= Auminio
Ca	= Calcio
Cl	= Cloro
CH	= Contenido de Humedad
C3A	= Aluminato Tricálcico
C2S	= Silicato Bicálcico
C3AP	= Aluminoferrato Tricálcico
C3S	= Silicato Tricálcico
Fe	= Hierro
f_c	= Resistencia a la compresión real
f'_c	= Resistencia a la compresión
H	= Hidrógeno
K	= Potasio
L	= Longitud del lado de la probeta cúbica
L_o	= Constante Empírica
Mg	= Magnesio
N	= Nitrógeno
Na	= Sodio
O	= Oxígeno
$P_{compactado}$	= Peso compactado
Pe	= Peso Específico de Masa

P_{natural}	=	Peso en estado natural
P_{seco}	=	Peso en estado seco
P_{sss}	=	Peso en estado saturado superficialmente seco
P.U	=	Peso Unitario
S	=	Azufre
Si	=	Sílice
V_{balde}	=	Volumen de balde
V_{sss}	=	Volumen en estado saturado superficialmente seco
σ_{cub}	=	Resistencia a la compresión obtenida del ensayo

INTRODUCCION

El siguiente estudio se basa en la gran cantidad de aditivos presentes en el mercado actual, en las diferentes dosificaciones y precios que generan duda acerca de la existencia de alguna dosificación ideal que cumpla con los requisitos del proyecto a ejecutar.

No solamente es importante la elección de un aditivo acelerante de fragua para shotcrete que logre balancear adecuadamente la ganancia temprana de resistencia a la compresión y la descompensación en la pérdida de resistencia final a la compresión; es importante también balancear la cantidad de aditivo a dosificar en la mezcla para obtener un shotcrete de buena calidad y a un precio justo.

El siguiente estudio presenta una comparación entre 3 marcas de aditivos que compiten entre sí dentro del mercado nacional: SIKA con su producto Sigunit L-50 AF, EUCO con su producto Sureshot AF y BASF con el producto Meyco SA160, cada cual con dosificaciones propias de acuerdo a la recomendación de cada fabricante.

El objetivo principal es el de encontrar un aditivo que, al menor costo, logre garantizar una resistencia inicial adecuada sin perjudicar la resistencia final a tal punto de que ésta no alcance los niveles requeridos por el proyecto (35 Mpa de resistencia a los 28 días).

CAPÍTULO I. CONCRETO PROYECTADO

1.1 Generalidades

El término shotcrete es utilizado para referirse a aquel concreto o mortero proyectado mediante equipos especiales para realizar dicha labor.

El uso de shotcrete o concreto lanzado fue inicialmente usado para el sostenimiento de excavaciones subterráneas para la industria de la ingeniería minera. El ingeniero australiano Ladislaus von Rabcewicz (1883 – 1975) fue el responsable del inicio de la utilización del shotcrete para soporte en la década de los años treinta.



Fig. 1.1 Concreto proyectado o shotcrete

En los últimos años el uso del shotcrete como soporte para excavaciones subterráneas en el ámbito minero ha ido en aumento. Sin embargo, todavía existen aspectos en los cuales se pueden realizar investigaciones para aumentar y facilitar su uso, ya que restricciones como accesos difíciles o condiciones inusuales de carga necesitan aún de mayor profundización para poder ser resueltos.

En el código ACI 506R – 05, define al shotcrete como "concreto o mortero neumáticamente proyectado a alta velocidad sobre una superficie". Además, el concreto lanzado es colocado y a su vez compactado debido a la velocidad con la que es lanzado contra la superficie. Esta colocación y compactación puede ser realizada sobre cualquier posición de superficie, ya sea vertical o invertida.

Los componentes básicos del concreto lanzado son el cemento, agregado fino y agua, adicionando una dosis de aditivo acelerante debido a que el shotcrete debe ganar una resistencia temprana alta para poder estabilizar la porción de roca que ha sido desequilibrada debido a la excavación. Se le puede adicionar fibra de acero para aumentar su resistencia a la flexión y/o micro sílice para aumentar su resistencia a la compresión.

La base de un buen shotcrete son buenos materiales, así como también un equipo adecuado de lanzado. Además, el control de calidad en campo y una adecuada manipulación de los equipos y materiales son fundamentales para lograr un shotcrete de alta calidad.

En otros países, también se le conoce al shotcrete como gunita o concreto esprayado. (Sprayed Concrete).

1.2 Métodos de Aplicación

Existen 2 métodos de aplicación del concreto proyectado:

1.2.1 Aplicación por Vía Seca

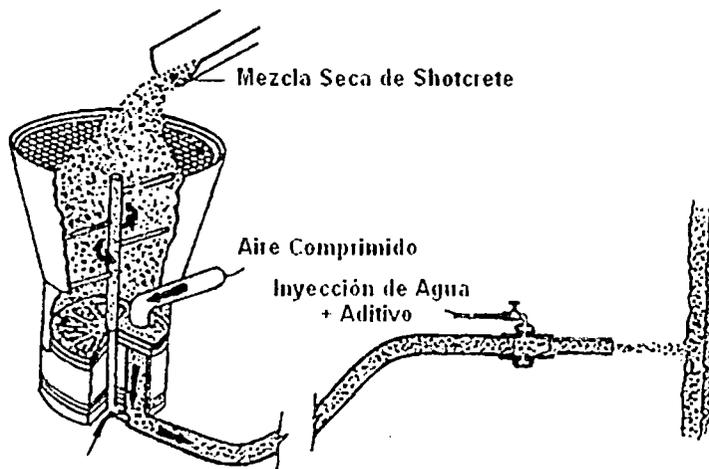


Fig. 1.2 Esquema de una mezcladora típica de Shotcrete mediante vía seca.
(Mahar, 1975)

Los materiales para el shotcrete mediante vía seca son mezclados y vaciados en una tolva, en el cual son agitados continuamente. Una vez dentro de la tolva, se utiliza aire comprimido adicionado mediante barril rotatorio (la inclusión de aire varía de acuerdo al equipo utilizado) para enviar los materiales en un flujo continuo a lo largo de la manguera de envío.

El agua es agregada en una forma pulverizada antes de la boquilla de lanzado al final de la manguera. De la misma manera, el aditivo acelerante que generalmente se utiliza para el shotcrete es incluido junto con el agua de forma pulverizada para garantizar una buena mezcla con los materiales del shotcrete (cemento, agregados, micro sílice, fibra de acero, etc.).

Debido a que el agua es agregada al final del proceso de lanzado, dentro de la mezcla, los agregados tienen una apariencia brillante debido a la mezcla con el agua, y la mezcla tiene una apariencia húmeda.



Fig. 1.3 Aplicación de shotcrete mediante vía seca

Generalmente se utiliza cuando se van a realizar trabajos con volúmenes pequeños de shotcrete, o en casos en que el acceso a la excavación sea de dimensiones limitadas y es muy difícil el acceso de maquinarias de grandes proporciones. También es utilizado cuando es importante que la resistencia inicial sea alta, como por ejemplo cuando se utiliza para sellar filtraciones de agua, obras de impermeabilización o cuando se realizan trabajos de reparación en concreto.

1.2.2 Aplicación por Vía Húmeda

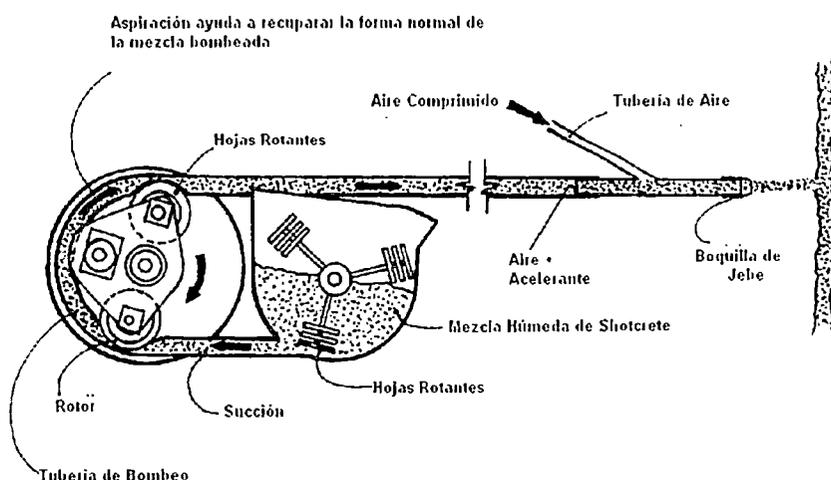


Fig. 1.4 Esquema de una mezcladora típica para Shotcrete mediante vía húmeda
(Mahar, 1975)

Cuando los componentes son mezclados añadiendo el agua a la mezcla (generalmente en un mixer o una planta mezcladora) antes de ser llevado al equipo a utilizar para el lanzado del shotcrete se le conoce como aplicación por vía húmeda.

Como se puede ver en el esquema (Fig. 1.3), estos equipos para el lanzado del shotcrete vía húmeda deben contar con una potencia mayor para poder hacer circular la mezcla a lo largo del recorrido, ya que es muy diferente el impulsar la mezcla en seco que la mezcla húmeda. Otro punto a mencionar es el slump que debe tener la mezcla para poder ser bombeado de una manera efectiva; generalmente el slump utilizado es 5" – 6".

Finalmente, el producto obtenido por ambos métodos de aplicación es muy similar. El método por vía seca es ampliamente utilizado en la minería, debido a que, como se mencionó anteriormente, las reducidas dimensiones de los túneles dificultan el acceso de grandes equipos de mezclado dentro de las galerías de excavación.



Fig. 1.5 Aplicación de shotcrete mediante vía húmeda.

En cambio, el método de aplicación mediante vía húmeda es usado para grandes volúmenes de concreto lanzado, aplicado tanto a la minería como a la ingeniería civil; ya sea por grandes longitudes de túneles o accesos suficientemente grandes para la movilización de todo el equipo de mezclado y lanzado.

El concreto proyectado por vía húmeda es generalmente utilizado cuando se requiere un alto rendimiento y una alta calidad del concreto endurecido.

Una principal diferencia entre éstos 2 métodos (dejando de lado el tamaño de los equipos y las dimensiones de los accesos), existen 2 características en las que difiere un método del otro: Rebote y generación de polvo.

- Rebote:

Se le conoce como rebote a la cantidad de material que no logra adherirse a la superficie al momento de ser lanzado, y uno de los desafíos más complejos es el de reducir la cantidad de material de rebote.

Existen muchos factores que influyen en este aspecto, motivo por el cual es muy complicado crear un control sistemático del lanzado. Sin embargo, es posible asegurar de que el factor principal es el operador de la boquilla. La experiencia y habilidad del operador influye enormemente en la cantidad de material de rebote. En muchos casos, si no se cuenta con un operador capaz de realizar un buen trabajo, la cantidad de material de rebote puede llegar hasta valores de 50% de rebote.

Dentro de los demás factores que influyen en la cantidad de rebote, encontramos:

- Experiencia y pericia del operador de la boquilla.
- Dirección de lanzado (hacia abajo, hacia arriba o en dirección horizontal).
- Proceso de lanzado (vía seca o vía húmeda).

- Diseño del concreto proyectado (acelerante, agregado, fibra, etc.)
- Condición de la superficie (uniformidad, adherencia, humedad).

En un principio, el material que rebota es el agregado de la mezcla, ya que es imperativo crear primero una capa de adherencia sobre el sustrato sobre el cual se realizará el lanzado.

A groso modo, podemos estimar la cantidad de material de rebote dependiendo del método a utilizar: para vía seca, la cantidad de rebote para posición vertical en dirección hacia arriba varía entre 20% a 30%; mientras que para la vía húmeda para la misma posición y dirección varía entre 5% a 15%.

El material de rebote también puede ser reciclado y vuelto a usar, siempre y cuando sea tratado de manera adecuada.

- Generación de Polvo.

Todo tipo de aplicación de shotcrete genera polvo. Por ejemplo, al aplicar shotcrete mediante vía seca existe una tendencia natural a la generación de polvo.

Entre las medidas que se pueden tomar para reducir la generación de polvo están:

- Utilización de agregados ligeramente humedecidos.
- Sellamiento del sistema de transporte.
- Parámetros de la boquilla adecuados y correctamente ajustados.
- Uso de acelerantes de fragua libres de álcali.
- Aditivos para concreto proyectado que aglutinen el polvo.

A pesar de las medidas mencionadas, el método por vía seca genera una mayor cantidad de polvo comparado con el método por vía húmeda (de dos a tres veces más).

1.3 Técnica de Lanzado

El concreto proyectado se aplica por capas, ya sea mediante la misma operación mediante lanzado repetitivo sobre la misma área o en una operación siguiente. Después de una larga pausa la superficie debe limpiarse y remojarse. La cantidad de material a aplicar en cada operación depende de varios factores:

- Adherencia de la mezcla de concreto proyectado.
- Naturaleza del sustrato.
- Proceso de lanzado.
- Volumen de lanzado.
- Dirección de lanzado.
- Obstrucciones (refuerzo/agua).

Hay que tener diferentes consideraciones para las diversas direcciones de lanzado:

- Al lanzar hacia abajo, es posible aplicar capas de cualquier espesor. Sólo hay que asegurar de que el rebote sea desechado para que no se quede sobre la superficie.
- Al lanzar horizontalmente se puede ir aumentando el espesor paulatinamente en capas delgadas, o el espesor completo puede ser lanzado de abajo hacia arriba en dirección inclinada. Nuevamente, se debe retirar el material que rebota en el fondo antes de aplicar otra capa.
- Al lanzarse verticalmente hacia arriba, el peso propio del material y la adherencia del shotcrete se anulan entre sí de manera que se debe trabajar con capas más delgadas. Como una regla a tener en cuenta, a menor volumen de lanzado y capas más delgadas, se genera un menor rebote.

El concreto debe ser aplicado en ángulo recto con respecto al sustrato o al concreto colocado. Esto maximiza la adherencia y la compactación, y a su vez minimiza el rebote.

La distancia óptima para lanzar es de 1.2 a 1.5 m de distancia, pero a menudo se hace dentro del rango de 1 a 2 m. A distancias mayores se aumenta el rebote y la generación de polvo, con lo que se reduce la eficiencia de aplicación.

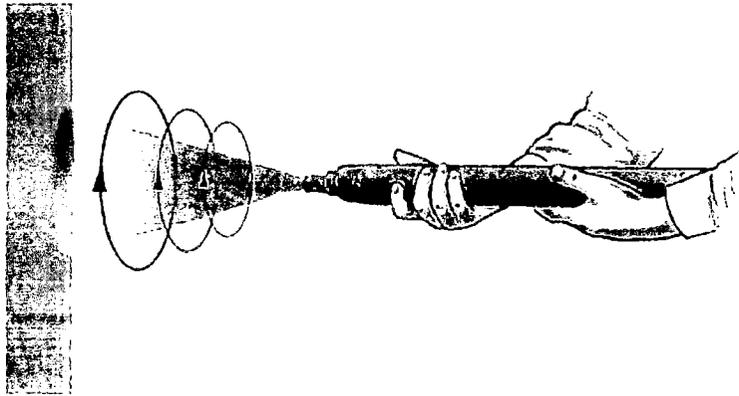


Fig. 1.6 Manejo de la manguera. (Mediante pequeños movimientos circulares)

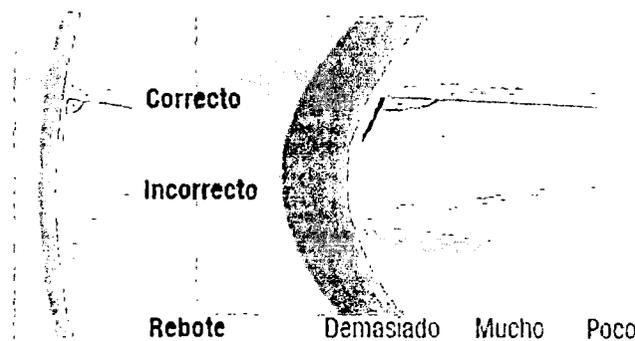


Fig. 1.7 Influencia del ángulo en el rebote.

1.4 Usos del Concreto Proyectado

En la construcción, el concreto proyectado es utilizado en una gran diversidad de proyectos. Las principales ventajas del shotcrete frente al concreto armado convencional es la flexibilidad y economía, razones por las cuales sobresale en edificaciones superficiales, tunelería y construcciones subterráneas especiales. Dentro de los proyectos donde se aplica el concreto proyectado encontramos:

- Estabilización de excavaciones en túneles y construcciones subterráneas.
- Revestimiento de túneles y cámaras subterráneas.
- Estabilización en construcción de minas y galerías.

- Reparaciones en concretos (reforzamiento).
- Trabajos de impermeabilización (sello de filtraciones).
- Estabilización de zanjas y taludes.
- Estructuras especiales portantes livianas.
- Aplicaciones artísticas.



Fig. 1.8 Utilización del shotcrete para construcción de canales. (Carretera del Pacífico, Australia)



Fig. 1.9 Utilización del shotcrete en estabilización de taludes en California

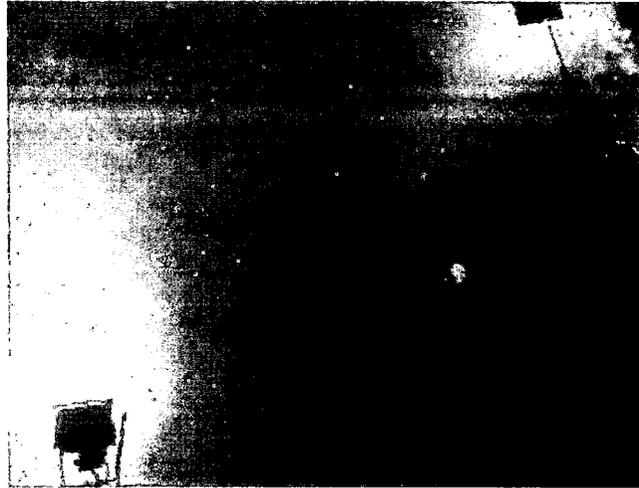


Fig. 1.10 Aplicación de shotcrete como sostenimiento de galería para minería
(Orcopampa. Arequipa)



Fig. 1.11 Preparación de shotcrete con fibra para sostenimiento (La Granja, Cajamarca)

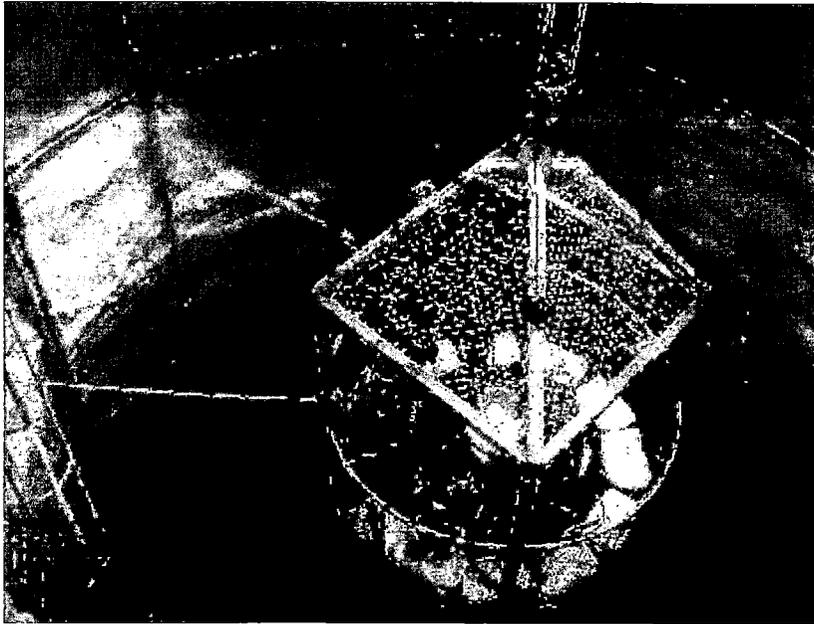


Fig. 1.12 Sostenimiento con shotcrete de chimenea de equilibrio (Platanal, Cañete)

Ordenándolos según términos de importancia, la lista está encabezada por tunelería, luego por minería y seguido por reparaciones estructurales. Dentro de los campos de tunelería y minería, el shotcrete es usado como revestimiento de los arcos, ya sea de manera temporal o permanente.

Específicamente dentro del alcance de tunelería, el concreto proyectado puede ser utilizado para todo tipo de túneles: Ferroviarios, vehiculares, drenaje de aguas y hasta estructuras militares subterráneas. Adicionalmente al tema de tunelería, también es importante su aplicación en estabilización de taludes.

Esta aplicación del shotcrete está regido por las sollicitaciones de la roca. Al decir esto hacemos mención a que la resistencia y el espesor de las capas de shotcrete van a estar sujetos al estado de la roca: capacidad portante y sustrato a través del cual se realiza el trabajo.

Uno de los parámetros más usados para dicho cálculo es el RMR (Rock Mass Rating), utilizado para identificar el estado actual de la roca.

1.4.1 Estabilización

Sin exagerar, podemos asegurar de que el concreto proyectado es el material perfecto para estabilizar excavaciones. La flexibilidad, el rendimiento, desarrollo de resistencia inicial alta y la capacidad de ser proyectado en cualquier momento sobre concreto existente, hacen del shotcrete el material más adecuado para las estabilizaciones.

Se debe diferenciar entre excavación total y parcial, según la capacidad de soportar carga y la estabilidad de sustrato. La excavación se realiza mediante voladura o mediante métodos mecánicos. A menudo, sondeos preliminares o túneles piloto estrechos preceden a la construcción principal frente a condiciones de terreno difíciles. En todas estas aplicaciones el concreto lanzado es utilizado para estabilizar si la superficie excavada no es lo suficientemente estable como para sostenerse a sí misma.



Fig. 1.13 Estabilización de un talud adyacente a la vía. (Carretera de Hume, Australia)

Si la capacidad del shotcrete misma no es suficiente para poder soportar la sollicitación del macizo rocoso, es posible reforzar la mezcla al añadirle fibras de refuerzo, las cuales aportan capacidad de soporte, mejorando su calidad. También es posible incluir pernos de anclaje, aunque su aplicación genera un mejoramiento de la capacidad de soporte por zonas (es decir, tiene principalmente un efecto local).

Como todo método de construcción, las obras subterráneas han evolucionado históricamente de acuerdo a las condiciones locales (en este caso principalmente geológicas) de cada región. Debido a ello y a la gran diversidad de proyectos, se han desarrollado distintos métodos constructivos.

Dentro de la excavación parcial tenemos el método ATM (Método Austríaco de Construcción de Túneles), el método de apuntalamiento Belga y método de núcleo alemán. La sección completa se divide en sectores más pequeños que se estabilizan temporalmente para finalmente unirse para completar la sección.

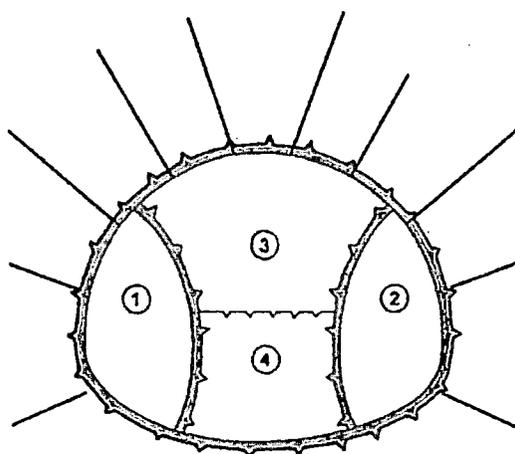


Fig. 1.14 Avance en paredes de galería. (Fuente: SIKA)

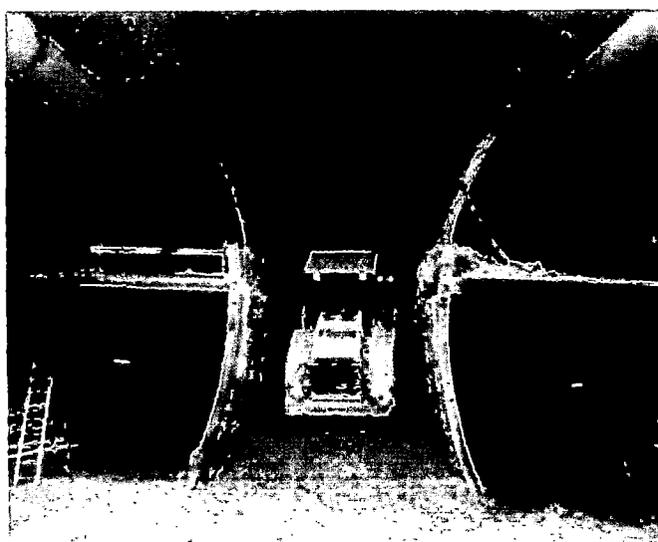


Fig. 1.15 Método de Núcleo Uetliberg (núcleo alemán)

Por otro lado, en el método de excavación completa, los equipos tienen un enorme potencial de desarrollo. Los equipos de aplicación de concreto proyectado se instalarán permanentemente en las máquinas de perforación de túneles.

1.4.2 Revestimiento

El revestimiento de un túnel es la carta de presentación visible del contratista de túneles, con una excepción: el revestimiento final con enchape. Como revestimiento interior se utiliza tanto el concreto proyectado como el concreto convencional.

El concreto producido convencionalmente requiere de una gran energía de compactación, ya que el revestimiento interior generalmente es de un espesor significativo, el acceso es usualmente complicado, por lo cual se tendría que utilizar unos vibradores especiales conocidos como vibradores de formaletas, aunque ellos tienen una profundidad de efecto limitado, por lo cual se necesitará un trabajo muy intenso y estarán sujetos al desgaste, lo cual resulta en contaminación activa adicional significativa.

Revestimiento final durable (Método de construcción)	Ventajas del método seleccionado
Revestimiento en concreto proyectado	<ul style="list-style-type: none"> - Utilización de la instalación existente para shotcrete. - Más económicos en túneles cortos. - No se necesitan instalaciones adicionales. - Funciona como revestimiento final y estabilización. - Una sola operación completa.
Revestimiento en concreto de vaciado convencional	<p>Mucha mayor precisión en la uniformidad del acabado del concreto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Utilización de aire comprimido para colocación. - Mejor visibilidad. - Apariencia más atractiva.

	<ul style="list-style-type: none">- Instalación más sencilla. <p>Homogeneidad de la calidad del concreto más claramente controlada sin el parámetro de la aplicación del proyectado.</p> <p>Sin el requerimiento de "resistencia a muy temprana edad", hay mayores opciones en la mezcla de concreto para los requerimientos de durabilidad.</p>
--	--

Tabla 1.1 Comparación de revestimiento con ambos concretos (Fuente: SIKA)

1.5 Requerimientos del Concreto Proyectado

Básicamente, los requerimientos principales de la mezcla se centran en la manejabilidad (bombeabilidad, proyección del concreto) y en la durabilidad:

- Alta resistencia a temprana edad.
- Buena bombeabilidad.
- Adecuadas características de fraguado de concreto.
- Diseño de mezcla adecuado para lanzar.
- Manejabilidad adecuada para el operario.
- Mínimo rebote.

1.6 Propiedades del Concreto Proyectado

Dentro de las propiedades más importantes del concreto proyectado se puede citar:

- Tiempo de Fragua: En el caso del shotcrete, el tiempo de fragua no pasa de unos cuantos minutos, a diferencia del concreto vaciado convencionalmente, que suele ser de aproximadamente 2 horas. Se le puede definir como el inicio del proceso del endurecimiento del concreto, ya que ambos estados (de fraguado y de endurecimiento), son eventos separados por nombre, ya que el proceso de hidratación es uno solo.

- Resistencia Muy Temprana: El shotcrete, como material utilizado para la estabilidad de túneles y taludes, debe desarrollar una adherencia adecuada entre la superficie sobre la cual se aplica el shotcrete y el shotcrete en sí, ya que éste es un factor decisivo en el proceso del lanzado del concreto.

Gran responsabilidad tiene la presión de aire con la cual es proyectado el concreto sobre la superficie a recubrir: una menor cantidad de aire tiene como consecuencia una baja adherencia y a su vez una disminución en la resistencia final alcanzada; mientras que una mayor cantidad de aire produce mayor cantidad de polvo y rebote.

Es posible realizar una medición de la resistencia a edades muy tempranas a los minutos de lanzado el shotcrete, a diferencia del desarrollo de resistencia temprana que es cuantificable al medirlo luego de cierta cantidad de horas pasado el momento del lanzado del concreto.

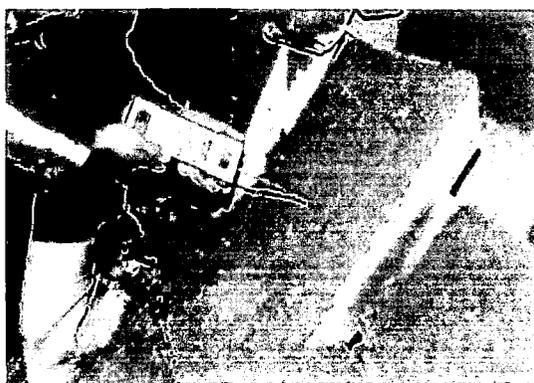


Fig. 1.16 Método de Penetración con Aguja – Resistencia Muy Temprana

Este tipo de resistencia es medida propiamente en campo utilizando una aguja a presión sobre el concreto recién proyectado. La resistencia es deducida por la resistencia que el concreto ofrece a la penetración.

- Resistencia Temprana: Como se mencionó, la resistencia temprana es medible después de horas del lanzado (generalmente después de la primera hora de lanzado). Ésta resistencia determina, en la perforación de túneles), la posibilidad de continuar con el avance del frente.

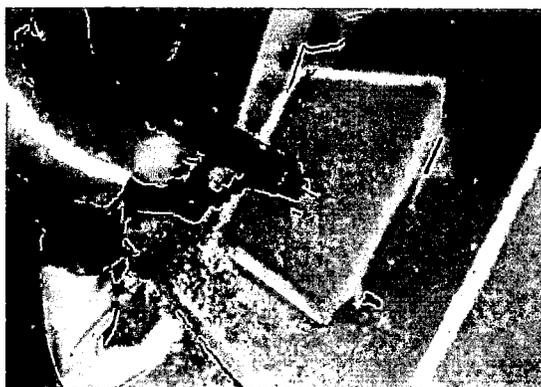


Fig. 1.17 Método de Proyectil – Resistencia Temprana

Es posible realizar la medición de la resistencia temprana en campo utilizando una broca y un disparador. En este caso la resistencia a la compresión se mide de acuerdo a la penetración de la broca y la fuerza necesaria para extraer la aguja.

- Resistencia Final: Así como existen requerimientos mecánicos a cumplir para las resistencias muy temprana y temprana, la resistencia final (a los 28 días) es el nivel de resistencia que se basa según los requerimientos de diseño.
- Tenacidad: La capacidad para el shotcrete de absorber la energía mediante la deformación está ligada principalmente a la fibra de refuerzo que lleve, ya que una vez llegada a la rotura, es la fibra de refuerzo la encargada de trabajar asumiendo la carga. La dosificación de la fibra de refuerzo y el tipo (ya sea de acero o sintética) determina la capacidad de absorción de energía.

En capítulos posteriores se explica los ensayos respectivos que se realizan para la determinación de algunas propiedades mencionadas anteriormente (principalmente la resistencia a la compresión y la tenacidad).

1.7 Seguridad en Aplicación

La seguridad es un concepto básico en la construcción. Especialmente en la colocación del concreto proyectado, ya que emplea maquinaria altamente

eficiente (hidráulicas/neumáticas/electrónicas) con un método de aplicación en el cual el concreto se lanza junto con el aire. Sus empleadores y toda aquella persona cerca a la zona de aplicación deben estar protegidos.

Los riesgos son:

- Transporte.- La mezcla de concreto proyectado es transportado mediante vehículos grandes, usualmente en espacios pequeños y con poca luz. Las precauciones que deben tomarse en cuenta son: vestir ropas protectoras de alta visibilidad, contar con una buena iluminación en el vehículo y contar con una señal de alarma audible para dar reversa.
- Transferencia del concreto.- Contar con vigilancia para prevenir el acceso a la unidad transportadora y con equipo de protección personal (gafas protectoras contra salpicaduras).
- Acarreo.- Tanto del concreto proyectado, los acelerantes de fragua y aire hasta el sitio de aplicación: mantenimiento frecuente del equipo (de acuerdo a un plan, verificando principalmente los tubos y mangueras), entrenamiento apropiado del personal técnico y de los mecánicos, iluminación y protección personal adecuada.
- En la aplicación.- El equipo del personal (debe ser a prueba de impacto, gafas protectoras, casco, guantes, mascarillas de respiración, protectores de oídos, botas de seguridad y vestimenta que proteja todo el cuerpo), entrada prohibida a áreas desprotegidas o recientemente proyectadas.
- Personal no activo.- Deberán permanecer fuera del área de lanzado. Si están presentes, deben portar el mismo equipo de protección que el personal activo.

1.8 Calidad del Concreto Projectado

Es importante que el contratista suministre un plan de aseguramiento de calidad como parte de los ensayos iniciales de calificación y también para aseguramientos de calidad periódicos. Se deben revisar todos los parámetros relevantes de calidad y confiabilidad de una manera lógica y estructurada para obtener un concreto projectado de alta calidad.

PROCESO	ETAPA	PARÁMETRO DE PRUEBA	FRECUENCIA
Componentes	Agregados	Humedad	Cada suministro
		Curva de Gradación	Cada suministro
		Composición de Partículas	Periódicamente
	Cemento/Adiciones	Documentos de Suministro	Cada suministro
	Aditivos	Documentos de Suministro	Cada Suministro
Producción de Concreto	Planta de Mezcla	Equipos de Pesaje/Mezcla	Según plan de mantenimiento
	Planta de Concreto	Consistencia en la Producción	Cada suministro
	Concreto Fresco	Inspección de Concreto Fresco	Periódicamente
		Contenido de Agua	
		Densidad del Concreto Fresco	
		Temp. (concreto/aire)	
Consistencia			
	Contenido de Aire		
Transporte	Equipo de Mantenimiento	Mantenimiento	
Aplicación	Equipos para Proyección de Concreto	Mantenimiento	Según plan de mantenimiento
		Partes de Desgaste	
		Aire/Concreto	
		Dosificación del Acelerante	
	Concreto Projectado	Consistencia	Diariamente
		Resistencia Muy Temprana	Según velocidad de colocación
		Resistencia Temprana	
Resistencia Final			
Durabilidad			

Tabla 1.2 Parámetros de Calidad (Fuente: SIKA)

CAPÍTULO II. MATERIALES COMPONENTES DEL CONCRETO

2.1 El Cemento

2.1.1 Generalidades

El cemento es un aglomerante, en forma de un polvo muy fino que en presencia de agua se endurece, dando lugar a una mezcla uniforme y rígida, logrando propiedades resistentes y adherentes.

Su utilización viene dado en pastas de cemento al mezclarlo con agua; morteros, tanto para ligar unidades de albañilería como para el tarrajeo; y en el concreto, al mezclarlo con agregados gruesos, finos, agua y aditivos.

Los antecedentes del cemento se remontan hasta el siglo XVIII, donde hasta dicho momento los aglomerantes usados eran solamente el yeso y la cal. Es durante este siglo que despierta un gran interés por el conocimiento del cemento.

En 1758, el ingeniero John Smeaton, natural de Yorkshire, Inglaterra, al reconstruir el faro de Eddystone, nota que los morteros con adiciones puzolánicas a una caliza con alta proporción de arcilla, se comportan mejor frente a la presencia de aguas marinas, logrando una fragua y un endurecimiento bajo estas.

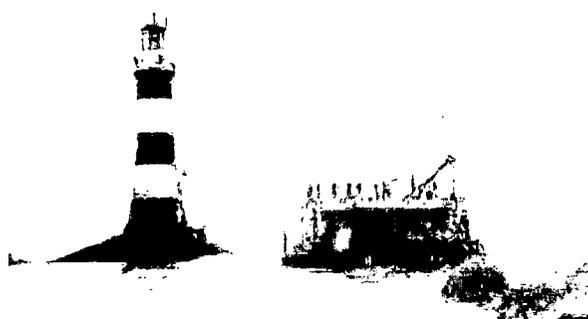


Fig. 2.1 Faro de Eddystone, en la costa de Cornish

En 1817, el investigador Vicat propuso el sistema de fabricación de cemento, el cual es utilizado hasta la actualidad. El mismo Vicat publicó sus trabajos "Recherches experimentales" y "Mortiers et ciments calcaires" en 1818 y 1828 respectivamente, en donde indica las pautas a seguir para la fabricación de cemento mediante la mezcla de arcillas y calizas dosificadas en proporciones convenientes y molidas en conjunto.

En 1824, el constructor Joseph Aspdin, da a conocer el cemento portland y lo patentaba como un material pulverulento que al mezclarse con el agua y con arena, endurecía y formaba un conglomerado de un aspecto muy parecido a la caliza de las islas de Portland.

En 1838, Brunel utiliza por primera vez un cemento salido de la fábrica de Aspin. Este mismo cemento se aplicó más adelante en la construcción de túnel bajo el río Támesis en Londres.

En el año 1845, Isaac Johnson logra conseguir lo que se conoce como el prototipo del cemento moderno, logrando conseguir temperaturas lo suficientemente altas para clinkerizar la mezcla de arcilla y caliza empleada como materia prima.

Con el intenso desarrollo de la industria de la construcción de puentes, diques, puertos, ferrocarriles, etc. a partir de la mitad del siglo XIX, el cemento tomó una gran importancia y las fábricas de cemento se empiezan a expandir.

A partir del siglo XX, empieza un descenso veloz en el consumo de los cementos naturales, debido a que los cementos portland se imponen sobre estos en las obras de ingeniería.

En la actualidad, el cemento ha llegado a ser uno de los materiales industrializados de construcción más utilizados, ya que este constituye la parte principal del concreto, un material resistente y duro que se trabaja en forma líquida, dando una gran versatilidad en la obtención de formas y figuras para exteriores.

2.1.2 Fabricación del cemento Portland

El cemento Portland proviene básicamente de una combinación de materiales calcáreos, sílice y alúmina.

El proceso de fabricación se inicia con la mezcla y molienda de las materias primas hasta obtener un polvo fino conocido, como se mencionó antes, como clínker. Luego debe ser cocido en un horno rotatorio a temperatura que (aproximadamente de 1400°C). Esto ocasiona que el material se funda parcialmente, logrando una mezcla de silicatos y aluminatos cálcicos.

Luego de ser enfriado, el clínker se molido en conjunto con una cantidad determina de yeso, hasta que se convierta en un polvo muy fino. Este producto resultante es conocido como cemento Portland y es aquel que es vendido comercialmente en bolsas o a granel.

2.1.3 Composición Química del Cemento

Las materias primas empleadas para la elaboración del cemento portland son principalmente cal, sílice y alúmina. Con dichos componentes que son mezclados, molidos y cocidos en un horno se producen compuestos más complejos.

Los estudios de tesis doctoral de Le Chatelier, en el año 1887, muestran la composición química del cemento portland y las reacciones químicas que suceden cuando es mezclado con agua.

Es importante conocer la química del cemento ya que la química controla las propiedades del concreto. Explica cómo el concreto obtiene las características que desarrolla al realizar la mezcla de cemento con agua.

Los minerales más importantes identificados con los estudios de Le Chatelier dentro del cemento son el silicato tricálcico, el silicato bicálcico y aluminato tricálcico. Además podemos citar también al aluminoferrato tetracálcico, los cuales serán mencionados a continuación a detalle:

- SILICATO TRICÁLCICO: C3S

- También conocido como Alita.
- Uno de los componentes mayoritarios en el cemento.
- Genera un rápido endurecimiento al cemento, contribuyendo en gran parte a las resistencias iniciales.
- Libera un gran cantidad de calor al hidratarse, lo cual es perjudicial al trabajar con grandes volúmenes de concreto.
- Obtención del Silicato Tricálcico (Fórmula 1.1):



La presencia del silicato tricálcico en el cemento mejora el comportamiento de este en los ciclos de hielo y deshielo, y su uso es recomendable en climas fríos.

- SILICATO BICÁLCICO: C2S

- También conocido como Belita.
- El segundo componente de mayor presencia en el cemento portland.
- Desarrolla una lenta velocidad de hidratación, aportando muy poca resistencia temprana al concreto.
- Principal agente en la resistencia posterior en el concreto.
- Desarrolla a su vez un bajo calor de hidratación.



Se puede decir que el silicato bicálcico es químicamente estable, por lo que su uso es recomendado para producir concretos de alta resistencia al ataque de los sulfatos.

- ALUMINATO TRICÁLCICO: C3A

- Presente en menor proporción que los silicatos.
- Susceptible a los ciclos de hielo y deshielo, así como a la acción de los sulfatos y cloruros, debido a la formación de sales (del tipo sulfoaminatos y cloroaminatos, los cuales son expansivos).
- La reacción más rápida al mezclar el cemento con agua es la del aluminato tricálcico. El ataque por los sulfatos se traduce en la formación de sulfoaluminato de calcio, la cual puede causar fisuramientos.



- ALUMINOFERRATO TRICÁLCICO: C3AF

- Presente en una cantidad muy pequeña.
- No influye significativamente en el comportamiento del cemento.
- Reacciona con el yeso para formar suloferrito de calcio y puede acelerar la hidratación de los silicatos.

Dentro de los otros compuestos importantes en el cemento encontramos:

- ÓXIDO DE MAGNESIO: MgO

- El óxido de magnesio procede al carbonato de magnesio que está mezclado con las materias primas, especialmente con la caliza. Al enfriarse el clínker se puede convertir en periclasa, y esta al hidratarse aumenta su volumen, pudiendo generar agrietamientos sobre el concreto endurecido. Es por ello que el contenido de óxido de magnesio debe ser mínimo para evitar estos problemas.

- ÓXIDO DE CALCIO LIBRE: CaO
 - o El óxido de cal libre se puede hidratar como el óxido de magnesio , ocurriendo lo mismo con este componente y generando los mismos efectos no deseados, ya que también puede producir aumento en volumen y rajaduras.

- TRIÓXIDO DE AZUFRE: SO₃
 - o Procedente de los combustibles que se adicionan al horno giratorio, pueden tener una determinada riqueza de azufre, y al producirse la combustión puede generarse este compuesto. Este puede escapar como gas, en zonas con altas temperaturas; pero si no se encuentra en zonas de altas temperaturas como en el horno, éstos producen sulfato de calcio.

- ÓXIDO DE POTASIO Y ÓXIDO DE SODIO: K₂O y Na₂O
 - o Las arcillas pueden tener cierta cantidad de potasio y sodio, y es conveniente de que sean eliminados por volatilización. Si es que no son eliminados totalmente, mediante la cocción se pueden mezclar con el CO₂ atmosférico y generar carbonatos, los cuales generan el riesgo de que ocurra un falso fraguado.

2.1.4 Tipos de Cemento y sus Aplicaciones

Los cementos portland al ser hidratados pueden desarrollar propiedades particulares (debido a diferentes composiciones químicas). Por tanto es posible seleccionar proporciones de materias primarias para la producción de varios tipos de cemento según los requerimientos que se tengan.

La normativa internacional ASTM C-595 y la NTP 334.009 son las encargadas de enunciar los requisitos para los cementos Portland hidráulicos.

Actualmente existen 5 tipos distintos de cemento portland que se diferencian por su composición química; mas no por los materiales, si no por la proporción y cantidad de cada compuesto dentro del cemento.

Estas variaciones se han venido dando debido a las diversas condiciones en las cuales se trabaja el concreto, tratando siempre de asegurar la durabilidad del concreto.

Dentro de los tipos de cemento portland, encontramos las siguientes proporciones de compuestos:

Cemento	C3S	C2S	C3A	C3AF	CaSO4	CaO libre	MgO
Tipo I	59	15	12	8	2.9	0.8	2.4
Tipo II	46	29	6	12	2.8	0.6	3.0
Tipo III	60	12	12	8	3.9	1.3	2.6
Tipo IV	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
Tipo V	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

Tabla 2.1 Valores Promedios Típicos de la composición de cementos Portland (Fuente: Neville, Adam. "Tecnología del Concreto". México, 1998).

Una propiedad deseada en el concreto puede generar consecuencias no deseadas en otros aspectos; por ello es necesario hacer un balance de requerimientos y tener en cuenta el aspecto económico en la elección.

Actualmente, la tecnología de producción ha mejorado con el paso del tiempo y se ha dado un desarrollo un mejoramiento continuo de cementos para diferentes propósitos, con el correspondiente cambio en las especificaciones.

Actualmente, se citarán algunos tipos de cementos que se utilizan en la actualidad, sin embargo, no todos ellos existen en nuestro país:

2.1.4.1 Cemento Portland Tipo I (común)

Éste cemento es el más empleado en las construcciones de concreto, donde no existen situaciones de exposición a sulfatos ni en el suelo ni en el agua.

A través de los años las características del cemento Portland Tipo I han ido cambiando; los cementos modernos tienen un mayor contenido de C3S y una mayor finura a comparación de aquellos de hace 40 años. Por ello, los cementos actuales tienen una mayor resistencia a las 28 días, aunque la ganancia de resistencia es menor.

El cemento Portland tipo I es un cemento de aplicación general y el más ampliamente usado en las obras de concreto.

2.1.4.2 Cemento Portland Tipo II (resistencia moderada al ataque a sulfatos)

En ciertos casos es desfavorable una resistencia temprana muy lenta. Por ello, este cemento que fue desarrollado en los Estados Unidos de América desarrolla una resistencia temprana un poco mayor en comparación con el Portland tipo I y genera un calor de hidratación mayor al Portland tipo IV y menor al Portland tipo I.

Como podemos observar en su composición química, el cemento Portland tiene una menor proporción de silicato tricálcico y de aluminato tricálcico; y a su vez, una mayor cantidad de silicato bicálcico en su composición, los cuales certifican las características mencionadas en el párrafo anterior, basándonos en la explicación de los aportes de cada compuesto químico dentro de la mezcla del cemento.

2.1.4.3 Cemento Portland Tipo III (endurecimiento rápido)

Su composición química es similar a la del Portland tipo I. Éste cemento desarrolla su resistencia rápidamente debido a una mayor concentración de silicato tricálcico en su composición, que puede llegar a ser hasta un 70% del total, y también debido a su mayor fineza; los cuales son los factores que lo diferencian del Portland tipo I.

2.1.4.4 Cemento Portland Tipo IV (bajo calor de hidratación)

Este tipo de cemento Portland fue también desarrollado en los Estados Unidos de América para ser usados en represas de gravedad, debido a que desarrollan un bajo calor de hidratación.

Según su composición química, debido que su contenido de silicato bicálcico y aluminato tricálcico es menor, el desarrollo de resistencia es menor comparado con el cemento Portland tipo I. Sin embargo, la resistencia final de este concreto no está afectada.

2.1.4.5 Cemento Portland Tipo V (alta resistencia al ataque de sulfatos)

Este cemento posee una baja concentración de aluminato tricálcico, lo cual le brinda una alta resistencia al ataque de los sulfatos desde el exterior del concreto: de lo contrario, la formación de la sulfoaluminato de calcio y yeso producen fracturas en el concreto debido al incremento de volumen de sus componentes resultantes a la reacción.

Para poder lograr esta resistencia a los sulfatos, la normativa ASTM C-150 contempla que el contenido de aluminato tricálcico debe estar limitado a ser el 5% del total, mientras que el contenido de aluminoferrato tetracálcico más el doble del contenido del aluminato tricálcico sea como máximo un 20% del total. El contenido del yeso también está limitado a 2.3%, mientras que el contenido máximo de aluminato tricálcico es aproximadamente de 8% o menos.

El calor desarrollado por el cemento resistente a los sulfatos no es mucho mayor que el del cemento de bajo calor, lo cual es una ventaja; pero el costo del cemento resistente a los sulfatos es mayor, debido a la composición especial de materias primas. Es por ello que el uso de este tipo de cementos es muy poco utilizado en el medio, a no ser que sea absolutamente necesario proteger el concreto de los ataques externos de sulfatos.

2.1.4.6 Cemento Portland especial de endurecimiento rápido

La alta resistencia temprana de estos cementos se logra mediante una mayor fineza y un mayor contenido de yeso. Entre sus usos encontramos al concreto para el pretensado y en reparaciones urgentes.

2.1.4.7 Cemento Portland Tipo IS (de alto horno)

Escoria de alto horno granulado es molido y mezclado junto con los componentes base del cemento. De esta manera, existe un menor consumo de energía al elaborar el cemento.

Las escorias también están compuestas por cal, sílice y alúmina, pero no en las mismas proporciones que el cemento Portland. Esto puede hacer variar su composición considerablemente.

La escoria reaccionan cuando la cal liberada por la hidratación del cemento Portland alcanza una alcalinidad correcta.

Según la ASTM C-595, la cantidad de escoria debe encontrarse entre 25% y 70% de la masa de la mezcla.

2.1.4.8 Cemento Portland Puzolánicos tipo IP, P y I(PM)

Estos cementos se obtienen mediante el mezclado y molienda de puzolanas con el cemento Portland. La norma ASTM C-618 describe como puzolana a todo material silicoso o silicoso y aluminosos que por sí mismo no posee valor como cementante, pero que lo obtendrá cuando se presente finamente molido y en presencia de humedad.

Reacciona a temperaturas normales y tiene reacciones químicas con la cal, la cual proviene de la liberación por la hidratación del cemento Portland), por lo cual se forman compuestos con propiedades aglutinantes.

En general, todos los cementos Puzolánicos generan una resistencia lenta y requieren curado durante un período comparativamente largo. Sin embargo, su resistencia al largo plazo es alta.

2.1.4.9 Cementos Expansivos

Existen muchas razones por la cual es conveniente utilizar un cemento que no cambie de volumen (ni se fracture) por contracción al momento de secarse, o que no se expanda durante el fraguado.

El concreto con este tipo de cemento experimentará una expansión en los primeros días de vida, y al restringirse la expansión con un esfuerzo de acero se logra el pretensado: acero en tensión y concreto en compresión.

Todos los tipos de cementos expansivos producen etringita (o sulfoaminoato de calcio, como es su verdadero nombre), lo cual provoca la expansión de la pasta.

Existe un cemento conocido como tipo M, el cual es elaborado moliendo clinker de cemento portland, escoria de cemento de alto contenido de alúmina y yeso. Esta mezcla se expande a los dos o tres días después de colocado. El concreto logrado con este cemento posee un fraguado rápido y una resistencia muy alta a los sulfatos. Este tipo de cemento está contemplado en la norma ASTM C-845.

Dentro de la misma clasificación de la ASTM se encuentran los cementos expansivos tipo K, los cuales están elaborados de yeso, bauxita y tiza, los cuales son quemados para formar el agente expansivo (sulfato de calcio y aluminato de calcio). Al mezclar este agente con agua, cemento Portland y escorias de alto horno como estabilizador, el exceso de sulfato de calcio es absorbido por las escorias y la expansión es controlada.

Los cementos tipo S también están especificados en la normativa ASTM C-845, los cuales poseen un alto contenido de aluminato tricálcico y además, poseen ligeramente más sulfato de calcio que el cemento Portland usual.

2.1.5 Cementos fabricados en el Perú

La industria de cemento en el Perú produce exclusivamente los tipos y las clases de cementos que demanda el mercado nacional.

En el Perú se producen los cementos del tipo I, tipo II, tipo V, tipo IP, tipo I (PM) y el cemento Portland MS. Los cementos que no se producen, como el de tipo III, pueden ser obtenidos mediante el uso de otro cemento y un aditivo que modifique las características de acuerdo a lo que se requiera.

Dentro de los principales proveedores de cemento encontramos a:

Cementos Lima S.A.:

- Cemento Portland Tipo I: Marca "Sol"
- Cemento Portland Tipo V: Marca "Lima"
- Cemento Portland Tipo IP: Marca "Atlas"

Cemento Andino S.A.:

- Cemento Portland Tipo I
- Cemento Portland Tipo II
- Cemento Portland Tipo V
- Cemento Portland Puzolánico Tipo I (PM)

Cementos Pacasmayo S.A.A.:

- Cemento Portland Tipo I
- Cemento Portland Tipo II
- Cemento Portland Tipo V
- Cemento Portland Puzolánico Tipo IP
- Cemento Portland MS

Cementos Yura S.A.:

- Cemento Portland Tipo I
- Cemento Portland Puzolánico Tipo IP
- Cemento Portland Puzolánico Tipo I(PM)

Cementos Selva S.A.:

- Cemento Portland Tipo I
- Cemento Portland Tipo II
- Cemento Portland Tipo V

Cementos Sur

- Cemento Portland Tipo I
- Cemento Portland Tipo II
- Cemento Portland Tipo V
- Cemento Portland Puzolánico Tipo I(PM)

2.1.6 Cemento a utilizar

Para esta investigación, el cemento a utilizar será el Yura Tipo I debido principalmente a la proximidad de la fábrica hacia la zona de trabajo.



Fig. 2.2 Bolsa de Cemento Portland Tipo I de la marca Yura

Debido a que en el concreto lanzado el tiempo de fragua inicial debe ser muy corto, de todos los cementos que se fabrican en el Perú, el tipo I es el más utilizado, debido a que por su composición, es aquel que cuenta con el tiempo de fragua más corto, entre los concretos tanto Puzolánicos como los tipo II y V que también se fabrican.

Esto no significa de que sea imposible realizarlo con los otros tipos de cemento, también es posible, y así como en el caso del uso del cemento Portland tipo I, se deben realizar los ensayos adecuados para conocer su comportamiento en condiciones reales.

La composición química del cemento Yura tipo I viene dado por:

Elemento	Porcentaje
CaO	65.90%
SiO ₂	22.60%
Al ₂ O ₂	4.15%
Fe ₂ O ₃	2.41%
SO ₃	1.66%
MgO	1.24%
Otros	2.04%

Tabla 2.2 Composición Química del Cemento Yura Tipo I

2.2 Los Agregados

2.2.1 Generalidades de los Agregados

Los agregados se definen como los elementos inertes del concreto, los cuales son aglomerados por la pasta de cemento produciendo una estructura resistente. Generalmente forman del 70% al 75% del total del volumen total de la mezcla de concreto.

En un principio, los agregados fueron considerados como material químicamente inerte y de bajo costo. Sin embargo, el agregado no es químicamente inerte, debido a que en ciertos casos, las propiedades físicas y químicas del agregado pueden afectar el desempeño del concreto, como por ejemplo al afectar su durabilidad.

Desde un punto de vista económico, es más barato contar con una mezcla con mayor cantidad de agregado y una menor cantidad de cemento, pero es imperativo el encontrar el balance ente una buena calidad de concreto y un costo relativamente bajo para no poner en riesgo las características de la obra en la que se está empleando la mezcla de cemento.

Es importante tener en cuenta de que cada agregado posee características particulares, las cuales dependen principalmente de la roca de la cual se han formado. Es decir, dependen de cual haya sido la roca madre y de qué manera se convirtió dicha roca en el agregado suelto.

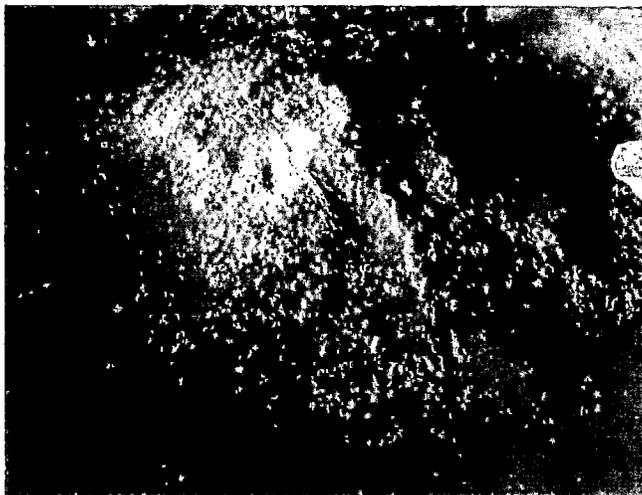


Fig.2.3 Agregado a utilizar para la mezcla

Sin embargo, así como los agregados heredan ciertas características de la roca madre (tales como la dureza, peso específico, características de la petrografía y porosidad), también difieren en ciertas otras características como el tamaño y la forma de la partícula, son características que van a afectar directamente en las propiedades del concreto, tanto fresco como endurecido.

El código del comité del ACI 506R-90, expresa que los agregados para el concreto lanzado deben cumplir con la norma ASTM C-33, norma la cual indica los requerimientos de los agregados para poder clasificar a los agregados en finos, gruesos, etc.

En el código del ACI 506R-90 también se contempla la utilización de agregados ligeros para su utilización en la elaboración de shotcrete, derivando al lector a la normativa ASTM C-330 sobre agregados ligeros para shotcrete, especificando las características físicas que deberán cumplir los agregados ligeros.

Dentro de la terminología utilizada según la ASTM C-125, se le conoce como agregado a cualquier material granular, tal como arena fina, gravas o roca chancada utilizada con un cementante para crear concretos hidráulicos o morteros.

Como se mencionó párrafos atrás, el agregado es comúnmente procedente de la desintegración, ya sea por causas naturales o medios artificiales. Las rocas de

peso normal tienen un peso específico de aproximadamente 2.4 a 2.8, de manera que al ser utilizados para producir concreto se logra un peso unitario del concreto de 2200 kg/m³ a 2550 kg/m³.

Existen varias formas de clasificar a los agregados, entre los cuales encontramos:

- Por el origen de las rocas:

De acuerdo al origen de las rocas que constituyen los agregados, podemos inferir ciertos aspectos relacionados con el comportamiento de las mismas al utilizarlas en el concreto.

Los tres grandes grupos de rocas son las ígneas, sedimentarias y metamórficas, dentro de las cuales es posible subdividir las por su textura y mineralogía.

Las rocas ígneas tienen su origen en la solidificación y enfriamiento de la materia fundida conocida como magma. En general, estas son de buena calidad para ser usadas en el concreto, sin embargo, siempre se deben realizar estudios para comprobar que no contengan sustancias perjudiciales para el concreto.

Las rocas sedimentarias son el resultado del proceso de transporte, depósito y eventual litificación sobre la corteza terrestre. Por lo general, la densidad de las rocas sedimentarias es muy variable.

Las rocas metamórficas son aquellas formadas por, como su nombre lo indica, el metamorfismo: un proceso geológico que ocasiona una serie de cambios mineralógicos, texturales y estructurales, tanto en las rocas ígneas como en sedimentarias, producidas en el estado sólido y en el interior de la corteza. Dentro de las rocas metamórficas podemos encontrar el mármol, el cual no es muy usado en la elaboración de concreto debido a que se le aprecia como acabado.

Es posible definir el origen geológico y la composición mineralógica de las rocas que componen los agregados, y para estimar de manera preliminar la calidad

físico-química, se acostumbra realizar el examen petrográfico según la ASTM C-295. Con esta base es posible determinar ciertas características con las que contará la roca de acuerdo a su mineralogía y otras características.

- Por la forma:

Generalmente los agregados, por su naturaleza, tienen formas irregulares compuestos aleatoriamente por caras angulares y redondeadas. Podemos dividirlos en:

- Angular: Por evidencia de desgaste en caras y borde.
- Sub angular: Menor evidencia de desgaste en las caras.
- Sub redondeada: Desgaste considerable en las caras.
- Redondeada: Casi sin bordes.
- Muy redondeada: Sin caras ni bordes.

2.2.2 Propiedades de los Agregados

Dentro de las propiedades de los agregados, podemos mencionar los siguientes:

- Granulometría: distribución de los tamaños de las partículas de un agregado al ser tamizado mediante el análisis de los tamices (según la norma ASTM C-136). La granulometría y los tamaños máximos del agregado afectan las proporciones relativas de los agregados, así como los requisitos del agua y cemento.
- Módulo de Fineza: Establecido por Duff Abrams, es posible definir la fineza promedio del agregado mediante la siguiente expresión:

$$MF = \frac{\sum \% \text{ Acumulado retenido } (1\frac{1}{2}'' , 3/4'' , 3/8'' , N^{\circ}4, N^{\circ}8, N^{\circ}16, N^{\circ}30, N^{\circ}50, N^{\circ}100)}{100} \quad 3.1$$

- Contenido de Finos: Esta propiedad no se refiere a los finos o polvo, si no a la suciedad que presentan los agregados.

Es importante tener en cuenta el contenido de finos debido a:

- A mayor suciedad, habrá una mayor demanda de agua.
- Si el polvo está finamente adherido a los agregados, impide una buena unión con la pasta, originando una inter fase débil.

Entre las propiedades físicas del agregado encontramos:

- Densidad: (ASTM C-1238) constituido por la gravedad específica, incluyendo tanto a los sólidos como a la porosidad del mismo material. Es un factor importante para los casos en los que se busca diseñar concretos de alto o bajo peso unitario.
- Porosidad: (ASTM C-33) definido por el espacio no ocupado por materia sólida en las partículas del agregado, es una de las propiedades más importantes por influir en las demás propiedades tanto físicas como químicas del agregado, incluyendo absorción, permeabilidad, resistencia mecánica, resistencia a la abrasión.
- Peso Unitario: resultante de la división de el peso de las partículas entre el volumen total, incluidos los vacíos. Las normas ASTM C-29 y la N.T.P. 400.017 definen los procedimientos y materiales a utilizar en dicho ensayo de laboratorio.
- Porcentaje de vacíos: medida de volumen de los espacios entre las partículas de agregados.
- Contenido de Humedad: Cantidad de agua retenida entre los poros de las partículas del agregado.

Por su parte, dentro de las propiedades mecánicas podemos citar a:

- Resistencia: la resistencia obtenida por el concreto no puede ser mayor a la de los agregados. Esta propiedad está ligada a la textura, estructura y composición de las partículas del agregado.

- **Tenacidad:** característica asociada con la resistencia a la flexión, y regido por las características de angularidad y textura del material.
- **Dureza:** la dureza está definida como la resistencia a la erosión, abrasión o desgaste en general.
- **Módulo de elasticidad:** es un parámetro que caracteriza el comportamiento del material dentro del rango elástico. La determinación del módulo de elasticidad de los agregados es poco usual, sin embargo, el concreto experimentará deformaciones, por lo que es razonable pensar que el módulo de elasticidad del agregado influirá en aquel del concreto.

Finalmente, podemos citar las propiedades químicas de los agregados:

- **Reacción álcali-sílice:** los álcalis en el cemento son los óxidos de sodio y de potasio, los cuales en ciertas condiciones de humedad y temperatura suelen reaccionar con ciertos minerales, produciendo así un gel expansivo.
- **Reacción álcali-carbonatos:** producido por la reacción de los carbonatos presentes en los agregados generando sustancias expansivas. En nuestro país existen casos muy escasos citando este tipo de problemas.

2.3 El Agua

2.3.1 Generalidades del Agua

En la construcción, el agua es utilizada principalmente para que cumpla 2 funciones específicas: la primera es la de ser parte de la mezcla de concreto a preparar, en la cual cumple la función de la hidratación del cemento; y la segunda es la de curar el concreto para garantizar la continua ganancia de resistencia.

El primer uso del agua, para la mezcla del concreto, es conocido como para uso interno, mientras que el agua utilizada para el curado es conocida como de uso externo. Aunque ambos usos del agua producen efectos diferentes y tienen diferentes importancias, es usual que las especificaciones indiquen que se utilice agua de la misma calidad para ambos usos.

El agua utilizada para la mezcla es en realidad la de mayor importancia, y en la mayoría de casos, los requerimientos están dirigidos a cumplir este requerimiento, mientras que el agua para curado se recomienda sea la misma que en el caso del mezclado, para evitar que se subestime la aplicación del curado y se utilice una calidad de agua que no sea adecuada.

En algunos otros casos, es necesario el uso del agua para reducir las temperaturas desarrolladas por la hidratación, y lo que se hace es introducir hielo como parte del agua de mezclado. Obviamente, el agua utilizada en forma de hielo también deberá cumplir con las mismas especificaciones.

Por ende, podemos concluir que el agua no necesariamente requiere ser agua potable, sino que debe cumplir con los estándares mínimos de calidad.

Según el informe emitido por el comité ACI 506R sobre el shotcrete, el agua de mezclado debe estar libre de cualquier sustancia que pueda ser perjudicial para el concreto o para el acero. También recomienda que se utilice agua potable.

Mientras, sobre el agua para el curado, el ACI 506R recomienda, además de lo mencionado anteriormente, que el agua para curado de shotcrete no deje manchas.

2.3.2 Calidad del Agua

La N.T.P. 338-088 recomienda los siguientes límites permisibles de concentración de sustancias en el agua:

SUSTANCIAS Y PH	LÍMITE MÁXIMO
Cloruros	300 ppm
Sulfatos	200 ppm
Sales de Magnesio	125 ppm
Sales Solubles	300 ppm
Sólidos en Suspensión	10 ppm
Materia Orgánica (óxígeno consumido)	0.001 ppm
pH	6 - 8

Tabla 2.3 Límites Máximos Permisibles de Sustancias en el Agua (Fuente N.T.P. 338-088)

La calidad de agua para la elaboración de mezcla en el shotcrete, a diferencia de los requerimientos para el agua potable que son propiamente bacteriológicos, está centrada en las características físico-químicas y sus efectos sobre las propiedades del concreto.

Como se puede apreciar en la tabla 3.1 sobre los límites máximos permisibles de sustancias en el agua, se hace referencia a toda aquella sustancia o impureza cuya presencia es relativamente frecuente, como son las sales inorgánicas, sólidos en suspensión, materia orgánica, entre otros.

Dentro de los efectos indeseados que puede causar el agua sobre las propiedades del concreto, existen las de corto, mediano y largo plazo. Las de corto plazo están relacionadas al tiempo de fragua y las resistencias iniciales; las de mediano plazo se refieren a las resistencias posteriores a los 28 días o más; y finalmente los relacionados con el largo plazo se refieren a los ataques de sulfatos, corrosión del acero de refuerzo y la reacción álcali agregado.

Para poder prevenir efectos a largo plazo, la solución por la cual optar es el análisis químico del agua antes de emplearla, verificando que las cantidades de sulfatos, álcali y cloruros no sobrepasen los límites máximos.

Sobre los efectos indeseados a corto y largo plazo, el ensayo del tiempo de fragua y la toma de probetas a los 7 y 28 días son necesarios para poder comprobar la calidad del concreto obtenido.

A continuación se citan los efectos ocasionados por ciertas impurezas contenidas en el agua de mezcla del concreto:

- Carbonatos y bicarbonatos: estas sales tienden a tener efectos sobre el tiempo de fragua del concreto. El carbonato de sodio puede causar una fragua rápida, mientras que los bicarbonatos pueden tanto acelerarla como retardarla. Además, en grandes concentraciones (1000 ppm) pueden llegar a disminuir la resistencia del concreto a los 28 días.
- Cloruros: en lo que concierne a los altos contenidos de cloruros en el agua de mezcla, estos tienden a causar la corrosión de los refuerzos de acero.

Los cloruros pueden introducirse dentro del concreto por distintos componentes, tales como los aditivos, agregados y el agua; o por exposición a sales, agua de mar o brisas marinas con altos contenidos de sal.

El código ACI 318, define límites en los contenidos de iones de cloruro del agua de acuerdo al tipo de concreto a utilizar:

Concreto Pretensado	0.06%
Concreto Armado expuesto a cloruros	0.15%
Concreto Armado impermeabilizado	1.00%
Otro tipo de Concreto Armado	0.30%

Tabla 2.4 Límites en la cantidad de cloruros en porcentaje de cemento (Fuente: ACI 318)

Cabe resaltar que la tabla anterior no indica límite alguno para concreto normal, sin refuerzo de acero. Adicionalmente, la norma ACI 222 ofrece información adicional sobre los límites y ensayos sobre la corrosión en metales.

- Otras sales comunes: los carbonatos de calcio y magnesio no son muy solubles en el agua y son muy difícilmente halladas en concentraciones suficientes como para alterar las propiedades del concreto.

Por su parte, el sulfato y cloruro de magnesio puede presentarse en altas concentraciones sin generar mayores alteraciones sobre las propiedades de resistencia del concreto.

- Sales inorgánicas: sales de manganeso, zinc, plomo y cobre en el agua de mezcla pueden ocasionar una reducción significativa reducción en la resistencia y grandes variaciones en el tiempo de fragua. Las sales de plomo, cobre y zinc son las más activas. Sales especialmente activas como retardantes de fragua incluyen: yodato de sodio, fosfato de sodio, arseniato de sodio y borato de sodio.

También podemos citar algunos tipos de agua que pueden ser perjudiciales si son usados como agua de mezcla para concreto en general:

- Agua de mar: conteniendo hasta unas 35 000 ppm de sales disueltas, el agua de mar podría ser utilizada para la mezcla de concreto sin refuerzo de acero. Cerca del 78% de las sales disueltas es cloruro de sodio, mientras que un 15% está compuesto por cloruro y sulfato de magnesio. Debido a su composición, el agua de mar tiende a generar el efecto de un acelerante de fragua sobre el concreto: cuenta con una mayor resistencia inicial, pero su resistencia a los 28 días tiende a ser menor.

El agua de mar no es recomendada para mezclar concreto armado y no debe ser usada para la elaboración de concreto pretensado debido al alto riesgo de corrosión del refuerzo.

En el caso de elaboración de shotcrete, debido a la magnitud de las obras y de la ubicación geográfica de estas (ya sea de minería o algún talud a estabilizar), no se utiliza el agua de mar, el suministro de agua viene dado por otra fuente (generalmente camiones cisterna o agua tomada de río previamente evaluada).

El agua de mar tiende a generar el fenómeno conocido como eflorescencia.

- Aguas Ácidas: generalmente, para aguas de mezclado que contengan concentraciones de ácidos comunes mayores a 10 000 ppm no producen efectos adversos en la resistencia. Sin embargo, aguas ácidas con un pH menor a 3.0 pueden generar problemas en la trabajabilidad y deben ser evitadas en lo posible.
- Aguas Alcalinas: aguas con concentraciones de hidróxido de sodio de 0.5% de la masa de cemento no afecta en gran proporción en la resistencia del concreto, pero en mayores concentraciones sí puede ser perjudicial.

Concentraciones de hidróxido de potasio hasta un 1.2% de la masa del cemento tiende a tener efectos mínimos en la resistencia con ciertos cementos, pero la misma concentración para otros cementos puede afectar sustancialmente la resistencia a los 28 días.

En líneas generales, el agua a utilizar en la mezcla debe cumplir con los requisitos de un concreto convencional como mínimo, ya que el shotcrete es un tipo especial de concreto.

CAPÍTULO III. ADITIVOS

3.1 Generalidades sobre Aditivos

Se conoce como aditivos a aquellos productos que al ser introducidos en la mezcla del concreto logran modificar ciertas propiedades en una forma controlada. Estos aditivos son capaces de disolverse en agua y son administrados como porcentaje del peso del cemento. Pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos.

Las puzolanas y fibras de acero están excluidas dentro de la definición de aditivos.

Las propiedades que pueden alterar los aditivos pueden darse tanto en el estado fresco como en el endurecido del concreto, dentro de estas propiedades modificables por los aditivos encontramos:

- Dentro del Concreto Fresco:
 - o Asentamiento: relacionado directamente con la trabajabilidad del concreto, aumentar el asentamiento significa un concreto más fluido. En el Perú, está regido por la NTP 339.035 y se mide tradicionalmente con el Cono de Abrahams.
 - o Exudación: segregación del concreto en la que el agua tiende a subir a las superficie de concreto, generando así un concreto muy poroso y poco durable. El ensayo de exudación está normado por la NTP 339.077.
 - o Tiempo de Fragua: se refiere al tiempo que requiere la mezcla en ganar una resistencia determinada desde que se da la mezcla agua-cemento. Estas resistencias están definidas por: fragua inicial cuando el concreto alcanza un resistencia de 500 lb/pulg², o 35 kg/cm²; y fragua final cuando el concreto alcanza una resistencia de 4000 lb/pulg², o 250 kg/cm².

Esta propiedad de tiempo de fragua está normada en nuestro país por la NTP 339.082, e internacionalmente por la ASTM C-403.

- Calor de Hidratación: es el calor desarrollado al vaciar la mezcla. El control de temperatura está regulada por la ASTM C-1064, la cual detalla la metodología a seguir utilizando un termómetro de 0.5 °C de precisión colocado en la mezcla entre 2 minutos como mínimo a 5 minutos como máximo.
- Aire incorporado: mientras exista más aire atrapado dentro de la mezcla del concreto, esto se traducirá en una resistencia a la compresión menor. Sin embargo, es de vital importancia en situaciones de climas helados, especialmente cuando existe el riesgo de congelamiento del agua dentro del concreto. Está normado por la NTP 339.083

- Dentro el Concreto Endurecido:

- Resistencia a la Compresión: se reconoce que el concreto logra alcanzar su máxima resistencia luego de un período de 28 días. Además, al conocer el valor de la resistencia a los 7 días es posible proyectar cuánto será la resistencia al final de los 28 días. Algunos aditivos son capaces de acelerar la ganancia inicial del concreto.

Los aditivos contribuyen a estas y otras propiedades más en el concreto, mejorando la calidad del concreto pero aumentando el costo por metro cúbico de mezcla. Sin embargo, este aumento de costo se ve reflejado en las facilidades de manipuleo y calidad que se obtiene al utilizar los aditivos.

La normativa internacional ASTM y la Norma Técnica Peruana N.T.P. clasifican a los aditivos de acuerdo a los efectos que producen en el concreto, por citas ejemplos se tiene a los reductores de agua o los acelerantes de fragua. Sin embargo, la Comunidad Europea de Normas CEN, clasifica a los aditivos de

acuerdo a su aplicación, ya sea en pastas, morteros, concreto o concreto proyectado.

Sin embargo, la norma ASTM C-1141 está dirigida a los aditivos utilizados en concreto lanzado o shotcrete, dividiéndolas en grupos y especificando qué normas ASTM deben cumplir para que puedan ser utilizados en el shotcrete.

Cabe mencionar que el INDECOPI es el organismo encargado de la adaptación e incorporación de las normas ASTM al Perú.

Según la norma ASTM C-494, los aditivos se clasifican como:

- TIPO A: Reductor de agua.
- TIPO B: Retardador de fraguado.
- TIPO C: Acelerador de fraguado.
- TIPO D: Reductor de agua y retardador.
- TIPO E: Reductor de agua y acelerador.
- TIPO F: Reductor de agua de alto efecto.
- TIPO G: Reductor de agua de alto efecto y retardador.

A su vez, la ASTM C-1141 clasifica a los aditivos para el shotcrete en los siguientes grados, debiendo ser identificados primero si es que son líquidos o no líquidos:

- Grado 1: Aditivo Acelerante Convencional.
- Grado 2: Aditivos Retardantes.
- Grado 3: Aditivos Puzolánicos.
- Grado 4: Aditivos Metálicos.
- Grado 5: Aditivos Colorantes.
- Grado 6: Aditivos de Polímeros Orgánicos.
- Grado 7: Aditivos Reductores de Agua. (No aplicable para vía seca)
- Grado 8: Aditivos Incorporadores de Aire. (No aplicable para vía seca)
- Grado 9: Aditivos Súper Acelerantes.

Cada aditivo debe cumplir con ciertas normas para ser calificados dentro de uno de éstos grados. Dichas normas están listadas en un cuadro en la misma ASTM C-1141.

Actualmente, los aditivos son utilizados como parte esencial del concreto. Al utilizarse se produce un aumento de costos en materiales e insumos, pero se puede lograr un concreto de mejor performance, con lo cual podemos satisfacer los requerimientos de los clientes, al cumplir tanto con la calidad como con los plazos establecidos.

Los aditivos para el concreto proyectado se utilizan para poder lograr propiedades adecuadas sobre dicho concreto para que puedan lograr cumplir su objetivo de sostenimiento del sustrato. Uno de los aditivos que se utilizan durante el proceso de lanzado es el acelerante de fragua, el cual es utilizado para generar una alta resistencia inicial en el concreto y lograr una adherencia entre la mezcla lanzada y el sustrato a sostener.

Además, para el caso de aplicación mediante vía húmeda, es posible el uso de un superplastificante para poder mejorar la calidad del concreto, conservando baja la relación agua/cemento y logrando una mayor trabajabilidad para el bombeo del shotcrete.

La dosificación de los aditivos para el concreto proyectado se da en porcentaje de la cantidad de cemento por cada metro cúbico de concreto. El rango usual de variación entre ellos varía de 0.5% a 6%, lo cual genera cantidades aproximadas de 2 a 30 kilogramos de aditivo por metro cúbico de concreto, lo cual equivale a unas milésimas partes del shotcrete.

Dentro de los aditivos más utilizados para el concreto proyectado tenemos al aditivo acelerante de fragua, los cuales controlan el tiempo de fraguado del concreto proyectado después de ser aplicado en la boquilla de lanzamiento de concreto. Uno de los factores más importantes es la dosificación del aditivo, razón por la cual la aplicación de estos aditivos debe realizarse en unidades dosificadores que garanticen un variabilidad mínima en la dosis, de acuerdo al flujo de concreto (debe estar sincronizado).

3.2 Composición Química

El aditivo más utilizado en el concreto proyectado y el objetivo de este estudio es el acelerante de fragua, motivo por el cual se le dará mayor importancia con respecto a su composición química.

Desde 1885, el material principal utilizado para lograr la aceleración de fragua del concreto ha sido el cloruro cálcico. Generalmente era utilizado en climas fríos, cuando es necesaria la ganancia rápida de resistencia del concreto. De esta manera se lograba un rápido desencofrado del concreto y se evitaba un daño al concreto en edades tempranas debido a las bruscas variaciones de temperatura. Sin embargo, es necesario recalcar que el cloruro cálcico no es un anticongelante que disminuye la temperatura de congelación del agua.

En muchos casos, el aditivo acelerante de fragua es simplemente utilizado para acelerar el proceso del encofrado y desencofrado.

Por otra parte, existe una controversia sobre la posibilidad de que el cloruro cálcico, especialmente si el concreto es muy poroso. Debido a ello, nació el interés sobre los acelerantes "sin cloruros", para empezar a reemplazar el cloruro cálcico en el concreto armado. Sin embargo, el cloruro cálcico sigue siendo el material más efectivo para la aceleración de fragua, conociendo y cuantificando tanto sus virtudes como sus defectos.

Los aditivos acelerantes de fragua se basan principalmente en 2 componentes: el cloruro cálcico y el formiato cálcico, junto con algunos otros materiales en menores cantidades que se incluyen en las formulaciones, como por ejemplo el tiosulfato cálcico, el nitrato cálcico y la trietanolamina (TEA).

3.3 Reacciones Químicas

El cloruro cálcico es (Cl_2Ca) es producido como un subproducto del proceso Solvay que es utilizado para la fabricación de carbonato sódico. El proceso total es el siguiente:

Sobre el sistema agua/cemento:

Efectos Reológicos: en su mayoría, los aditivos acelerantes de fragua no alteran la reología de las pastas de cemento en las primeras edades.

Efectos Químicos: dentro de los principales efectos químicos, encontramos a los ocasionados por:

- Sales de Calcio:

Las reacciones entre el cloruro cálcico y los elementos constituyentes del cemento portland han sido ampliamente investigadas, debido a que son importantes en la práctica por el riesgo que representa para el acero de la armadura: el riesgo de corrosión. La razón de ello es la cantidad de cloruro que se encuentra libre en solución en el concreto.

No existe una reacción entre el cloruro de calcio y los silicatos bicálcico y tricálcico, además de la aceleración de la velocidad de reacción.

El cloruro cálcico no reacciona significativamente con las pastas de cemento durante un período de 2 a 6 horas después de la mezcla. Además, la concentración libre de cloruro cálcico, después del período inicial (de 2 a 6 horas) cae progresivamente a un valor casi nulo.

- Trietanolamina (TEA):

La trietanolamina no es un acelerante muy efectivo cuando se utiliza sola, debido al efecto desfavorable sobre la resistencia resultante. Es usualmente utilizado como componente en algunos aditivos, y al ser utilizado, ocurren interacciones químicas como:

- o En la presencia del TEA, se acelera la reacción del aluminato tricálcico y el yeso.

- Formación de una superficie compleja entre los hidratos iniciales de los aluminatos bicálcico, tricálcico y la TEA.

Efectos Sobre la Hidratación del Cemento: enfocado principalmente en la cinética de la reacción y morfología de los hidratos resultantes.

Sobre las propiedades del concreto plástico:

Los acelerantes de fragua no tienen un efecto significativo sobre la trabajabilidad, contenido de aire o relación agua/cemento sobre los concretos a los cuales son adicionados.

El efecto que se obtiene sobre el desarrollo de calor se puede resumir en el siguiente gráfico:

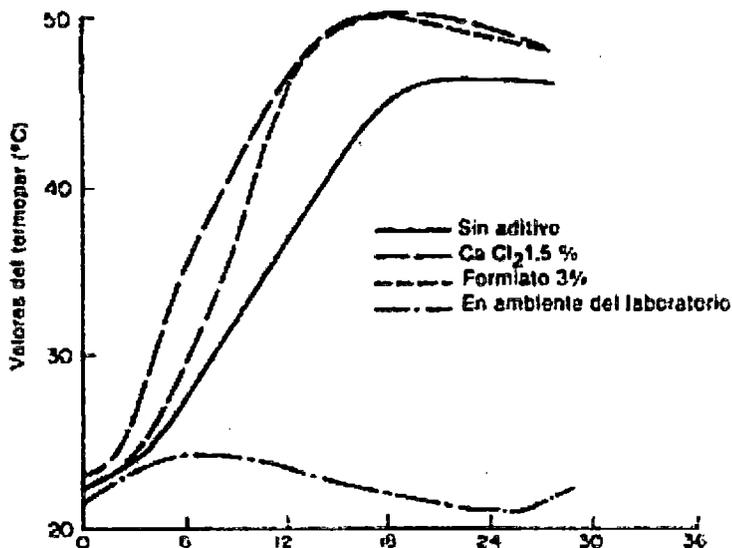


Fig. 3.1 Evolución del calor de concretos conteniendo cloruro y formiato de calcio

Como es posible observar a las 24 horas, el desarrollo de calor es aproximadamente igual. Lo cual también se verá reflejado en las resistencias obtenidas para el tiempo mencionado. Mientras tanto, la muestra sin contenido de cloruro o formiato de calcio desarrolla una temperatura más baja, como es

posible notar en el gráfico. Esto se traducirá en un desarrollo menor de resistencia a la compresión.

Para el caso del tiempo de fraguado, la siguiente tabla muestra los efectos del cloruro y formiato cálcico sobre los tiempos de endurecimiento de morteros preparados contra un mortero de control (sin aditivo).

Tipo de Aditivo Acelerante	Tiempo de endurecimiento en horas para:	
	0.5 N/mm ²	3.5 N/mm ²
Ninguno	3.25	5
3.20 % de Cloruro Cálcico	1	1.75
2.00 % de Formiato Cálcico	2.25	3.25

Tabla. 3.1 Efecto sobre el endurecimiento de morteros de los aditivos acelerantes

3.4 Aditivos para Concreto Lanzado

Dentro del diseño de mezcla del concreto lanzado, es posible la inclusión de ciertos aditivos para mejorar la calidad del concreto a proyectar. Dentro de los más utilizados, encontramos a los aditivos acelerantes de fragua y los superplastificantes o reductores de agua.

3.4.1 Aditivos Acelerantes

Los acelerantes de fraguado para shotcrete pueden ser clasificados según la composición química y por su manera de acción y efecto en el fraguado del concreto. A continuación, una comparación basada en la composición química:

PROPIEDAD	TIPO DE ACELERANTE		
	Alcalino Base Aluminato	Alcalino Base Silicato	Libre de Álcali
Rango de Dosificación	3% - 6%	12% - 15%	4% - 7%
Valor de pH	13 - 14	12-13	3
Equivalente Na ₂ O	20%	12%	< 1%
Resistencia Muy Temprana	++++	++++	+++
Resistencia Final	+	---	+++
Salud Ocupacional	---	-	+++

Tabla 3.2 Composición Base de los Acelerantes de Fragua (Fuente: SIKA)

Como se puede observar en la tabla 3.1, a lo largo del tiempo se ha ido investigando y desarrollando nuevas tecnologías para los aditivos acelerantes de fragua, variando su composición base desde los alcalinos hasta los libres de álcalis.

Los primeros acelerantes fueron a base de cloruro de calcio (CaCl_2), pero dejó de usarse debido a que su composición corroía al acero. Luego, con los avances y las investigaciones se desarrollaron aditivos acelerantes a base de aluminatos y de silicatos, estos últimos obtenidos al fusionar cuarzo con sales sódicas. Éstos aditivos ya no corroen al acero pero aún son dañinos tanto como para el ser humano como para el medio ambiente debido a su pH que suele ser mayor a 10.

Actualmente se desarrollan nuevas tecnologías en el área de acelerantes de fragua libres de álcali y no cáusticos, los cuales son menos dañinos tanto para operarios como para el medio ambiente.

3.4.1.1 Acelerantes a Base de Aluminatos:

Los acelerantes a base de aluminatos son capaces de producir un aumento repentino en la cantidad de aluminato necesario para la formación de

monosulfatos. De esta manera se logra una hidratación normal espontánea del cemento y esto se traduce en altas resistencias iniciales a la compresión.

Debido a su rápida ganancia de resistencia, es posible utilizar el shotcrete con acelerantes a base de aluminatos sobre superficies en presencia de agua. Además, también es posible aprovechar su resistencia inicial para poder aplicar varias capas de shotcrete en poco tiempo.

La dosificación de estos aditivos se realiza en porcentajes de la cantidad de cemento en la mezcla. Los valores más comunes varían entre 4% a 8%.

Sin embargo, el uso de estos aditivos en la mezcla del shotcrete también tiene sus desventajas, como por ejemplo:

- Existe una disminución en la resistencia final, en comparación con el concreto patrón sin aditivos (en otras palabras, si se obtienen 2 tandas de probetas diferentes: una sin aditivos y otra con aditivos, las probetas con aditivos tendrán una menor resistencia a los 28 días, generalmente disminuyen hasta un 50%).
- Su funcionamiento con los tipos de cemento es muy variable, siendo necesario las pruebas antes de su utilización.
- El valor del pH de los aditivos a base de aluminatos es mayor a 13, lo cual está en el rango fuera del rango de no toxicidad para el ser humano. Por lo tanto su manipulación requiere de extremo cuidado.

Por otra parte, existen 2 tipos de aditivos a base de aluminatos: los aluminatos sódicos y los aluminatos potásicos. Los aluminatos potásicos si funcionan mejor con los diferentes tipos de cemento.

3.4.1.2 Acelerantes a Base de Silicatos:

Este tipo de aditivos es dosificado de acuerdo a la cantidad de agua en la mezcla, por lo que la cantidad de aditivo varía de acuerdo a la relación

agua/cemento. Comparado con los aditivos acelerantes a base de aluminatos, estos aditivos presentan ciertas ventajas:

- Funcionan con todo tipo de cemento.
- La disminución de resistencia es menor comparado con los valores de disminución de los aluminatos. Éstos típicamente disminuyen su resistencia hasta en un 20%.
- No causan daño al medio ambiente, pero su pH de 12 es aún muy alto y su uso requiere de mucho cuidado y del equipo adecuado (lo que incluye lentes, guantes, etc).
- Menor cantidad de álcali comparado con los aluminatos, reduciendo el riesgo de reacción álcali-agregado.

3.4.1.3 Acelerantes Libres de Álcali:

La última generación de aditivos acelerantes para shotcrete, estos aditivos son químicamente más complejos, por lo que son más costosos que los acelerantes tradicionales.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, los aditivos a base de aluminatos y silicatos son dañinos tanto para los operarios como para el medio ambiente, y en muchos países su utilización ya está reglamentada por la ley, evitando el consumo de dichos aditivos.

El hecho de que se les conozca como libres de álcali significa de que, en su composición, contienen cationes de álcalis tales como sodio, potasio y litio (Na^+ , K^+ , Li^+), lo cual hace que su pH varíe entre 3 a 4, estando dentro del rango donde los compuestos no son dañinos para el ser humano.

La resistencia final también se encuentra castigada, pero de una manera casi insignificante, sufriendo reducciones de hasta 5% de la resistencia.

Podemos agrupar los usos y efectos, así como las observaciones, en un cuadro, obteniendo:

TIPO	USO / EFECTO	OBSERVACIONES
Acelerante de Fraguado líquido, Libre de Álcalis	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilización sobre cabeza en túneles. - Estabilización en roca y taludes. - Revestimiento final de alta calidad. - Muy alta resistencia temprana. - Incrementa la impermeabilidad al agua. - Reducción de álcalis. - Mejor seguridad ocupacional. 	<ul style="list-style-type: none"> - Para el proceso de proyectado vía seca o húmeda. - No corrosivo. - Baja reducción de resistencia final comparado con concreto original no acelerado. - No compatible con acelerantes alcalinos. - Partes metálicas en contacto con este acelerante deben ser de acero inoxidable.
Acelerante de Fraguado líquido, Alcalino	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilización sobre cabeza en túneles. - Estabilización de roca y taludes. - Muy alta resistencia temprana. - Bajo rebote - Puede ser proyectado sobre sustrato húmedo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Para el proceso de proyectado vía seca o húmeda. - Corrosivo. - Reducción de resistencia final comparado con concreto original no acelerado.

Tabla 3.3 Efectos de la Composición Química sobre las propiedades del shotcrete.

(Fuente: SIKA)

El siguiente gráfico representa los rangos de pH de los tipos de aditivos y el rango en el cual el aditivo no es dañino para la persona.

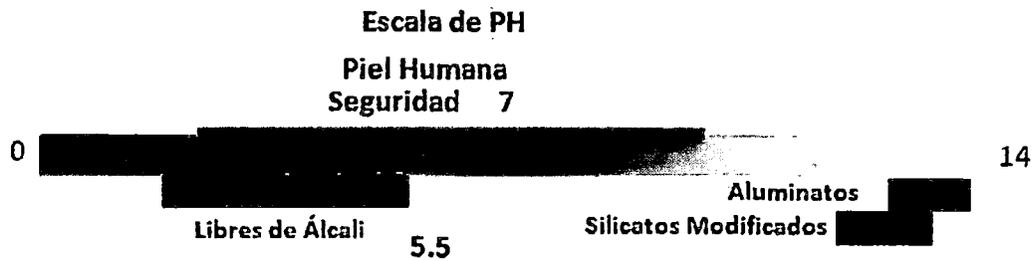


Fig.3.2 Influencia del pH sobre la piel humana (Fuente: BASF)

Adicionalmente a este gráfico, se puede agregar de que los compuestos ácidos son corrosivos al acero y al concreto; mientras que los compuestos básicos afectan al aluminio.

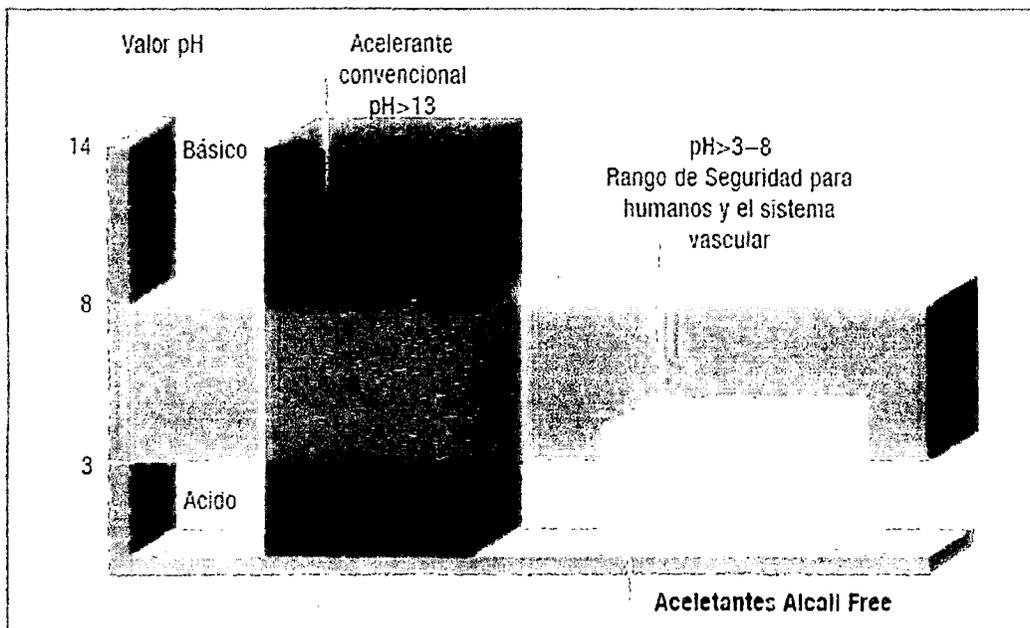


Fig.3.3 Gráfico explicando la influencia del pH de los aditivos (Fuente: SIKA)

Apoyándonos en las figuras 3.2 y 3.3, notamos el peligro que significa la manipulación de los aditivos convencionales sin el equipo de protección adecuado.

La composición química exacta de los productos actuales es conservada por cada fabricante por formar parte del "know how" del producto. Por ello solo es posible conocer la composición básica de los aditivos acelerantes de fragua

convencionales. Por tanto, lo mismo ocurre con las reacciones químicas entre los componentes básicos.

3.4.2 Aditivos Superplastificantes

Los aditivos superplastificantes y plastificantes (o también conocidos como reductores de agua) son utilizados para mejorar la trabajabilidad del concreto y su capacidad de cohesión en el estado plástico. Son capaces de aumentar el asentamiento sin necesidad de aumentar la relación agua/cemento, o en todo caso disminuir al máximo la relación agua/cemento.

Una baja relación agua/cemento está relacionada directamente con una alta resistencia y un aumento en la capacidad de bombeo. Estos aditivos actúan disminuyendo la tensión superficial del agua, creando una fase intermedia entre el cemento y el agua de la mezcla, disminuyendo la atracción entre partículas y mejorando la hidratación.

En forma general, es posible clasificar por su composición según las siguientes categorías:

- **Lingosulfonatos:** Clasificados como la primera generación de aditivos plastificantes. Probablemente sean los más utilizados dentro de la tecnología simple de aditivos. Estos son capaces de producir reducciones de hasta 10% de agua. Tienden a generar atrasos en los tiempos de fragua debido a la presencia de sustancias reductoras.
- **Naftalénsulfonatos:** Considerados como la segunda generación de aditivos plastificantes, logran una reducción de hasta 25% de agua. Son también conocidos como aditivos superplastificantes.
- **Melamina-Sulfonatos:** También considerados dentro de la segunda generación de aditivos plastificantes o simplemente superplastificantes, la reducción es de agua es muy parecida a los naftalénsulfonatos, pero las resistencias a edades tempranas son más altas, lo cual se interpreta como un menor tiempo de retarde de fragua.

- Copolímeros Vinílicos: Aditivos plastificantes de tercera generación, proporcionan aún una mayor reducción del agua, de casi un 30%. Es comúnmente utilizado en la preparación de concreto autocompactante.
- Policarboxilatos: Parte de la última generación de superplastificantes. Logran una reducción de hasta el 40%, además de la manejabilidad controlada.

Para el caso del shotcrete vía seca, como se ha mencionado anteriormente en otros capítulos, el aditivo superplastificante no es posible ser utilizado mediante esta aplicación debido a que el agua es solamente agregada en la boquilla de lanzado, a solo unos segundos antes de su impacto con el sustrato. Sin embargo, si es utilizable para la aplicación vía húmeda del shotcrete en donde es utilizado aprovechando el hecho de que mejora la trabajabilidad manteniendo la relación agua/cemento baja y además, controla la fragua logrando así de que se pueda tener más tiempo para el transporte de la mezcla fresca desde la planta dosificadora hasta el punto de lanzado en el túnel.

El aditivo utilizado para este caso pertenece a la segunda generación de plastificantes, compuestos por naftalénsulfonatos, dosificado según proveedor hasta un valor de 2% del peso del cemento, siendo éste un líquido de color pardo oscuro con una densidad de 1.19 kg/Lts.

3.5 Recomendaciones de Uso

Como se menciona anteriormente en este capítulo, los antiguos aditivos acelerantes de fragua a base de silicatos y aluminatos eran dañinos tanto para el ser humano como para el medio ambiente. Está demás aclarar que al momento de la manipulación de los aditivos, se sigan las indicaciones de seguridad indicados por los fabricantes, además de las normas de seguridad que se aplican en la obra misma (incluyendo guantes adecuados, lentes de protección, casco, etc.).

Al momento de la dosificación, es importante mantener la cantidad de aditivo dentro de los límites indicados por los fabricantes, y para cualquier dosificación

que se tenga que dar fuera de los límites recomendados, siempre consultar antes para conocer que riesgos existen o que efectos se podrían producir sobre la mezcla.

3.6 Mercado Actual

En la actualidad, las marcas más conocidas a nivel nacional y mundial incluyen a las marcas SIKA, BASF y EUCCO.

La marca SIKA es un grupo suizo proveniente de Zurich y tiene una historia de casi 100 años. Su gama de productos varía desde los aditivos químicos utilizados tanto en la construcción como en la minería, hasta las maquinarias necesarias para la ejecución de dichos trabajos, como son de excavación, perforación, lanzamiento de shotcrete, etc.

Por su parte, la firma de BASF, proveniente de Alemania, cuenta con más de 135 años de experiencia. No solamente comercializa aditivos para concreto, sino que también participa en la industria textil, de plásticos, pinturas, papel, cuero, y otros.

Finalmente, la firma de EUCCO, comercializada en el Perú por la empresa Química Suiza Perú S.A., es también una marca especializada en productos para la construcción y minería.

Aparte de la importación y comercialización de sus productos, las 3 marcas ofrecen asesoría con respecto a la utilización de sus productos, haciendo un seguimiento desde, en este caso, el inicio del desarrollo de los diseños de mezcla y los ensayos tanto en laboratorio como en campo.

En capítulos posteriores se explicarán un poco más a detalle acerca de los aditivos que se utilizarán en este estudio, tanto en los productos específicos a usarse como en su utilización misma.

CAPÍTULO IV. ADICIONES PARA SHOTCRETE

4.1 Generalidades

Como es de conocimiento general, el concreto es una mezcla de cemento, agua y áridos. Sin embargo, hoy en día la mayoría de las mezclas tienen como elemento extra los aditivos y las adiciones.

A diferencia de los aditivos, que son productos químicos industriales, las adiciones son de origen mineral no metálicas.

La incorporación de las adiciones se da con el fin de reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio resultante de la hidratación del cemento, para disminuir así los poros capilares, aumentando la resistencia mecánica.

El uso de estas adiciones data desde muchos años atrás, desde la Roma antigua, donde fueron utilizados por los romanos para sus estructuras base.

Durante la década de los cincuenta tuvo un gran desarrollo en la zona de Europa, al incorporarse al cemento Portland, incrementando rápidamente la capacidad instalada frente a los requerimientos de construcción post-guerra.

Podemos clasificar las adiciones minerales en los siguientes grupos:

- Puzolanas

Materiales silíceos o sílico-aluminosos que por sí mismos tienen poca o ninguna actividad hidráulica, pero frente a la presencia del agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio para formar compuestos con propiedades hidráulicas.

Se subdividen en los siguientes tipos:

- Naturales: Formados en la naturaleza.
 - Cenizas volcánicas

Originados por erupciones de cráteres explosivos, en pequeñas partículas que son templadas a temperatura ambiente, originándose así la formación del estado vítreo.

- Tufos o tobas volcánicas (zeolitas)

Originados por la acción hidrotermal sobre las cenizas volcánicas.

- Tierras de diatomeas (diatomitas)

Depósitos de caparzones silíceos de microscópicas algas acuáticas unicelulares.

- Artificiales: Sub productos industriales y materiales tratados.

- Cenizas volantes

Sub producto de las centrales termoeléctricas que utilizan carbón pulverizado como combustible. La ASTM C-618 las divide en dos grupos: las de clase F, producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso; y las de clase C, producidas por la calcinación del carbón sub-bituminoso, las cuales poseen también propiedades cementicias.

- Arcillas activadas térmicamente

Arcillas que han pasado por un tratamiento térmico a temperaturas del orden de 600°C a 900°C, lo cual destruye la estructura cristalina interna.

- Microsílice

Subproducto de la reducción de cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico para producir silicio o aleaciones ferrosilicio.

- Cenizas de cáscara de arroz

Producida por la calcinación controlada del arroz.

- Escoria de Alto Horno

Material no metálico formado por silicatos y otras bases producto de la fusión del hierro en un alto horno.

- Filler

Las adiciones muy finas de materiales supuestamente inertes son llamadas fillers. El microfiller calizo interactúa con los constituyentes del clínker, jugando básicamente un rol físico y contribuyendo al desarrollo de la resistencia a la compresión.

	Ceniza Volante Clase F	Ceniza Volante Clase C	Escoria Alto Horno	Micro Sílice	Arcilla Calcinada
% SiO ₂	52.0	35.0	35.0	90.0	55.0
%Al ₂ O ₃	13.0	13.0	12.0	0.4	29.0
%Fe ₂ O ₃	11.0	6.0	1.0	0.4	4.0
%CaO	5.0	21.0	40.0	1.6	1.0
%SO ₃	0.8	4.1	9.0	0.4	0.5
%Na ₂ O	1.0	5.8	0.3	0.5	0.2
%K ₂ O	2.0	0.7	0.4	2.2	2.0
Densidad	2.35	2.65	2.94	2.40	2.50

Tabla 4.1 Tabla de análisis químico de diferentes puzolanas. (Fuente: Design and Control of Concrete Mixtures, 2004)

4.2 Microsílice

La microsíllice o humo de sílice es un mineral compuesto de esferas de óxido de silicio (SiO₂), ultrafino, amorfo y cristalino, obtenido de la fabricación de silicio o ferrosilicio. La microsíllice es un subproducto con composición química muy constante, aunque dependiendo de la aleación del silicio en producción y la naturaleza de las materias primas puede presentar algunos cambios.

Históricamente, la primera experiencia con el humo de sílice se dio en el año 1952 en Escandinavia, mientras que en 1971 apareció el primer documento oficial sobre el uso de la microsílíce en concreto en Noruega.

La normativa ASTM C-1240 define al humo de sílice como "material puzolánico muy fino, compuesto mayormente por sílice producida en hornos de arco como un subproducto de la fabricación de silicatos o aleaciones de ferro silicio".

Además, esta norma define los parámetros que debe cumplir tanto en su composición química como en sus requerimientos físicos. Por ejemplo, su composición química debe estar normado por la siguiente tabla:

% mínimo de SiO ₂	85.0
% máximo de humedad	3.0
% máximo de pérdida en ignición	6.0

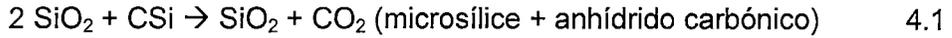
Tabla 4.2 Tabla con los requerimientos en la composición química del microsílíce
(Fuente: ASTM C-1240)

Además, dicha norma también establece los procedimientos de muestreo y análisis tanto químico como físico de una muestra de micro sílica.



Fig.4.1 Apariencia de la microsílíce

El proceso de fabricación del microsílíce tiene lugar en hornos de arcos eléctricos a temperaturas superiores a los 2000 °C, en los cuales el óxido de sílice y el carburo de sílice se oxidan, dando lugar a la siguiente reacción:



Al mezclarse el microsílíce con la cal libre del cemento, éste reacciona y pasa a ser silicato cálcico, compuesto que le brinda la resistencia a la compresión al cemento endurecido, por tanto ofrece mayor durabilidad para el shotcrete.



El tamaño promedio de una partícula de microsílíce es menor a las 0.5 micras, lo cual significa de que cada esfera de microsílíce es alrededor de 100 veces más pequeña que un grano de cemento promedio. Generalmente, su dosificación está dada entre el 10% al 15% del peso del cemento en la mezcla.

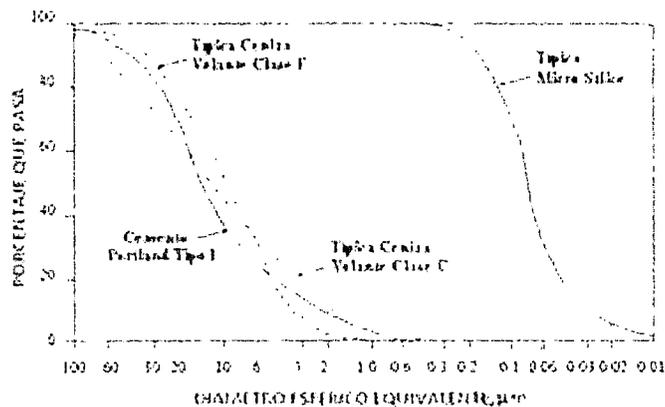


Fig.4.2 Comparación de tamaños de la microsílíce y cenizas volantes (Fuente: Design and Control of Concrete Mixtures, 2004)

Su tamaño reducido ayuda a rellenar los vacíos producidos entre los granos de cemento, reduciendo los vacíos, y al reaccionar según la fórmula 4.2, logran una mejor adherencia entre el concreto, logrando así poder colocar capas de mayor espesor.

Dentro de las mejoras que encontramos con la aplicación del microsílíce, encontramos:

- Sobre el concreto fresco:
 - o Demanda de agua: Debido al tamaño de las partículas y sus formas redondeadas, al llenar los vacíos entre las partículas del cemento, éstas deberían reducir el consumo de agua en la mezcla. Sin embargo, debido a la superficie de las partículas, la microsílíce tiende a incrementar la demanda de agua para poder lograr una misma trabajabilidad comparado con una mezcla sin la microsílíce.

Por esta razón es recomendable el uso de aditivos superplastificantes cuando se utilice el humo de sílice.

- o Trabajabilidad: El concreto con adición de microsílíce es más cohesivo debido a un mayor número de contactos entre sólidos. Sin embargo, éstos concretos con microsílíce tienden a perder su trabajabilidad rápidamente, y se recomienda un slump inicial mayor al requerido.
- o Segregación: Las partículas finas de la microsílíce se adhieren a las partículas, reduciendo así los conductos por los cuales se produce la segregación del concreto, logrando una reducción en el agua perdida por segregación.

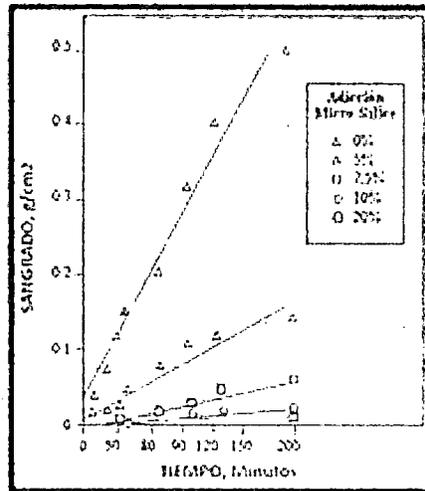


Fig. 4.3 Efectos de las diferentes modificaciones de microsilíceo en la segregación del concreto

- **Calor de Hidratación:** Comparado con muestras sin microsilíceo, la inclusión de esta genera un incremento de la temperatura durante las primeras 72 horas. Sin embargo, la temperatura final de la mezcla tiende a ser un poco menor cuando se incluye la microsilíceo. No es recomendable su inclusión a la mezcla en estructuras de concreto masivas.

Sobre el concreto endurecido:

- **Permeabilidad:** La microsilíceo hace que la mezcla de concreto o sea más densa y homogénea, disminuyendo en gran cantidad los poros de tamaño considerable.
- **Resistencia a la Compresión:** La microsilíceo contribuye enormemente al desarrollo de la resistencia a la compresión debido al efecto de Filler (por el tamaño de las partículas) y las excelentes propiedades como puzolana (alto contenido de sílice).

Existen varios factores que afectan el desarrollo de la resistencia de concreto con microsilíceo: contenido de microsilíceo, relación agua/cemento, uso y dosificación de aditivo plastificante, etc.

Siendo de un tamaño menor y mucho más volátil que el cemento, es importante cuidar al operador en contacto directo con microsilíce, debido a que la sílice es un material cancerígeno. Su inhalación puede agravar enfermedades pulmonares existentes tales como el asma y la bronquitis; y además produce inflamación del tracto respiratorio e inflamación de los ojos por contacto. Inhalación prolongada puede producir la llamada "silicosis": enfermedad fibrósica-cardiovascular irreversible considerada como enfermedad profesional.

En los diseños de mezcla, es necesaria su utilización cuando se requieren resistencias muy altas, por ejemplo, mayores a 300 kg/cm². Siempre será necesaria la realización de ensayos de compresión, flexión, etc., para verificar su calidad.

4.3 Fibra de Acero

Como bien se sabe, la relación entre la resistencia a la tracción del concreto y su resistencia a la compresión es muy baja. Además, el concreto también es incapaz de absorber energía antes de la rotura.

Para contrarrestar estas deficiencias, es posible la inclusión de las llamadas fibras metálicas. Estas fibras aportan a la absorción de energía antes de la rotura y aportan una gran resistencia a la flexión, compensando al concreto.

Estas fibras metálicas fueron introducidas a partir de los años sesenta, y principalmente las fibras de acero, para fabricar un concreto consolidado de elementos discontinuos y distribuidos aleatoriamente. A partir de los años setenta se inician las primeras investigaciones orientadas hacia el uso de las fibras en el concreto.



Fig. 4.4 Apariencia de la Fibra de Acero

Desde ese momento, dichas fibras han sido parte esencial del diseño de mezclas para el concreto lanzado. La razón a preferir las fibras metálicas antes de las mallas, es, para empezar, el tamaño de las fibras de acero, los cuales son más pequeños que las mallas, por lo tanto es posible incorporar un mayor número de fibras en un mismo espacio. La otra razón es que la distribución de las fibras metálicas es tridimensional, a diferencia de las mallas, las cuales trabajan esencialmente en un espacio bidimensional (son planos). Esta distribución brinda una mejor performance en el concreto lanzado.

Los requerimientos de las fibras de acero están especificadas en la norma ASTM A-820, incluyendo su clasificación y sus requerimientos de tracción. En cuanto a la función que desempeñan dentro del shotcrete, la ASTM C-1018 normaba un ensayo de flexión de viga con carga a los tercios. Sin embargo, dicha norma fue retirada en el 2006 y se lanzó la norma ASTM C-1550 (vigente desde el 2010), la cual refiere a un ensayo de flexión sobre un panel de forma circular.

Sobre los resultados obtenidos del ensayo sobre panel circular, la norma presenta un comparativo con los resultados que uno obtendría empleando el ensayo de panel cuadrado normado por la EFNARC (European Specification for Sprayed Concrete – Especificación Europea para el Concreto Esprayado), norma que ha estado presente desde antes que saliera la ASTM C-1550.

Es por ello que para la fibra de acero nos apoyamos en la normativa europea de EFNARC en la cual se detallan todos los ensayos a realizar a los paneles tomados en campo, incluyendo la prueba de flexión sobre los paneles cuadrados, como se mencionó anteriormente.

La proporción de fibra de acero a utilizar dentro de la mezcla del shotcrete varía de acuerdo a las presiones que debe soportar del macizo rocoso.

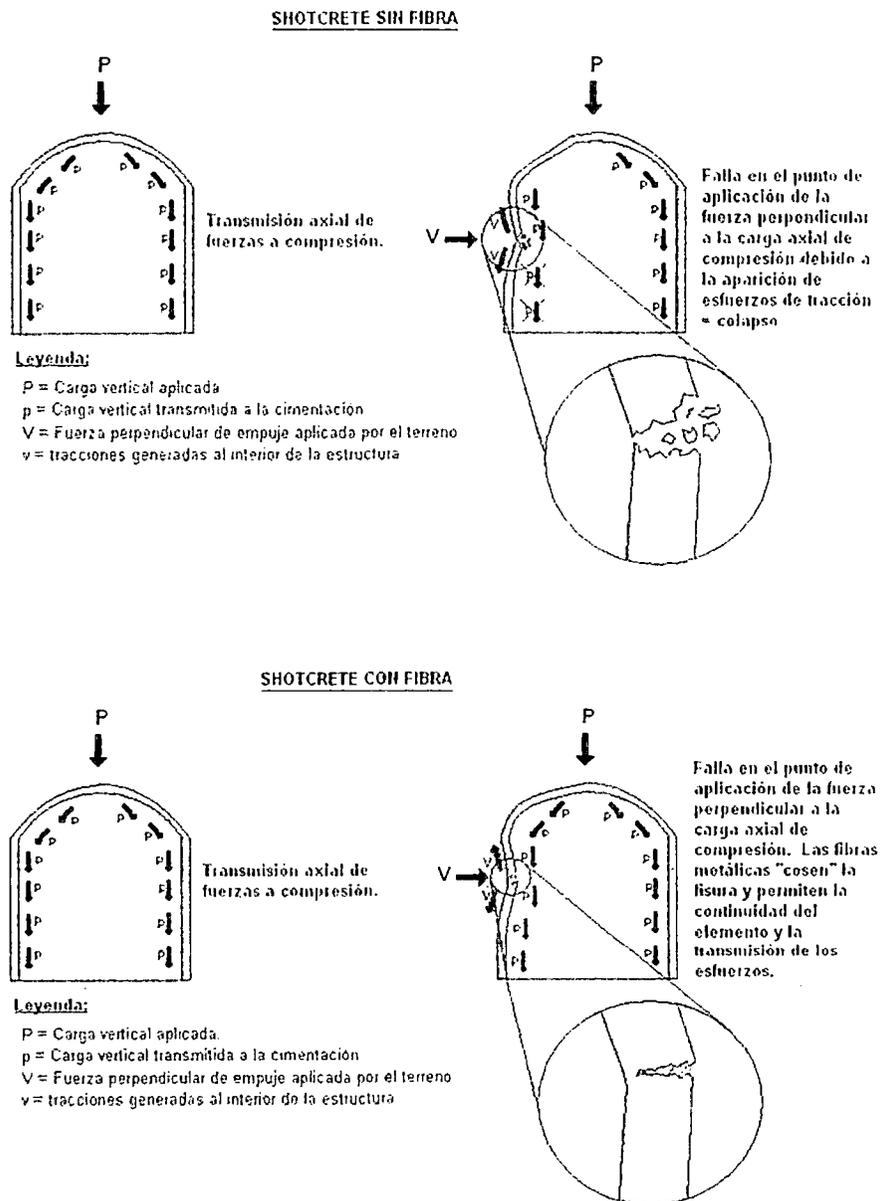


Fig. 4.5 y 4.6 Esquema de funcionamiento de un shotcrete sin fibra y shotcrete con fibra
(Fuente: Tesis PUCP - Aleksey Beresovsky De Las Casas)

Las fibras de acero, como se mencionó, proporcionan una mayor resistencia a la flexión, y pueden seguir ofreciendo resistencia a la flexión a una vez producida la rotura del concreto; como se puede apreciar en las figuras 4.5 y 4.6 (arriba) y 4.7 (abajo).

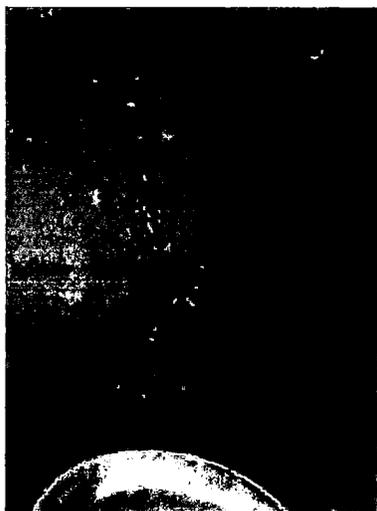
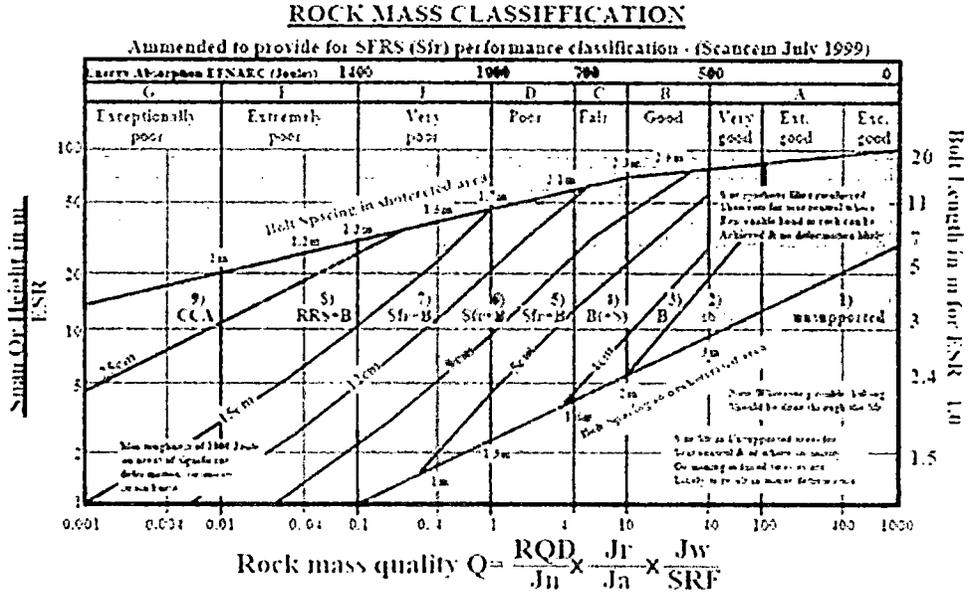


Fig. 4.7 Panel de shotcrete luego de ser ensayado (dentro de las grietas el shotcrete se mantiene unido gracias a la fibra de acero)

Al conocer el tipo de roca a estabilizar, podemos saber cuál es el requerimiento de resistencia a la flexión que se necesita alcanzar. Para referirse al tipo de roca a estabilizar, es posible dividirlos en grupos desde la A (muy buena) hasta la G (roca excepcionalmente mala), o podemos utilizar otro tipo de parámetros como es el conocido RMR (Rock Mass Rating). El siguiente cuadro ilustra la cantidad de energía absorbida que se requiere para estabilidad cada tipo de roca:



CATEGORÍAS DE REFUERZO

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1) Sin Soporte 2) Pernos Puntuales, Sb 3) Pernos Sistemáticos, E 4) Pernos Sistemáticos (y shotcrete sin refuerzo, 4-10cm) E(-S) | <ul style="list-style-type: none"> 5) Shotcrete con Fibras de Refuerzo y Pernos, 5-8cm, Sfr-B 6) Shotcrete con Fibras de Refuerzo y Pernos, 9-12cm, Sfr-E 7) Shotcrete con Fibras de Refuerzo y Pernos, 12-15cm, Sfr-B 8) Shotcrete con Fibras de Refuerzo y Pernos, >15cm, Sfr-RRS-B 9) Revestimiento con Concreto, CCA |
|---|--|

Fig 4.8 Cuadro de Clasificación de Rocas y Energía Absorbida para estabilizar cada una de ellas (incluyendo la necesidad de pernos) (Fuente: SIKA)

Actualmente, en el mercado existen 2 tipos de fibras de acero: la fibra pegada y la fibra suelta. La Fig. 4.7 muestra la apariencia de la fibra de acero pegada, la cual viene adherida con un pegamento especial que se disuelve en agua. A comparación de la fibra suelta, la cual como su nombre lo indica, no se encuentra adherida entre sí, la fibra pegada es más pequeña y más fina, de manera que con la fibra pegada es posible lograr una mayor densidad de fibras por unidad de volumen, lo cual se traduce en una mayor resistencia a la tracción en comparación con la fibra suelta.

Debido al pegamento que viene junto con la fibra pegada, ésta fibra no es recomendable para ser usada en la colocación del shotcrete vía seca, debido a que el agua es solamente adicionada en la boquilla, antes del lanzado, y sería poco efectiva su separación. Por ello, la fibra pegada es usada principalmente en el método vía húmeda, donde la mezcla lleva el agua mezclándose hasta el punto de aplicación.

Sin embargo, la fibra suelta si es usada tanto en vía seca como en vía húmeda, a pesar de que en la vía húmeda no llega a la misma cantidad de energía absorbida, no existe ningún problema en utilizar la fibra suelta para la vía húmeda.

4.4 Recomendaciones de Uso

Durante el manipuleo manual, es importante tener en cuenta que si se utiliza fibra de acero, ésta podría perforar pequeños agujeros a través de los guantes de protección y así dejar expuestas las manos a sustancias que puedan ser dañinas al contacto con la piel, ya que es probable de que puedan penetrar por dichos agujeros.

CAPÍTULO V. DISEÑOS DE MEZCLA

5.1 Especificaciones Técnicas

Para la elaboración de los diseños de mezcla, se utilizó como base las especificaciones técnicas de una obra reciente que requiere de sostenimiento vía shotcrete. Las especificaciones técnicas de dicha obra indicaban los siguientes límites:

Sobre la gradación de los agregados, la gradación a utilizar será la N° 2 indicada en la norma del shotcrete ACI 506R-90, el cual indica los siguientes límites:

TAMAÑO DE LOS TAMICES		PORCENTAJE QUE PASA (%)
(pulgadas o N°)	(mm)	
1/2 "	12.00	100
3/8 "	10.00	90 – 100
N° 4	4.75	70 – 85
N° 8	2.40	50 – 75
N° 16	1.20	35 – 50
N° 30	0.60	20 – 35
N° 50	0.30	8 – 20
N° 100	0.15	2 – 10

Tabla 5.1 Gradación N° 2 según ACI 506R-90

Adicionalmente, el shotcrete a utilizar deberá alcanzar una resistencia de 25 MPa a los 7 días y de 35 MPa a los 28 días. Para lograr esto, los componentes correspondientes a la mezcla para el shotcrete deberán estar comprendidos en las siguientes proporciones: (cantidades en kg de material por metro cúbico de concreto lanzado)

- Contenido de Cemento: 350 – 400
- Micro sílice: 30 – 50
- Fibra de Acero: 50 – 70
- Proporción Agregado/Cemento 3 – 5
- Relación Agua/Cemento 0.35 – 0.45

5.2 Diseño de Mezcla

Para el diseño de mezcla, se diferenciaron los métodos de aplicación vía húmeda y vía seca, y se realizó un diseño estándar sobre el cual se trabajará posteriormente.

Para el caso de shotcrete vía seca, el slump es de 0", con lo cual se obtiene una apariencia húmeda del concreto y la trabajabilidad de la mezcla hecha en seco en campo. Para el caso de shotcrete vía húmeda, el slump trabajado es de 5", el cual es un slump adecuado para el bombeo del concreto.

La medición del slump de la mezcla se realizó mediante lo especificado en la normativa internacional ASTM C-143, la cual especifica los equipos, la mezcla y el procedimiento.

Para el diseño por trabajabilidad del concreto debemos considerar de que la micro sílice y fibra de acero disminuyen en parte la trabajabilidad en una proporción pequeña (por citar un ejemplo basado en la experiencia en campo, de lograr un slump de 6" sin micro sílice ni fibra de acero, al incluir estas adiciones el slump disminuiría a aproximadamente 5½").

Debido a que los límites parecen ser bastante rígidos, debido a que es necesario mantener una relación agua/cemento menor a 0.45 y no se debe sobrepasar el límite de 400 kg. de cemento por metro cúbico de concreto (equivalente a 9.4 bolsas de cemento por metro cúbico de concreto).

Por ello, el primer diseño preliminar se realizó siguiendo las tablas de recomendación del ACI para diseño de concreto:

Siguiendo las recomendaciones de dichas tablas: para un concreto de 350 kg/cm² de resistencia, debemos considerar un valor de $f'_{cr} = 450$ kg/cm². Para calcular la cantidad de cemento a utilizar y tomando los límites de relación agua/cemento, obtenemos:

- Para un a/c de 0.35 = 570 kg de cemento.

- Para un a/c de 0.40 = 500 kg de cemento.
- Para un a/c de 0.45 = 445 kg de cemento.

Como se puede notar, las cantidades de cemento exceden los límites de cantidades indicadas en las especificaciones técnicas. Además, no es recomendable utilizar más de 10 bolsas de cemento por metro cúbico debido a que el exceso de cemento en un metro cúbico genera microfisuras en la mezcla. Sin embargo, para poder conocer los valores de resistencia a la compresión que se puedan lograr con estos diseños, se realizarán tandas de prueba para su estudio.

El primer diseño se realizó con los siguientes componentes: (para un a/c de 0.40)

MATERIALES	1 m ³	27 kg.
CEMENTO	450 kg.	5.32 kg.
AGUA	200 Lts.	2.36 Lts.
AGREGADO	1543 kg.	18.37 kg.
MICRO SÍLICE	50 kg.	0.59 kg.

Tabla 5.2 Cantidades de material para la primera tanda de prueba

Para este caso, al momento de la mezcla se necesitó agregar 1 litro más a la mezcla para poder alcanzar una slump de 4". La adición de 1 litro más a la mezcla hizo que la relación agua/cemento aumentase a 0.53.

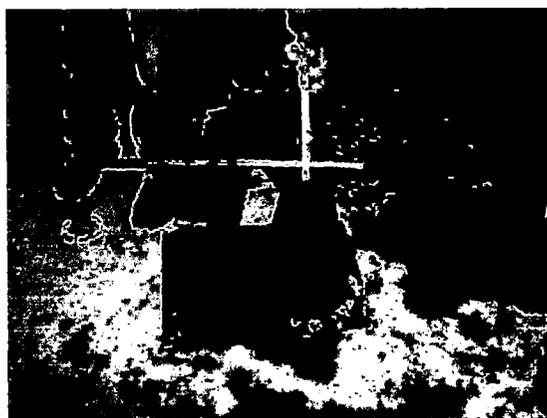


Fig. 5.1 Medición del Slump

Cabe mencionar que esta mezcla fue preparada como una tanda de concreto convencional, mezclada en un trompo y moldeada en probetas medianas de 4" x 8" (10 cm x 20 cm).

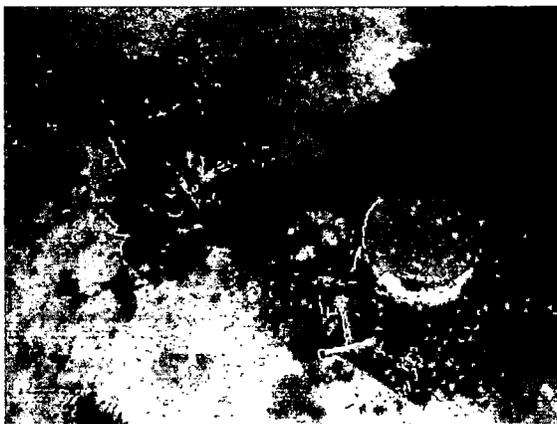


Fig. 5.2 Probetas de 4" x 8" para ser ensayadas a los 7 días

Los resultados a compresión de las probetas dieron un resultado de 295 kg/cm² de resistencia para 7 días, con lo cual es posible notar que es posible reducir un poco la cantidad de material necesario para poder mantenerse dentro de los límites citados en las especificaciones técnicas.

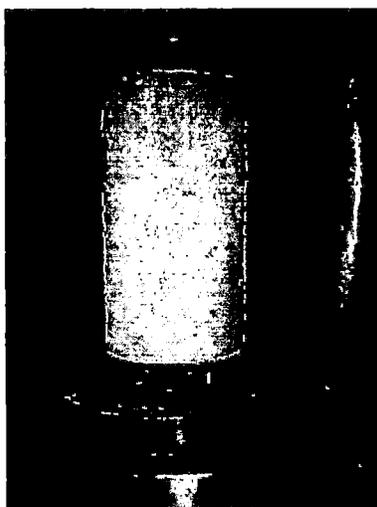


Fig. 5.3 Ensayo de una de las probetas de la primera tanda de prueba

Debido a que la relación agua/cemento superó el límite de 0.45 (llegó a ser 0.53), es posible aumentar la cantidad de cemento para mantener dicha relación dentro de los límites. Sin embargo, al realizar dicha corrección, la cantidad de cemento se eleva a cantidades cercanas a los 550 kg de cemento por metro cúbico de concreto, lo cual equivale a más de 12 bolsas de cemento y no es recomendable por los motivos mencionados anteriormente. Por lo tanto se opta por la inclusión de un aditivo plastificante para la mezcla.

Por alguna razón, el aditivo acelerante de fragua no presentaba una acción significativa de aceleración de fragua, por lo que no hubo problema en medir la trabajabilidad del concreto. Es por ello que para las siguientes tandas de ensayo se utilizó otro lote de aditivo por seguridad.

Una vez obtenido un lote nuevo de aditivos, se realizaron otras tandas de ensayo, para los cuales se dificultó el moldeado en las probetas medianas debido a la rápida acción del aditivo acelerante de fragua, generando varios vacíos difíciles de rellenar al momento de compactar las probetas.

Además, el hecho de realizar la mezcla en un trompo evitó que el aditivo pueda ser mezclado en su totalidad, generando manchas blanquecinas en la probeta:



Fig. 5.4 Probetas cilíndricas con manchas debido por falta de mezclado del aditivo y vacíos por la rápida fragua

5.3 Tandas de Prueba

Como se mencionó en capítulos anteriores, para la mezcla vía seca, es posible la aplicación de un superplastificante con retardante o control de fragua, debido a que la mezcla es trasladada con el agua mezclada, el tiempo de fragua puede representar un problema, por lo que los superplastificantes con retardo brindan un mayor tiempo de trabajabilidad que en muchos casos pueden llegar hasta 8 horas.

Al incluir un acelerante y contando con una tanda de prueba, se procedió a realizar los diseño por separado, es decir, tanto para vía húmeda como vía seca.

Debido a que los límites en la cantidad de cemento se encontraban entre 350 y 400 kg (un equivalente a 8.2 a 9.4 bolsas de cemento), se parte desde un cantidad conocida, que es la de 9 bolsas de cemento por metro cúbico de concreto (382.5 kg de cemento).

Las siguientes tandas de diseño no se elaboraron con las tablas del comité del ACI, la corrección fue hecha basándose en el peso unitario del concreto.

Debido a que son tandas de diseño, el moldeado se realizó en probetas cúbicas de 5 cm de lado. Cabe mencionar que el aporte de la fibra de acero a la resistencia a la compresión del shotcrete es mínimo, ya que su principal aporte es el de resistencia a la flexión; además, la fibra al tener una longitud de 3.6 cm, es muy difícil su manipulación en los moldes cúbicos de 5 cm.

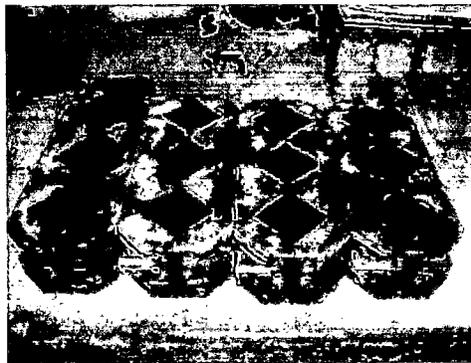


Fig. 5.5 Moldes cúbicos a utilizar para las siguientes tandas de prueba

Además, para poder crear un modelo más parecido al concreto lanzado, la mezcla se realizó a mano (debido al tamaño reducido de la tanda) y una vez realizado el mezclado del concreto, se le adicionó el acelerante de fragua (simulando la presencia del aditivo en la boquilla del lanzado, justo antes de ser aplicado). Esta metodología será aplicada de ahora en adelante, tanto para la vía húmeda como para la vía seca.

5.3.1 Pruebas para Vía Seca

Para la tanda de prueba para la aplicación vía seca, los materiales fueron los siguientes:

TANDA DE PRUEBA – VÍA SECA		
MATERIALES	1 m ³	Tanda 3 Lts.
CEMENTO	383 kg.	1.149 kg.
AGUA	153.2 Lts.	459.6 ml
AGREGADO	1812 kg.	5.436 kg.
MICRO SÍLICE	30 kg.	0.090 kg.

Tabla 5.3 Cantidades de material para la tanda de prueba para vía seca

Al realizar dicha tanda, se requirió de 173.6 ml de agua para poder lograr la apariencia del shotcrete vía seca, lo cual significa que la cantidad de agua subió a 633.2 ml por 1.149 kg. de cemento; o lo que es lo mismo, 211 Lts. de agua por 383 kg. de cemento, elevando la relación a/c de 0.40 a 0.55. Además, el peso unitario real del concreto fue de 2223 kg/m³, mientras que el teórico (determinado por la suma de los pesos de sus componentes), fue de 2435 kg/m³.

Esto significa que la cantidad de material utilizado no produce 1 m³ de concreto, en realidad se está produciendo más. Ya que no se producen los 2435 kg, si no que se producen solamente 2223 kg. Por lo tanto, la cantidad de cemento utilizado en este caso no es de 383 kg, es de: $383 \times 2223 / 2435 = 349.6$ kg de cemento.

Para corregir esto, se procede a ajustar la cantidad de agregado, el cual se disminuyó obteniendo los siguientes valores:

TANDA DE PRUEBA CORREGIDA – VÍA SECA		
MATERIALES	1 m3	Tanda 2 Lts.
CEMENTO	383 kg.	0.766 kg.
AGUA	211 Lts.	422 ml
AGREGADO	1572 kg.	3.144 kg.
MICRO SÍLICE	30 kg.	0.060 kg.

Tabla 5.4 Cantidades de material para la tanda de prueba corregida para vía seca

Para la tanda corregida, se dejó de utilizar 42 ml de agua, haciendo que el valor real sea de 381 ml por 0.766 kg. de cemento para la tanda de 2 litros, o 190.5 Lts. de agua por 383 kg. de cemento en un metro cúbico de concreto.



Fig. 5.6 Moldeado de las probetas cúbicas de 5 cm de lado

Para este caso, la relación a/c fue menor que para el caso anterior, obteniendo un valor de 0.49, valor que aún no se encuentra dentro de los límites citados por las especificaciones técnicas.

Debido a que se debe bajar la relación agua/cemento y aún existe un margen sobre la cantidad de cemento (hasta de 400 kg. de cemento), se aumenta la cantidad de cemento hasta el límite para tratar de cumplir con el requerimiento de la relación a/c .

Por lo tanto, aumentamos la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto, obteniendo el siguiente diseño:

TANDA FINAL – VÍA SECA		
MATERIALES	1 m3 seco	1 m3 húmedo
CEMENTO	400 kg.	400 kg.
AGUA	180 Lts.	185 Lts.
AGREGADO	1525 kg.	1535 kg.
MICRO SÍLICE	30 kg.	30 kg.

Tabla 5.5 Cantidades de material de la tanda final para vía seca

Con estas cantidades se puede lograr una tanda con una relación agua/cemento 0.45, lo cual está en el límite del rango permitido por las especificaciones técnicas. Por lo tanto, este diseño de mezcla es conforme.

5.3.2 Pruebas para Vía Húmeda

A diferencia de los diseños para vía seca, al shotcrete aplicado por mediante vía húmeda es posible dosificarle una cantidad de aditivo superplastificante para poder mantener baja la relación agua/cemento, y además para poder controlar el tiempo de fragua para cuando existen longitudes largas por recorrer.

Además, el slump que se utiliza para el shotcrete vía húmeda es generalmente de 5" para poder obtener un concreto fácil de bombear. Por ello, al igual que para las pruebas para shotcrete vía seca, la primera tanda de diseño (con 9 bolsas de cemento por metro cúbico de concreto) fue el siguiente:

TANDA DE PRUEBA – VÍA HÚMEDA		
MATERIALES	1 m3	Tanda 7 Lts.
CEMENTO	383 kg.	2.681 kg.
AGUA	153.2 Lts.	1.072 Lts.
AGREGADO	1574 kg.	11.018 kg.
MICRO SÍLICE	30 kg.	0.210 kg.
SUPERPLASTIFICANTE	4.08 kg.	0.043 kg.

Tabla 5.6 Cantidades de material para la tanda de prueba para vía húmeda (superplastificante al 1.2%)

En un primer intento se dosificó el aditivo superplastificante a un 1.2%, sin embargo, se necesitó aumentar la dosificación a un 2.0% y 140 ml de agua, logrando así el slump necesario para ser bombeado.

El peso unitario del concreto en este caso fue de 2365 kg/m³, valor mayor al peso unitario del concreto dosificado para la vía seca, debido principalmente a que este concreto (mediante vía húmeda), es más trabajable y tiene menor contenido de aire en comparación con el diseño de slump de 0”.



Fig. 5.7 Medición del slump para la mezcla vía húmeda

Al aumentar la cantidad de agua en 140 ml como se mencionó, la relación a/c aumentó a 0.453, lo cual está ligeramente sobre los límites especificados.

Finalmente, la tanda de prueba con el superplastificante dosificado al 2.0% es la siguiente:

TANDA DE PRUEBA – VÍA HÚMEDA		
MATERIALES	1 m3	Tanda 8 Lts.
CEMENTO	383 kg.	3.064 kg.
AGUA	173.2 Lts.	1.386 Lts.
AGREGADO	1694 kg.	13.552 kg.
MICRO SÍLICE	30 kg.	0.240kg.
SUPERPLASTIFICANTE	7.66 kg.	0.062 kg.

Tabla 5.7 Cantidades de material para la tanda de prueba para vía húmeda (superplastificante al 2.0%)

Al realizar nuevamente el mezclado del diseño realizado, se necesitó de 235 ml de agua para poder llegar al slump deseado, haciendo que la relación a/c llegue a ser de 0.52. Finalmente, el diseño de la primera tanda de prueba fue:

TANDA DE PRUEBA CORREGIDA– VÍA HÚMEDA		
MATERIALES	1 m3	Tanda 8 Lts.
CEMENTO	383 kg.	3.064 kg.
AGUA	202 Lts.	1.386 Lts.
AGREGADO	1694 kg.	13.552 kg.
MICRO SÍLICE	30 kg.	0.240kg.
SUPERPLASTIFICANTE	7.66 kg.	0.062 kg.

Tabla 5.8 Cantidades de material para la tanda de prueba corregida para vía húmeda (superplastificante al 2.0%)

De la misma manera que para el diseño del concreto a ser aplicado mediante vía seca, se cuenta aún con cierto margen para aumentar la cantidad de cemento hasta 400 kg por metro cúbico de concreto.

La siguiente tanda de diseño (con 400 kg de cemento) fue el siguiente:

TANDA FINAL – VÍA HÚMEDA		
MATERIALES	1 m3 seco	1 m3 húmedo
CEMENTO	400 kg.	400 kg.
AGUA	175 Lts.	180 Lts.
AGREGADO	1642 kg.	1652 kg.
MICRO SÍLICE	30 kg.	30 kg.
SUPERPLASTIFICANTE	7.66 kg.	7.66 kg.

Tabla 5.9 Cantidades de material de la tanda final para vía húmeda (superplastificante al 2.0%)

Una vez definidos los diseños de mezcla, es posible empezar a realizar las tandas para los ensayos a compresión.

CAPÍTULO VI. ENSAYOS REALIZADOS

6.1 Referencias de Ensayos

Actualmente, el concreto proyectado o shotcrete es usado como medida de sostenimiento de túneles. Una de las obras en las que está siendo utilizado es en una unidad minera en el departamento de Arequipa.

Las normas del American Society of Testing Materials (ASTM), establecen que los ensayos que se deben realizar al shotcrete se realizan mediante la obtención de paneles de concreto lanzado, cuyas dimensiones y método de llenado está especificado en dichas normas (ASTM C-1140).

Un estudio previo realizado en una unidad minera ubicada en el departamento de Arequipa compara el uso de 2 aditivos del mercado. Se toma como referencia los ensayos realizados en dicho estudio como base para la planificar los ensayos que se realizarán en el presente estudio.

Para este caso, el diseño de mezcla estaba determinado por las siguientes cantidades:

MATERIALES	UNIDADES	PESOS POR M3
Cemento Yura Tipo I	Kg.	425
Agua	Lts.	180
Agregado	Kg.	1415

Tabla 6.1 Diseño de Mezcla utilizada en la unidad minera de referencia (Arequipa)

Este diseño de mezcla está destinado para llegar a una resistencia a los 28 días de 210 kg/cm².

A diferencia del diseño de mezcla propuesto para esta investigación, este diseño de mezcla de shotcrete no incluye el uso de micro sílice ni de fibra de acero. La decisión del uso de dichos materiales depende principalmente del estudio del macizo rocoso a sostener, y de los esfuerzos que se deben estabilizar debido a la excavación del túnel.

La dosificación del aditivo queda definido por los límites recomendados por cada proveedor, utilizando una dosificación de 8.7% de SIKA y 4.0% de EUCO. A diferencia del estudio que se plantea, éstos ensayos sí se pudieron realizar en campo, en condiciones reales (menor temperatura y mayor altitud) y con la maquinaria en campo, el cual es el método óptimo debido a que las condiciones de laboratorio generalmente no se parecen a las condiciones reales, especialmente porque al ser un aditivo que se utiliza en minería y excavaciones subterráneas, las condiciones son diferentes a las de Lima.

Este diseño de mezcla es el que se viene utilizando desde el inicio de la obra, en lo que a cantidad de cemento, agregado y agua de mezcla. La variación, como se mencionó, es en la dosificación de cada aditivo.

El agregado utilizado fue obtenido de la cantera de Chimpo, al igual que el agua, que es proporcionada por la unidad misma. Como se ve en la tabla anterior, el cemento utilizado fue de la marca Yura, principalmente debido a la facilidad de transporte en la zona.

Nunca está demás mencionar que los materiales fueron los mismos para las pruebas en ambos casos de aditivos, tanto para EUCO como para SIKA. Sin embargo, el equipo de proyección utilizado en los ensayos no fue el mismo. Tanto el equipo de proyección como el operador de la maquinaria son factores determinantes para obtener un shotcrete de buena calidad, por ello, para una óptima comparación de aditivos, se deberán mantener dichos factores constantes.

La temperatura de la zona de aplicación fue de 27.8 °C, en la misma galería de aplicación.

Luego de la toma de paneles de mezcla de shotcrete, las pruebas fueron enviadas desde Arequipa hacia la ciudad de Lima, al Laboratorio de Ensayo de Materiales de la UNI para el ensayo de los testigos obtenidos de dichos paneles. Los resultados obtenidos, según el informe final presentado por el encargado del estudio, fueron los siguientes:

MARCA	ADITIVO	DOSIFICACIÓN	RESIST. 7 DÍAS
EUCO	Sureshot AF	4.0%	177 Kg/cm ²
SIKA	Sigunit L-50 AF	8.7%	85 Kg/cm ²

Tabla 6.2 Resultados de ensayos a compresión a 7 días de testigos tomados de los paneles

Es posible notar una gran diferencia entre las resistencias obtenidas para las muestras realizadas con SIKA y muestras con EUCO. Revisando las hojas técnicas de cada uno de los aditivos, se nota que el porcentaje utilizado para la marca SIKA excede en 0.7% el valor recomendado (máximo de 8.0%), el cual puede ser uno de los causantes de una diferencia tan notoria entre resistencias. Además, como se mencionó anteriormente, el equipo utilizado para cada muestra no fue el mismo, el cual también es un factor importante en el proceso de colocación de shotcrete.

También se realizaron ensayos de rebote para calcular la cantidad de material que no se adhiere al ser proyectado sobre la superficie a estabilizar. Para ellos se lanzaron 3 m³ de shotcrete, con un peso específico de 2037 Kg./m. Sobre estos ensayos se obtuvieron los siguientes resultados:

MARCA	ADITIVO	PESO MAT. REBOTE	PESO MAT. LANZADO	% REBOTE
EUCO	Sureshot AF	360.56 Kg.	6 111.00 Kg.	5.89
SIKA	Sigunit L-50 AF	1 200.32 Kg.	6 111.00 Kg.	19.45

Tabla 6.3 Resultados de ensayos de rebote

Para tener una comparación objetiva del comportamiento de los aditivos, todos los factores con excepción del aditivo deben permanecer inalterados a lo largo de los ensayos, no solamente la marca y la cantidad de los insumos (en referencia al tipo de cemento utilizado), sino también el equipo de lanzado y el operador de dicho equipo.

Por lo tanto, con estos resultados se obtiene una referencia acerca de los ensayos que se realizan en el shotcrete en campo, pero no contamos con valores realmente objetivos que nos permitan decidir cuál aditivo tiene una mejor performance en campo.

6.2 Determinación de las Propiedades Físicas del Agregado

Los materiales a utilizar en los ensayos, especialmente los agregados, son objeto de estudio en un primer momento debido a que deben cumplir con ciertos requisitos de tamaño y granulometría para poder garantizar un comportamiento adecuado dentro de la mezcla del concreto lanzado.



Fig. 6.1 Agregados a ensayar

Dentro de los ensayos que requieren ser aplicados a los agregados tenemos:

- Granulometría: según los husos recomendados por el ACI 506R-90.
- Determinación del Peso Específico de Masa. (Según la NTP 400.022)
- Determinación del Peso Unitario suelto y Peso Unitario compactado. (Según la NTP 339.046).

- Determinación del Contenido de Humedad y Absorción. (Según la NTP 400.022 para la absorción y la NTP 339.185 para el contenido de humedad).

El procedimiento de ensayo de granulometría está regulado por la normativa peruana NTP 400.012, y utilizando los husos granulométricos recomendados por el ACI 506R-90, la cual menciona los siguientes límites:

Malla	Tamaño Tamiz	Grad. N° 1	Grad. N° 2	Grad. N° 3
3/4"	19 mm.			100
1/2"	12 mm.		100	80 - 95
3/8"	10 mm.	100	90 - 100	70 - 90
N° 4	4.75 mm.	95 - 100	70 - 85	50 - 70
N° 8	2.4 mm.	80 - 100	50 - 70	35 - 55
N° 16	1.2 mm.	50 - 85	35 - 55	20 - 40
N° 30	0.06 mm.	25 - 60	20 - 35	10 - 30
N° 50	0.03 mm.	10 - 30	8 - 20	5 - 17
N° 100	0.015 mm.	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Tabla 6.4 Husos Granulométricos Fuente: Comité ACI 506R-90

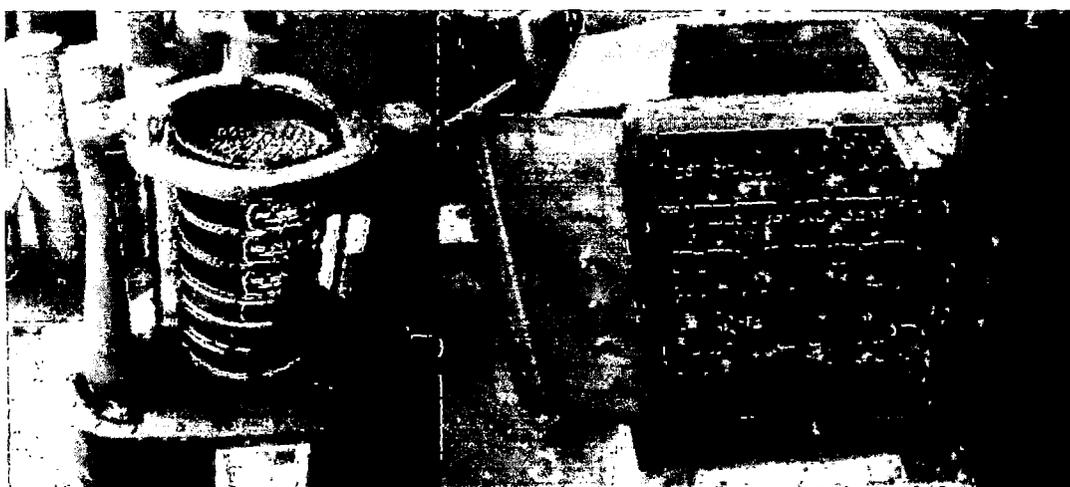


Fig. 6.2 Tamices Fino y Grueso

Para realizar el tamizado de estos agregados, se siguió el siguiente procedimiento:

- Primero, se pesa unos 30 kg de material y se separa los materiales gruesos de los finos utilizando la malla N° 4, logrando así 2 grupos de agregados a ensayar: los gruesos y los finos.
- Los agregados gruesos son tamizados en su totalidad en la zaranda para los agregados gruesos. El zarandeo se realiza durante 1 minuto, procediendo luego a obtener los pesos retenidos en las mallas.
- Para el agregado fino el procedimiento es similar, con excepción de que se obtiene primero una muestra representativa de 500 gr mediante el cuarto del agregado fino. Una vez obtenida la muestra representativa, procedemos a realizar el tamizado de material fino. Al igual que el material grueso, la zaranda se realiza durante 1 minuto y luego se procede a pesar el material retenido en cada malla.
- Conociendo el peso total de la muestra (30 kg.) y el peso total del material grueso, podemos conocer cuánto es el peso del material fino. Con este peso logramos ajustar los porcentajes retenidos en las mallas del material fino para poder obtener el total del tamizado en el agregado global u hormigón.
- Al haber calculado los pesos retenidos en las mallas y su porcentaje con respecto al total de la muestra, se procede a la comparación con los husos granulométricos y el cálculo del módulo de finura.

Debido a que el requerimiento de calidad específica que la gradación ACI a utilizar será la N° 2, el material debió primero ser tamizado por la malla de 1/2" para poder cumplir con este requerimiento, obteniendo los siguientes resultados:

TAMIZ		% RET	%RET. ACUM.	% PASA
(Pulg)	(mm)			
1/2"	12.5			
3/8"	9.5	9.83	9.83	90.17
N°4	4.75	5.34	30.34	69.66
N°8	2.38	16.17	46.51	53.49
N°16	1.19	14.44	60.96	39.04
N°30	0.6	10.61	71.56	28.44
N°50	0.3	16.32	87.89	12.11
N°100	0.15	8.20	96.09	3.91
FONDO	0.075	3.91	100.00	-

Tabla 6.5 Resultados de la Granulometría

Al compararlo con los límites de la gradación N°2 recomendado:

TAMIZ		LÍM. INFERIOR	% PASA	LÍM. SUPERIOR
(Pulg)	(mm)			
1/2"	12.5	100.00	100.00	100.00
3/8"	9.5	90.00	90.17	100.00
N°4	4.75	70.00	69.66	85.00
N°8	2.38	50.00	53.49	70.00
N°16	1.19	35.00	39.04	55.00
N°30	0.6	20.00	28.44	35.00
N°50	0.3	8.00	12.11	20.00
N°100	0.15	2.00	3.91	10.00

Tabla 6.6 Comparación con la Gradación N°2 del ACI506R

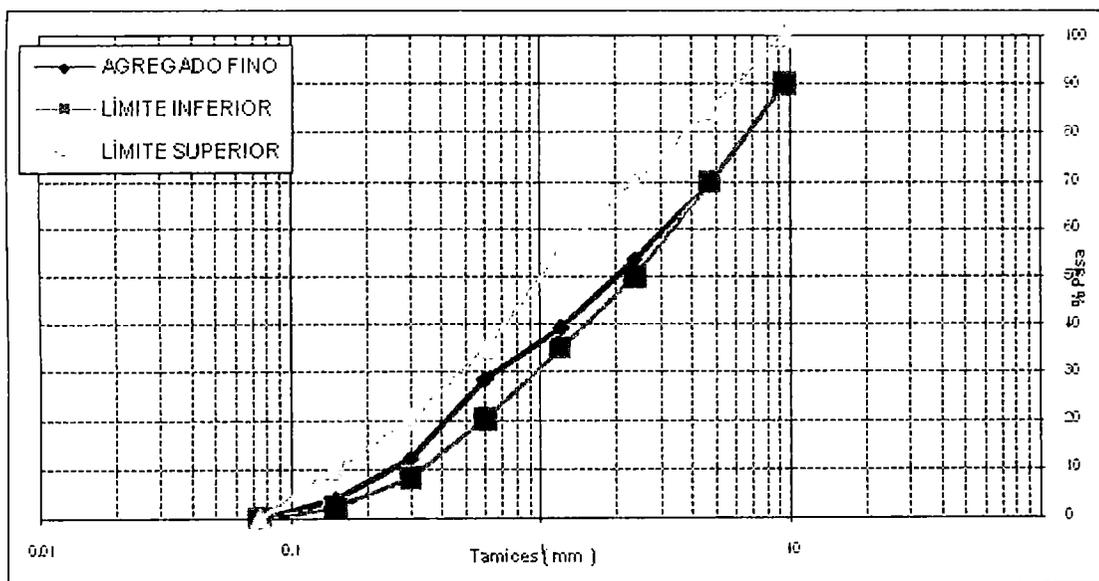


Fig. 6.3 Granulometría del Agregado

El ensayo para encontrar el Peso Específico de Masa, el ensayo suele durar entre 2 a 4 días y se realiza de la siguiente manera:

- Para este ensayo debemos hallar el peso de la muestra seca y el volumen que ocupa la muestra saturada superficialmente seca (s.s.s.). Se separa 2 kg de muestra para ser ensayados.
- Para poder obtener la muestra en estado saturado superficialmente seco (s.s.s.) debemos dejar la muestra sumergida en agua durante 24 horas. Pasado ese tiempo la muestra es retirada y se procede a esperar a que se seque y llegue al estado superficialmente saturado. Para esto existen 2 métodos, dependiendo si el material a analizar es fino o grueso.
 - o Para el caso de los gruesos, es suficiente con secar suave y cuidadosamente la superficie de cada roca para poder lograr un estado saturado superficialmente seco.
 - o Para el caso de los finos, se utiliza un balde troncocónico normado, dentro del cual los finos son colocados y compactados suavemente con un peso especial. Si al momento de retirar el balde troncocónico, la muestra mantiene su forma intacta, quiere decir que aún no se logra el estado saturado superficialmente seco. Dicho estado se logra cuando una parte del tronco cono se desprende y cae.
- Una vez obtenido el estado saturado superficialmente seco, se procede a medir su volumen, el cual comúnmente se realiza con una probeta graduada. Para este caso en particular, se utilizó un balde de 4 litros, con graduaciones a cada litro. Primero se llena 2 litros de agua, para luego colocar el material en el balde con agua. Luego de colocar el material, se procede a medir, con una probeta graduada, la cantidad de 1 litro de agua para luego ser vaciado en el balde hasta lograr un nivel de 3 litros. El agua que no se utilizó para llenar el balde equivale al volumen del material.

- Finalmente, se elimina el agua de la muestra de manera delicada para evitar la pérdida de finos, para finalmente llevar la muestra a secar al horno durante otras 24 horas. Pasadas las 24 horas la muestra es pesada y el peso específico de masa (Fórmula 6.1) está dado por:

$$Pe = \frac{P_{seco}}{V_{sss}} \quad 6.1$$

- Se puede aprovechar este ensayo para determinar tanto el contenido de humedad como la absorción. Para que se logre esto se debe pesar el material en el estado saturado superficialmente seco antes de que se mida el volumen de la muestra en estado saturado superficialmente seco.
- El contenido de humedad (Fórmula 6.2) y la absorción (Fórmula 6.3) están definidos por:

$$CH = \frac{(P_{natural} - P_{seco})}{P_{seco}} \times 100\% \quad 6.2$$

$$Abs = \frac{(P_{sss} - P_{seco})}{P_{seco}} \times 100\% \quad 6.3$$

Finalmente, para hallar el Peso Unitario Suelto y Compactado, el procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- Se utiliza un recipiente de acero de 1/2 pie cúbico de capacidad. Éste recipiente de acero es primero pesado vacío para conocer su peso y de manera que no altere los resultados del ensayo.



Fig. 6.4 Balde de 1/2 pie³

- Para calcular el peso unitario suelto (Fórmula 6.4), se procede a rellenar el recipiente con el material a estudiar, sin compactarlo con algún tipo de elemento externo. El excedente que queda sobre el recipiente debe ser retirado cuidadosamente utilizando una varilla normada de 60 cm de longitud, cara lisa y de diámetro 5/8". Una vez terminado este paso se procede al pesado del recipiente con la muestra:

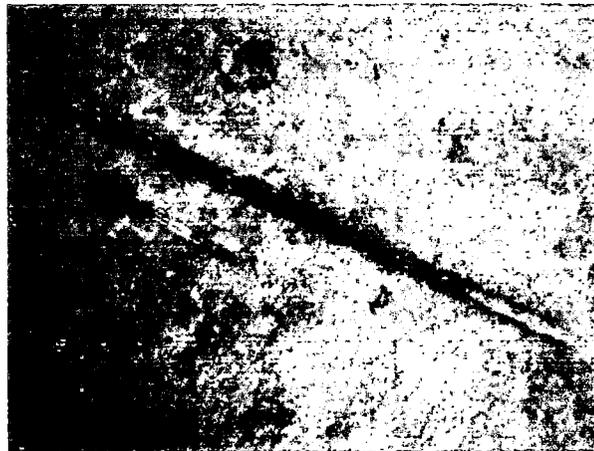


Fig. 6.5 Varilla para compactación normada

$$\text{P.U. Suelto} = \frac{P_{\text{suelto}}}{V_{\text{balde}}} \quad 6.4$$

- Para proceder al ensayo del Peso Unitario Compactado (Fórmula 6.5), el equipo utilizado es el mismo pero el proceso de llenado varía.
- Primero se llena la tercera parte de la altura total del recipiente, para luego ser compactado utilizando la vara anteriormente mencionada (de 60 cm de largo, cara lisa, punta roma y diámetro de 5/8"), y se compacta con 25 golpes de manera periférica (desde afuera hacia adentro). Se procede de manera similar para las 2 capas siguientes:

$$\text{P.U. Compactado} = \frac{P_{\text{compactado}}}{V_{\text{balde}}} \quad 6.5$$

6.3 Determinación de la Resistencia a la Compresión

Las variables a tomar en cuenta para este estudio serán:

- Marca del aditivo: teniendo en cuenta 3 marcas diferentes.
- Dosificación del aditivo: según la proporción indica por cada proveedor.
- Método de aplicación: según sea vía seca o vía húmeda.

Los aditivos a comparar en este estudio pertenecen a 3 de las más conocidas marcas del mercado de los aditivos, entre las cuales tenemos:

- SIKA Sigunit L-50 AF: Aditivo acelerante de fragua libre de álcali para ser utilizado en concreto proyectado, tanto por vía húmeda como por vía seca. Líquido incoloro con una densidad de 1.27 kg/litro y un pH de alrededor de 4.

La dosis recomendada para la aplicación del Sigunit L-50 AF varía entre 6% a 8% del peso del cemento.

- EUCO Sureshot AF: Aditivo acelerante de fragua líquido libre de álcalis para ser utilizado en concreto o mortero lanzado. Es de color blanco translúcido y su densidad es de 1.35 kg/litro.

Su dosificación recomendada varía entre 2% a 6% del peso del cemento.

- **BASF Meyco SA160:** Acelerante líquido libre de álcali de alto desempeño para shotcrete. Es de color beige y tiene una densidad de 1.43 kg/litro.

Su dosificación puede variar entre 3% hasta un 10%.

Los diseños para el concreto a utilizar fueron explicados en el Capítulo V. Siguiendo la recomendación de cada fabricante, se realizarán 3 tandas de diseño por cada marca de aditivo. Además, se diferenciará el método de aplicación a ser utilizado, tanto vía húmeda como vía seca. Por lo tanto, en total serán 18 diseños.

Las dosificaciones utilizadas para cada aditivo fueron:

- SIKA Sigunit L-50 AF: al 6%, 7% y 8%.
- EUCO Sureshot AF: al 2%, 4% y 6%.
- BASF Meyco SA160: al 4%, 6% y 8%.



Fig.6.6 Muestras de Laboratorio del Sigunit L-50 AF, Meyco SA160 y Sureshot AF

Como se mencionó en capítulos anteriores, las normas de shotcrete (tales como la ASTM C-1140 sobre paneles de shotcrete y ASTM C-42 para obtención de testigos prismáticos y la norma europea EFNARC) mencionan de que los análisis de shotcrete deben ser realizados sobre paneles de shotcrete y testigos obtenidos de dichos paneles; tanto para las pruebas de compresión como las de paneles de flexión.

Sin embargo, es necesario tener una idea de cómo se comportará el diseño de mezcla realizando una tanda para ensayos a compresión en laboratorio. De esta manera, podremos asegurarnos de que será posible alcanzar la resistencia requerida en campo, resistencia la cual está ayudada por el hecho de que al realizar el lanzamiento del concreto el contenido de aire de la mezcla se reduce prácticamente a cero debido a la fuerza de compactación del lanzamiento, la cual también es razón de un aumento de resistencia (fuerza de impacto al chocar contra el estrato).

Los ensayos a compresión son muy comunes en todos los laboratorios, y se realizan de la misma manera para testigos vaceados en moldes o para testigos prismáticos obtenidos de los paneles de lanzamiento.

Pero hay que tener en cuenta el tipo de probeta a ensayar (si es cilíndrica o cúbica) y sus dimensiones. Según estudios recientes sobre estos parámetros (Universidad de Castilla – España en el 2007), los factores que afectan en la relación entre una probeta normal (6" de diámetro x 12" de alto) y los demás tipos de probetas cilíndricas medianas (de 4" x 8" o 3" x 6") o cúbicas (de 2" o 1.5" de lado) son el mecanismo de fractura y los factores de forma y tamaño.

Para el caso de probetas cúbicas el mecanismo de falla para los diferentes tamaños de las probetas cúbicas es similar, empezando por las zonas próximas a las esquinas, extendiéndose posteriormente al resto de la misma.

Las conclusiones de dicho estudio arrojan una ecuación con la cual podemos calcular el factor de corrección para las probetas cúbicas, ya que éstas siempre arrojan un valor mayor comparado a si la muestra hubiese sido ensayado en una probeta de 6" x 12".

Dicho factor está expresado por la siguiente fórmula:

$$f_c = \sigma_{cub} \times (L / (L + L_o))^{1/2} \quad 6.6$$

Donde:

- f_c = Resistencia a la compresión real (Kg/cm^2)

- σ_{cub} = Resistencia a la compresión obtenida del ensayo (Kg/cm^2)
- L = Dimensión del lado de la probeta cúbica (mm.)
- L_0 = Constante empírica = 20 mm.

De esta manera, reemplazando el dato de $L = 50$ mm., el coeficiente de corrección equivale a 0.85. En otras palabras, si el ensayo fuese realizado en una probeta de 6" x 12", el valor obtenido sería igual al 85% del resultado obtenido al ensayar la probeta cúbica.

Para cada tanda de ensayo, debido a la presencia de un acelerante de fragua dentro de la mezcla, se requieren ensayos tempranos como a las 8 horas y 1 día, y para poder completar la curva de desarrollo de resistencia; son necesarios valores a los 3, 7 y 28 días de vaceada la mezcla.

El ensayo de compresión en testigos cúbicos de 2" de lado (o 50 mm de lado) se realizó de acuerdo a la normativa ASTM C-109 donde se especifica el método de ensayo para las probetas cúbicas de morteros de cemento.

Al contar con 2 probetas por cada día de ensayo, contamos con que cada tanda deberá estar compuesta por lo menos 10 muestras cúbicas.

Los resultados de los ensayos a compresión fueron los siguientes:

SIKA Sigunit L-50 AF

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm^2)						
Aplicación	VÍA HÚMEDA			VÍA SECA		
Dosificación	6%	7%	8%	6%	7%	8%
8 horas	11	12	14	13	17	21
1 día	80	92	100	88	100	81
3 días	230	234	268	260	275	169
7 días	353	372	325	362	400	333
28 días	553	518	448	599	580	413

Tabla 6.7 Resultados a compresión con el Sigunit L-50 AF

EUCO Sureshot AF

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)						
Aplicación	VÍA HÚMEDA			VÍA SECA		
Dosificación	2%	4%	6%	2%	4%	6%
8 horas	0	2	9	6	9	10
1 día	62	90	92	120	88	55
3 días	211	260	292	282	200	160
7 días	344	386	397	405	326	267
28 días	526	508	442	332	280	338

Tabla 6.8 Resultados a compresión con el Sureshot AF

BASF Meyco SA160

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)						
Aplicación	VÍA HÚMEDA			VÍA SECA		
Dosificación	4%	6%	8%	4%	6%	8%
8 horas	6	29	42	15	26	22
1 día	96	100	111	112	120	88
3 días	275	302	320	226	208	154
7 días	386	434	367	336	346	306
28 días	558	444	375	388	366	200

Tabla 6.9 Resultados a compresión con el Meyco SA160

También se realizó el vaciado de un shotcrete patrón, al cual no se le aplicó el aditivo acelerante. De esta manera es posible tener los valores de resistencia reales para ser comparables con los resultados obtenidos de las probetas con aditivos acelerantes.

Por motivos de continuidad de resultados, la mezcla patrón se realizó solo para la mezcla por vía húmeda, utilizando el diseño de mezcla propuesto, incluyendo el aditivo superplastificante.

Los resultados obtenidos para la vía húmeda fueron:

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm²)	
8 horas	0
1 día	65
3 días	212
7 días	384
28 días	560

Tabla 6.10 Resultados a compresión del shotcrete vía húmeda patrón

Tanto los moldeados como los ensayos de las probetas se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería.

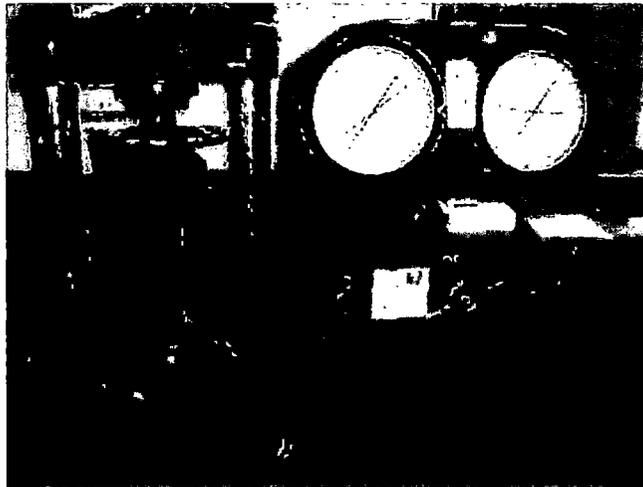


Fig. 6.7 Equipo de ensayo del LEM

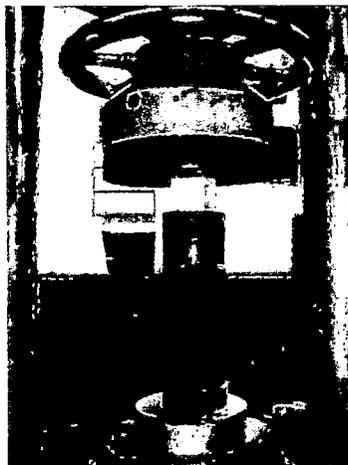


Fig. 6.8 Ensayo a compresión de los testigos cúbicos

Los ensayos se realizaron entre los días 18 de Agosto al 24 del mismo mes. Las tandas se realizaron en la sala de cementos del Laboratorio de Ensayo de Materiales, aproximadamente entre las 8:30 am y las 10:00 am debido a la necesidad de la rotura de probetas a las 8 horas, dando un aproximado de hora de ensayo a las 5:00 pm.

6.4 Determinación de la Resistencia en Compresión en Campo

Debido a que los ensayos realizados en condiciones de laboratorio no son las mismas condiciones bajo las cuales se aplicará el shotcrete (tanto en condiciones ambientales como metodología de aplicación), es necesario realizar ensayos en campo para determinar si la metodología utilizada en el laboratorio es una buena aproximación de la realidad.

En el ensayo de resistencia a compresión en campo se utilizará el equipo designado a utilizar para la ejecución de la obra de la Central Hidroeléctrica de Machu Picchu.

El procedimiento para la obtención de los paneles lanzados de shotcrete se encuentra especificada en la norma ASTM C-1140 "Standart Practice for Preparing and Testing Specimens from shotcrete Panels" (Procedimiento estándar para la preparación y ensayo de especímenes de paneles de shotcrete), apoyándose a su vez en las normas ASTM C-42 "Standart Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete" (Método de ensayo estándar para la obtención de núcleos y vigas de concreto). Estas 2 normas estandarizan el procedimiento a seguir para la preparación de los paneles que recibirán el shotcrete (incluyendo desde las dimensiones y material de fabricación de los paneles, hasta la elaboración del reporte de resultados) y la forma de obtener los testigos cilíndricos para su posterior ensayo en el laboratorio.

En este caso se ensayarán 3 testigos cilíndricos obtenidos del lanzado de shotcrete en tramo de túnel de acceso para la obra de la C.H. Machu Picchu. Debido a varios contratiempos ocurridos en campo, estos testigos cilíndricos serán ensayados a los 3 días de su lanzado, para su posterior comparación con

los resultados obtenidos de los testigos vaceados en laboratorio a mano y en condiciones ambientales (tanto de humedad como temperatura) de Lima.

Para este ensayo y para la ejecución de la obra de la C.H. Machu Picchu, se decidió utilizar el aditivo producido por la marca SIKA. Por lo tanto, los ensayos de lanzado de shotcrete en Cuzco son pueden ser comparados solamente con los resultados obtenidos en el laboratorio utilizando la misma marca y el mismo producto de la marca SIKA.

La dosificación de aditivo acelerante de fragua para shotcrete utilizada en el ensayo de campo fue de 7% del peso del concreto, valor encontrado dentro del rango recomendado por los proveedores y coincidente con uno de los valores utilizados en los ensayos realizados en laboratorio; por lo tanto es posible realizar una comparación entre ambos resultados.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes mostrados a continuación:

RESULTADOS DE ENSAYO EN CAMPO		
Fecha Vaceado	Fecha Rotura	Resistencia (kg/cm²)
16/12/2009	19/12/2009	310
16/12/2009	19/12/2009	294
16/12/2009	19/12/2009	310

Tabla 6.11 Resultados a compresión del shotcrete vía húmeda lanzados en campo

Para este caso, los ensayos arrojaron un valor promedio de 304.6 kg/cm².

Antes de la realización de ensayos en campo con aditivo acelerante libre de álcali, también se obtuvieron ensayos de compresión en campo, utilizando el mismo diseño de mezcla de shotcrete pero cambiando el aditivo, de un libre de álcali a uno alcalino, obteniendo los siguientes resultados:

RESULTADOS DE ENSAYO EN CAMPO		
Fecha Vaceado	Fecha Rotura	Resistencia (kg/cm ²)
14/09/2009	03/11/2009	272
14/09/2009	25/10/2009	235
14/09/2009	03/11/2009	267
14/09/2009	03/11/2009	249
09/10/2009	25/10/2009	240
09/10/2009	25/10/2009	211

Tabla 6.12 Resultados a compresión del shotcrete vía húmeda lanzados en campo con aditivo alcalino

Como se puede observar de la tabla, la ganancia a lo largo del tiempo y la pérdida final de resistencia es bastante notoria con el uso de aditivos acelerantes alcalinos.

6.5 Determinación de la Tenacidad del Shotcrete

El elemento principal al cual el shotcrete le debe la ductilidad es el refuerzo de fibras, ya sean de acero o sintéticas. Con esta adición, es posible que el shotcrete resista cargas luego de que ocurra la rotura del mismo concreto (ya que como se sabe, la resistencia a la tracción por parte del concreto es muy baja).

Si bien la propiedad de la resistencia a la flexión se debe principalmente a la cantidad de fibra utilizada, el diseño del concreto y la resistencia a la compresión también juegan un papel importante, ya que la carga aplicada hasta antes de que ocurra la primera rotura se debe a la resistencia misma del concreto. Por este motivo, las pruebas de tenacidad deberán estar siempre bien documentadas y correlacionadas con las pruebas realizadas a compresión de probetas, para poder tener certeza de que se está utilizando una buena mezcla y no obtener resultados arbitrarios.

Cuando se realiza el diseño estructural de una viga o losa, el valor de f_c siempre está presente en el diseño al ser éste el responsable de la capacidad que puede

resistir la sección de la viga o la losa en sí. Por ello, la primera paso para poder obtener una buena tenacidad en el shotcrete es el tener un diseño apropiado que alcance la resistencia especificada en las especificaciones técnicas (para este caso, 35 MPa a los 28 días).

Los ensayos para la calcular la tenacidad del shotcrete se realizan siempre sobre especímenes que hayan cumplido ya los 28 días después del muestreo.

La normativa ASTM C1018 regula el ensayo para calcular la resistencia a la flexión y la resistencia hasta la primera fisura de concreto reforzados con fibra, mediante un ensayo de carga sobre una viga a los tercios ("Standart Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete Using Beam With Third-Point Loading", véase figura 6.9), para lo cual se hace la referencia a la norma ASTM C78 ("Standart Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam Third-Point Loading").

Esta norma regula, entre otros, las dimensiones de la muestra, los datos a tomar, la velocidad de carga, por mencionar algunos de los más saltantes.

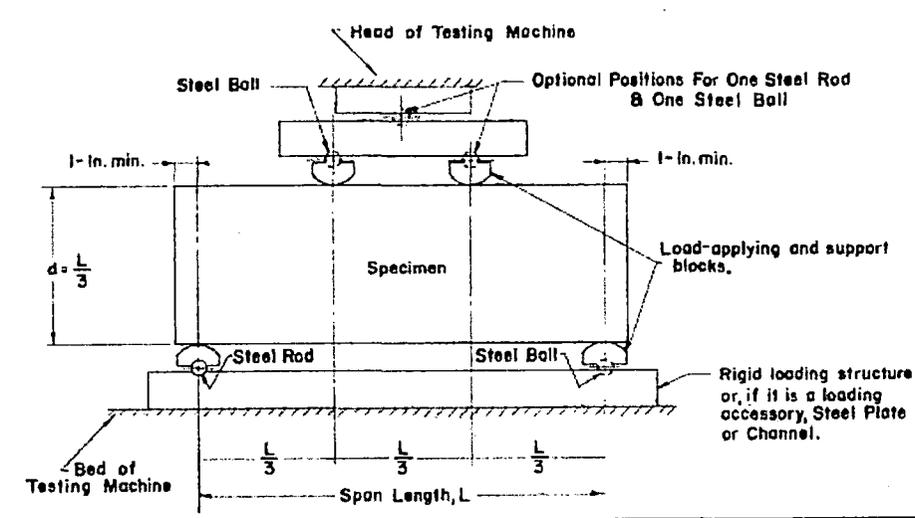


Fig. 6.9 Esquema de Ensayo a Flexión de una Viga (ASTM C78, 1994)

El ensayo se procede según lo especificado en la norma ASTM C78, sin embargo, para el cálculo de la resistencia residual de la fibra de refuerzo y la determinación de la tenacidad, se calculan ciertos valores (índices de la resistencia) según lo especificado en la norma ASTM C1018.

Las dimensiones de la viga utilizadas para el ensayo. El largo de los especímenes debe ser como mínimo 350 mm. Con respecto a la sección transversal, generalmente es recomendable una sección 100 mm x 100 mm, obteniendo así un espécimen de 100 mm x 100 mm x 350 mm.

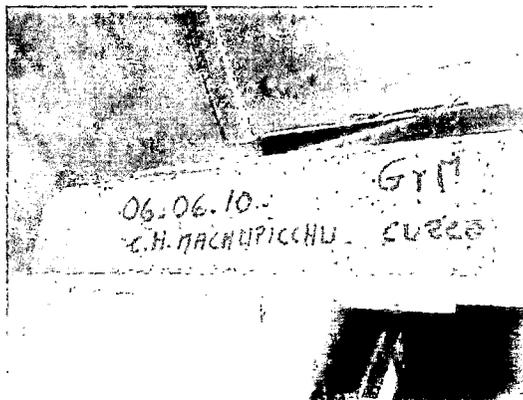


Fig. 6.10 Muestra enviada de campo para ser ensayada a flexión

La velocidad de aplicación de carga debe ser la adecuada para que la deformación en el centro del espécimen varíe constantemente a lo largo del tiempo de ensayo. Para la sección indicada anteriormente, la velocidad de aplicación de carga debe lograr una deformación de 0.05 a 0.10 mm/min.

Se realizó un ensayo en el LEM de la UNI sobre 2 muestras enviadas directamente del Cuzco y se realizó además una prueba en las instalaciones de SENCICO.

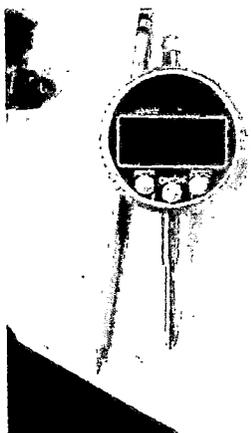


Fig. 6.11 Medidor de deformaciones utilizado

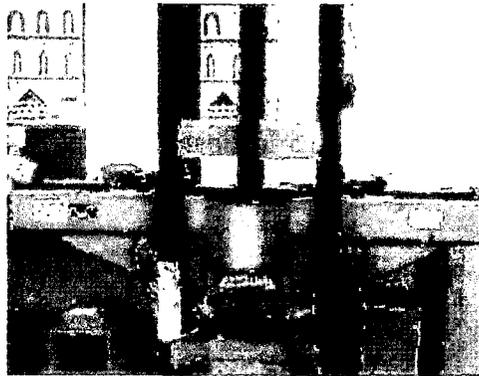


Fig. 6.12 Disposición de la muestra para ser ensayada

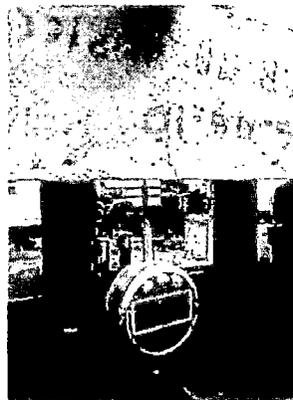
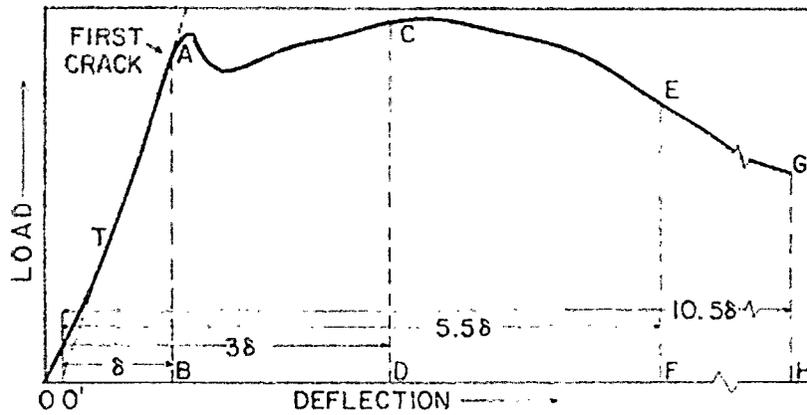
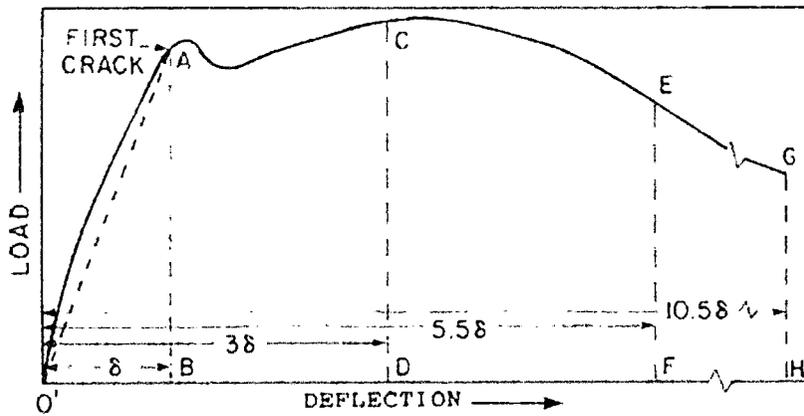


Fig. 6.13 Acercamiento al medidor de deformaciones

De las mediciones realizadas a medida que se realiza el aumento de la carga de ensayo, se obtiene una gráfica de Esfuerzo vs. Deformación anteriormente mencionada, de donde es posible obtener los índices de tenacidad del concreto y los factores de esfuerzo residual:



(a) Concave upwards to first crack



(b) Convex upwards to first crack

Fig. 6.14 Modelos de curvas obtenidas del ensayo a flexión: (a) cóncavo hacia arriba antes de la primera rajadura, (b) convexo hacia arriba antes de la primera rajadura (ASTM C78, 1994)

Una vez definida la primera rajadura, se calcula el área bajo la curva hasta dicho punto. Luego, a una distancia igual a 3 veces la deformación de la primera rajadura, se calcula nuevamente el área bajo la curva hasta este punto. De esta manera, al realizar la división entre el área para la primera rajadura y el área recién calculada, obtenemos el índice I_5 .

De manera similar, a las distancias iguales a 5.5 y 10.5 de la deformación a la primera rajadura, se calcula el área bajo la curva hasta dichos puntos para que luego el área bajo la curva antes de la primera rajadura sea dividido entre dichas áreas obtenidas, hallando así los índices I_{10} e I_{20} .

Los factores de esfuerzos residuales se calculan utilizando los índices recién calculados, el factor $R_{5,10}$ es calculado mediante la fórmula $20x(I_{10}-I_5)$, mientras que el factor $R_{10,20}$ se calcula con la fórmula $10x(I_{20}-I_{10})$.

En un apéndice sobre la justificación de la misma norma, se indica que las condiciones para la primera rotura del espécimen dependen de variables geométricas asociadas a la forma y a la disposición del ensayo. Por ello, los índices de I_5 , I_{10} e I_{20} pueden ser utilizados para identificar el tipo de comportamiento de la muestra (si tiene un comportamiento lineal elástico hasta la primera rotura y luego un comportamiento plástico).



Fig. 6.15 Observación de la grieta en el punto de aplicación de carga

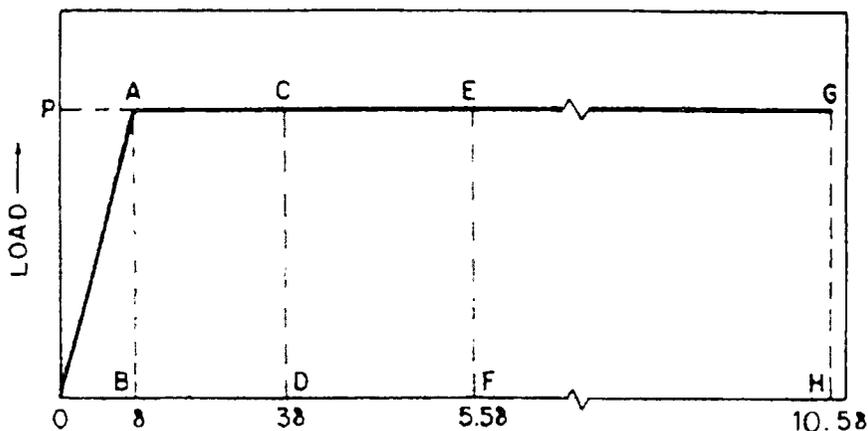


Fig. 6.16 Gráfico elaborado con menos puntos registrados.

Las mediciones hechas en el LEM dieron los siguientes datos:

Vigueta N°1		Vigueta N°2	
Carga (kg)	Deform. (mm)	Carga (kg)	Deform. (mm)
0	0	0	0
100	0	100	0
200	0.02	200	0.01
300	0.04	300	0.02
400	0.06	400	0.03
500	0.08	500	0.04
650	0.25	600	0.06
580	35	650	0.25
		600	25

Tabla 6.13 Registro de datos del ensayo a tenacidad en el LEM.

Para ambos casos, la primera rotura se dio al llegar a la carga de 650 kg. Con pocos puntos, la gráfica que se obtiene es muy poco refinada y no se obtiene un resultado confiable. Dichos resultados se muestran en el siguiente gráfico:

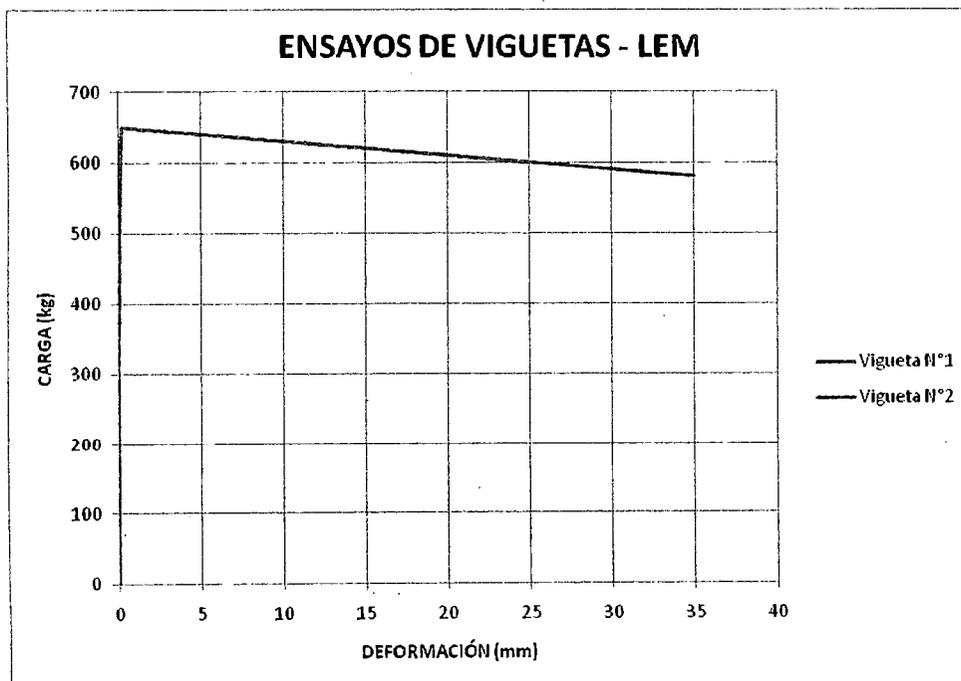


Fig. 6.17 Gráfico elaborado con los datos del ensayo de tenacidad en el LEM.

Los resultados obtenidos en SENCICO se resumen en el siguiente gráfico:

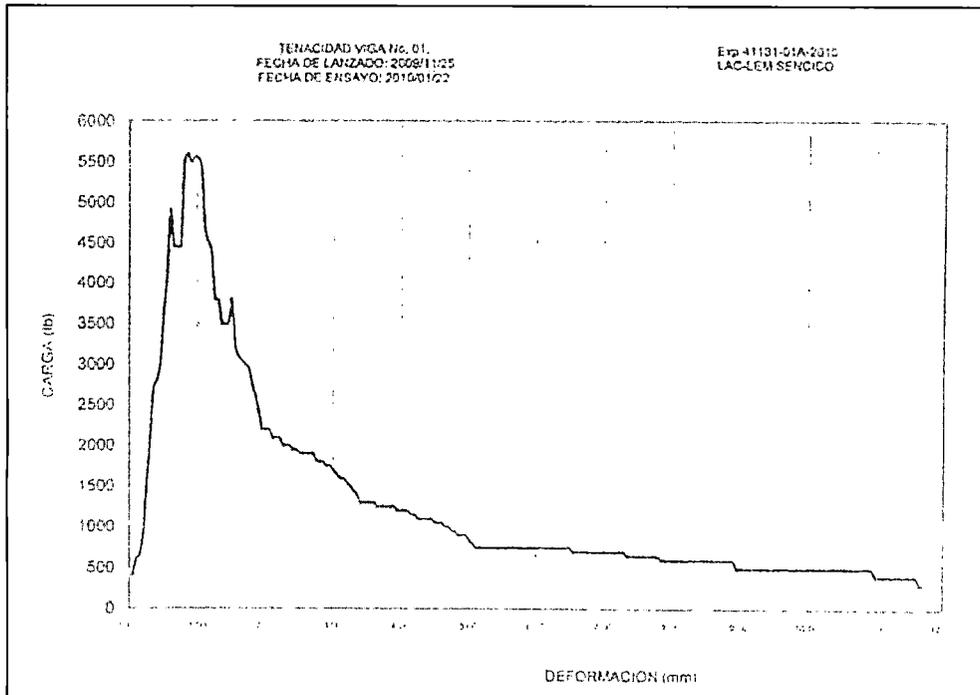


Fig. 6.18 Gráfico elaborado por SENCICO con los datos del ensayo de tenacidad.

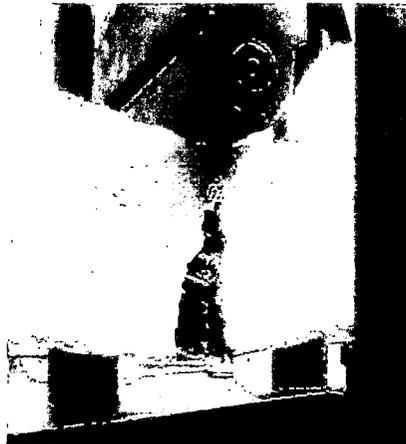


Fig. 6.18 Observación del trabajo de las fibras de acero luego de la fractura

Para poder revisar la cantidad de datos tomados, es posible revisar el anexo correspondiente al registro del ensayo de la vigueta realizada en SENCICO.

Aparte del ensayo de viguetas, la EFNARC (como se mencionó en capítulos anteriores), propone el ensayo de una losa cuadrada apoyada a 10 cm del borde sobre todo el perímetro de la losa. Dicho ensayo nos permite hallar la energía absorbida por el panel luego de la rotura.

CAPÍTULO VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Análisis Previos

Para el caso de los acelerantes de fragua, el factor determinante generalmente es el de la resistencia final a los 28 días, es decir, el valor para el que se realizó el diseño fue para alcanzar los 35 MPa de resistencia a los 28 días. Sin embargo, es importante también medir la resistencia inicial, la cual es de suma importancia en el sentido de que al ser utilizado en estabilización, el shotcrete debe lograr una buena resistencia inicial para poder soportar las presiones del macizo rocoso.

En primer lugar, debido a que los ensayos se realizaron en probetas cúbicas de 5 cm de lado, debemos aplicar el factor de corrección para hacer el valor comparable con el de una probeta normal de dimensiones 6" de diámetro por 12" de altura. Según la fórmula y los valores expresados en el capítulo anterior, el factor de corrección a aplicar a los resultados obtenidos es de 0.85.

De esta manera se obtienen los siguientes valores:

SIKA Sigunit L-50 AF

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²) CORRIGIDO						
Aplicación	VÍA HÚMEDA			VÍA SECA		
Dosificación	6%	7%	8%	6%	7%	8%
8 horas	9	10	12	11	14	18
1 día	68	78	85	75	85	69
3 días	196	199	228	221	234	144
7 días	300	316	276	308	340	283
28 días	470	440	381	509	493	351

Tabla 7.1 Resultados a compresión con el Sigunit L-50 AF corregidos

EUCO Sureshot AF

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm²) CORREGIDO						
Aplicación	VÍA HÚMEDA			VÍA SECA		
Dosificación	2%	4%	6%	2%	4%	6%
8 horas	0	2	8	5	8	9
1 día	53	77	78	102	75	47
3 días	179	221	248	240	170	136
7 días	292	328	337	344	277	227
28 días	447	432	376	282	238	287

Tabla 7.2 Resultados a compresión con el Sureshot AF corregidos

BASF Meyco SA160

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm²) CORREGIDO						
Aplicación	VÍA HÚMEDA			VÍA SECA		
Dosificación	4%	6%	8%	4%	6%	8%
8 horas	5	25	36	13	22	19
1 día	82	85	94	95	102	75
3 días	234	257	272	192	177	131
7 días	328	369	312	286	294	290
28 días	474	377	319	330	311	170

Tabla 7.3 Resultados a compresión con el Meyco SA160 corregidos

Y los resultados para la tanda patrón sin aditivo acelerante obtenemos:

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm²)	
8 horas	0
1 día	55
3 días	180
7 días	326
28 días	480

Tabla 7.4 Resultados a compresión del shotcrete vía húmeda patrón corregidos

Como primera observación, notamos que los valores de resistencia a la compresión de los especímenes realizados por vía seca nos arrojan valores ligeramente mayores a los realizados por vía húmeda; esto se debe a que, como se mencionó, el superplastificante tienen un retardante de fragua para poder contrarlar dicha fragua en la mezcla húmeda durante el viaje que se debe realizar desde la planta dosificadora hasta el lugar de aplicación.

Sin embargo, para las mayores dosificaciones del aditivo, los valores de resistencia a la compresión varían de una manera bastante irregular y dejan de tener la continuidad que tienen las mezclas por vía húmeda. Estas irregularidades son producto de la difícil trabajabilidad que ofrece la mezcla vía seca con dosificaciones altas de aditivo.

La falta de trabajabilidad se traduce en una gran cantidad de vacíos presentes en la probeta debido a la dificultad de compactación manual. Obviamente, al ser aplicado en shotcrete vía seca en campo este problema no se va a presentar debido a: primero, a que el aditivo es aplicado en la boquilla de salida, por lo que la diferencia de tiempo entre el lanzado y la compactación es mínimo, a diferencia del laboratorio donde hay que moldear cada probeta; y segundo, debido a la fuerza de lanzado y compactación que se aplica en la boquilla de lanzado.

Explicado esto, contamos con resultados que no expresan realmente el valor de resistencia a la compresión. Dichos resultados son los obtenidos de las siguientes tandas:

- SIKA vía seca al 8%.
- EUCO vía seca al 4% y 6%.
- BASF vía seca al 8%.

De ser necesario, es posible deducir los valores que se obtendrán para dichas dosificaciones guiándonos por los valores obtenidos mediante la vía húmeda.

Para las demás observaciones, éstas serán explicadas a medida que se presentan los gráficos para facilitar su entendimiento.

Para realizar la comparación de los resultados de las variaciones tanto de los aditivos como de sus dosificaciones, se debe diferenciar entre la comparación de los valores de resistencia a edades tempranas, los cuales son principalmente a las 8 horas, 1 día y 3 días; de las resistencias a las edades finales, principalmente a los 28 días.

Dentro de estos análisis previos, es posible incluir una comparación entre los resultados obtenidos en el laboratorio utilizando el método de elaboración de probetas cúbicas de 50 mm de lado, versus los resultados obtenidos de los ensayos realizados en campo con el equipo de lanzamiento de shotcrete por vía húmeda.

Comparando los resultados obtenidos:

	Ensayo en Laboratorio	Ensayo en Campo
Resultados a 3 días	199 kg/cm ²	304.6 kg/cm ²

Tabla. 7.5 Relaciones de resistencia a la compresión de 3 días

Analizando estos resultados, notamos que la resistencia obtenida en campo es aproximadamente 50% mayor que la resistencia obtenida en el laboratorio. Esta diferencia de resistencias es principalmente debido a la energía de compactación que se obtiene al utilizar el equipo de lanzamiento de shotcrete, la cual es mucho mayor a la utilizada al compactar los testigos cúbicos con solamente la fuerza del brazo.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de los ensayos en campo con el aditivo alcalino, obtenemos los siguientes resultados:

- Los ensayos a aproximadamente 14 días (del 09/10 al 25/10), el valor de las probetas ensayadas ni siquiera logró superar el valor que debería alcanzar a los 7 días.
- Los ensayos a más de 28 días (del 14/09 al 03/11, cerca de 50 días), el valor de la resistencia no pudo alcanzar el valor de los 35 MPa para el cual estaba proyectado.

De esta manera notamos una diferencia entre lo que las propiedades que le proporcionan al shotcrete tanto los aditivos acelerantes libres de álcali como los alcalinos.

Con referencia a los ensayos de tenacidad, se analizan 2 casos: el realizado en el LEM (con 2 viguetas) y el realizado por SENCICO (1 vigueta). Es recomendable ensayar 2 o más muestras para tener un resultado más confiable.

Los resultados obtenidos fueron del ensayo en el LEM fueron:

Vigueta N°1		Vigueta N°2	
Carga (kg)	Deform. (mm)	Carga (kg)	Deform. (mm)
0	0	0	0
100	0	100	0
200	0.02	200	0.01
300	0.04	300	0.02
400	0.06	400	0.03
500	0.08	500	0.04
650	0.25	600	0.06
580	35	650	0.25
		600	25

Tabla 7.6 Registro de datos del ensayo a tenacidad en el LEM.

Obteniendo así los siguientes índices residuales:

I5	= 5.0
I10	= 10.0
I20	= 20.0
R5,10	= 99.75
R10,20	= 99.45

La norma ASTM C1018 incluye un rango de valores dentro de los cuales se indica el rango recomendado para los valores obtenidos como índices de tenacidad, los cuales son:

I5 → < 1 ; 6 >
I10 → < 1 ; 12 >
I20 → < 1 ; 25 >

Según dichos rangos, los valores obtenidos se encuentran dentro de la recomendación de un comportamiento de un material elasto-plástico, y también dentro del rango de comportamiento de un concreto reforzado con fibra.

Sin embargo, debido a que sólo se está trabajando con un gráfico muy aproximado, éstos resultados no son de fiar. Por ello, al analizar los resultados de la prueba realizada por SENCICO sobre 1 vigueta, obtenemos lo siguiente:

I5 = 3.3
I10 = 4.5
I20 = 5.8
R5,10 = 24
R10,20 = 13

De esta manera, notamos que el gráfico obtenido en este caso muestra una gran diferencia en los índices que se obtienen, ya que la carga máxima alcanzada varía debido a la luz de las viguetas ensayadas (a mayor luz de vigueta, menor la carga que resistirá). Sin embargo, tampoco es confiable utilizar sólo una muestra ensayada como referencia confiable de ensayos. Por lo tanto, es recomendable el realizar estos ensayos sobre 2 o más muestras obtenidas de campo.

Las especificaciones técnicas de la obra de la C.H. Machu Picchu no contemplan valores algunos sobre la tenacidad que debe tener el shotcrete a utilizar, por lo tanto el ensayo sirvió como una referencia acerca de la tenacidad del shotcrete que se va a utilizar. Dicho ensayo se realizó, en este caso, sobre una viga vaciada en laboratorio, habiendo sido mejor el ensayo de una viga obtenida de un panel de shotcrete lanzado en campo.

Actualmente, se está optando por la realización de paneles de shotcrete, sobre los cuales se realizan ensayos de tenacidad para calcular la energía absorbida por el shotcrete y la fibra de refuerzo. Estos paneles pueden ser redondos o cuadrados, de acuerdo a la norma que se utilice (EFNARC o ASTM).

Cabe resaltar que según la EFNARC, el ensayo que ellos plantean para hallar la tenacidad del shotcrete es mediante el ensayo de un panel cuadrado, apoyado en sus lados con una carga aplicada en la porción central, mientras que el equivalente de la norma europea en la ASTM es la C1550, la cual detalla el procedimiento sobre un panel circular en lugar de cuadrada.

Ambos procedimientos de ensayo (según la EFNARC y la ASTM C1550) basan sus resultados en la energía absorbida por el panel en Joules (J). Basándose en los distintos tipos de roca y las diferentes metodologías de sostenimiento, es posible correlacionar cada tipo de roca con la cantidad de energía que requiere absorber el shotcrete y el tipo de sostenimiento obtenido; el cual fue mostrado en el cuadro 4.11 en el capítulo 4 sobre las adiciones para el shotcrete.

Generalmente, para el control manual de la carga se utiliza un cronómetro y un lector de deformaciones para poder cumplir con el requerimiento de la velocidad de carga. Por otro lado, los equipos automatizados facilitan el desarrollo del ensayo con la carga controlada a lo largo del tiempo que tome en alcanzar las condiciones finales indicadas por cada norma.

El problema con estas normas es que muchos de los laboratorios no están capacitados o no cuentan con la maquinaria adecuada para realizar estos tipos de ensayo.

7.2 Análisis de Resultados a Edades Tempranas

Éstos resultados reflejan la ganancia de resistencia temprana debido a la aceleración de la fragua que se obtienen mediante la incorporación del aditivo en estudio.

La resistencia que debe alcanzar el shotcrete a edades tempranas proviene de un estudio cuidadoso del macizo rocoso, determinando cuanto será la presión ejercida y en cuanto tiempo se desestabilizarán las presiones internas que deben ser compensadas por el shotcrete.

Los valores más importantes a edades tempranas son los valores a 8 horas y 1 día, el valor a 3 días nos sirve principalmente para controlar la ganancia de resistencia en el tiempo y el valor a los 7 días para la poder proyectar el valor de resistencia final a 28 días.

De los resultados de resistencia a compresión a las 8 horas, se obtiene el siguiente gráfico:

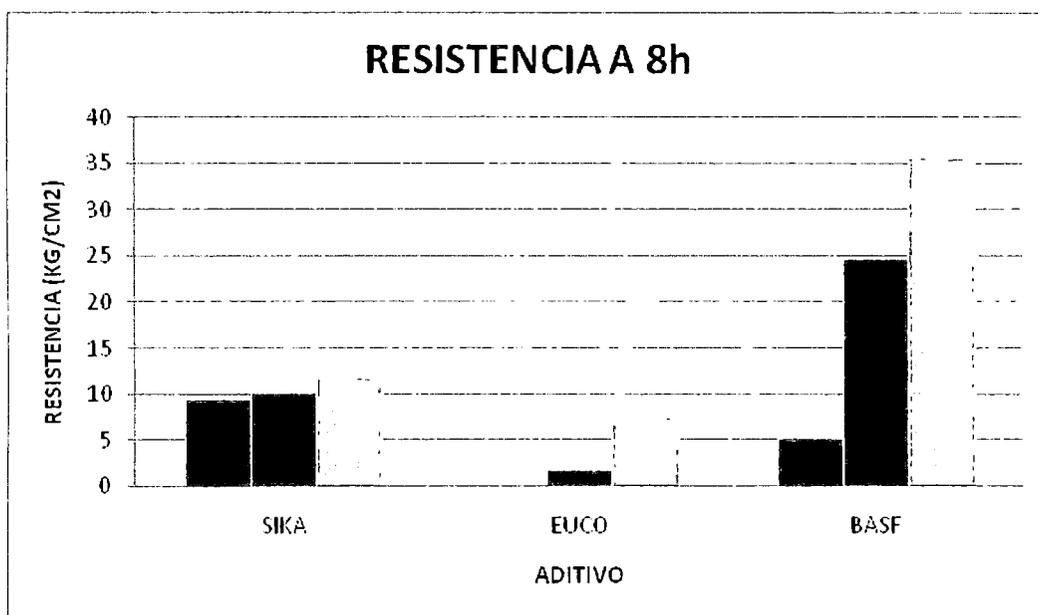


Fig.7.1 Resistencia a Compresión a las 8 horas (por cada aditivo, azul = mínima dosificación, rojo = dosificación media, verde = máxima dosificación)

Del gráfico, la primera impresión que notamos está relacionada a los resultados de los ensayos con el Sureshot AF de la marca EUUCO. La dosificación mínima del 2% no llegó a fraguar a tiempo para el ensayo, lo que significa que no se pudo ensayar debido a que la mezcla estaba aún un poco blanda. Además, los resultados con las demás dosificaciones no fueron tampoco muy favorables, ya que arrojaron los valores más bajos entre todos.

Para el caso del Sigunit L-50 AF de la marca de SIKA a 8 horas, los valores entre las dosificaciones no varían mucho, sin embargo, estos valores también son relativamente bajos, variando entre 0.8 y 1.5 MPa (8 y 15 kg/cm² aproximadamente como se aprecia en el grafico anterior).

Para la resistencia temprana, observamos que los resultados del producto Meyco SA160 de BASF, la dosificación más baja (3%) arrojó un valor bastante bajo, mientras que las otras 2 dosificaciones ofrecieron valores relativamente altos para la resistencia a las 8 horas, siendo el máximo valor obtenido de 36 kg/cm².

Para el resultado al ensayo de resistencia a 1 día se obtuvo el siguiente gráfico:

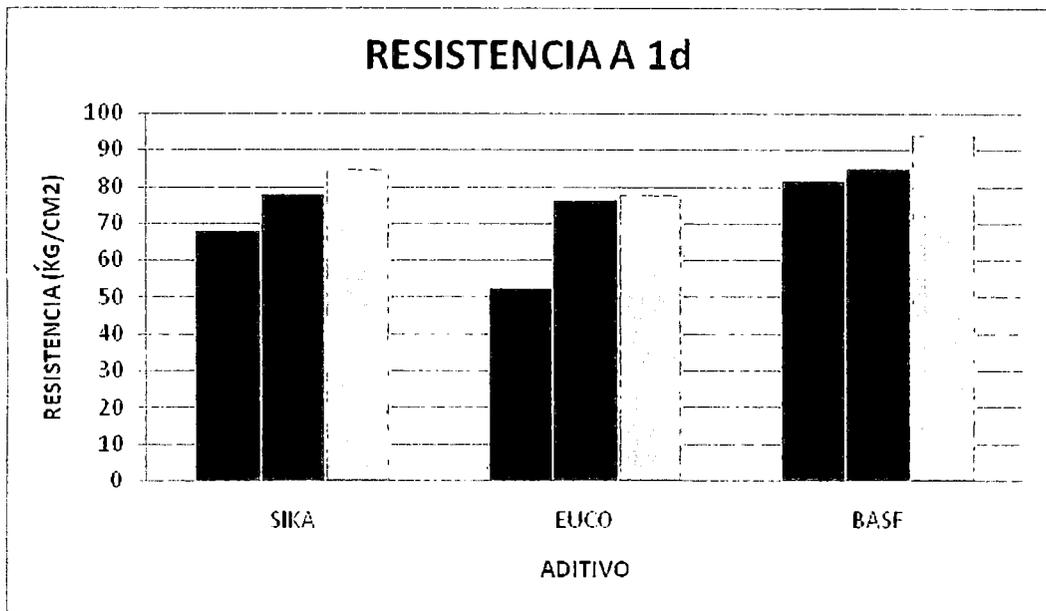


Fig.7.2 Resistencia a Compresión a 1 día (por cada aditivo, azul = mínima dosificación, rojo = dosificación media, verde = máxima dosificación)

Para observar mejor acerca de la ganancia de resistencia temprana, podemos elaborar un cuadro mostrando el desarrollo de resistencia entre las primeras 8 horas y el primer día luego de vaceado, obteniendo la siguiente gráfica:

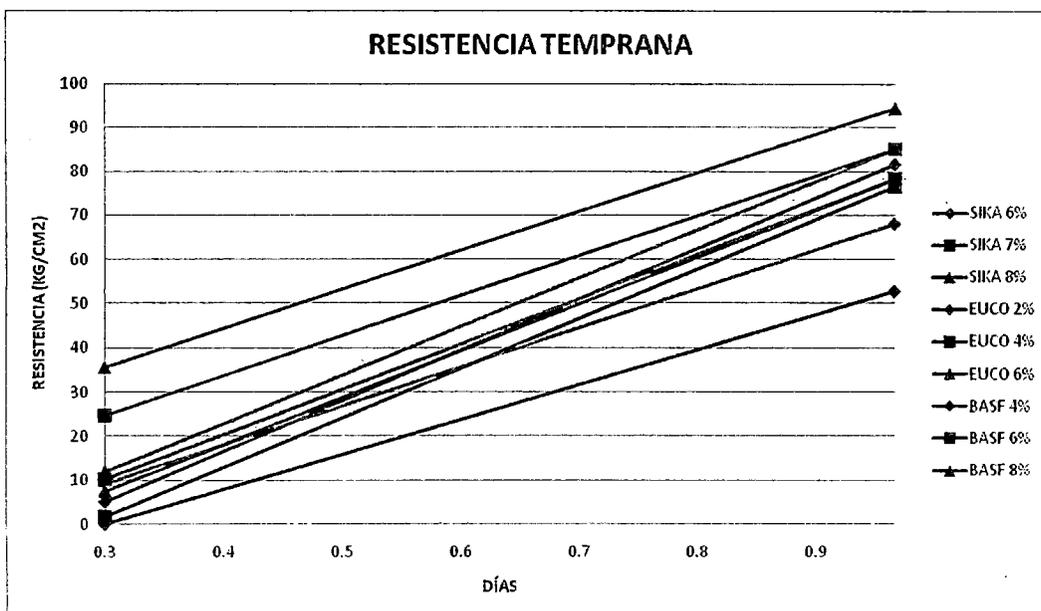


Fig. 7.3 Acercamiento al inicio de la curva de ganancia de resistencia (inicial)

Si se graficase toda la curva (desde el vaciado hasta la resistencia final obtenida a los 28 días) no se podría contar con un panorama claro del desarrollo de la resistencia temprana, es por ello que es necesario el analizar el inicio de la ganancia de resistencia de una manera más minuciosa.

Apreciamos así que el aditivo Meyco SA160 de BASF tiene una mejor performance en la ganancia de resistencia temprana (líneas de color azul).

Mientras, la performance del producto Sigunit L-50 AF de SIKKA es un valor promedio, ya que se encuentra en la zona central de la gráfica (líneas de color rojo).

Finalmente, el producto EUCO Sureshot AF produce los valores de resistencia inicial más bajos (líneas de color verde).

En un análisis más minucioso, se puede decir que para los resultados a 1 día, se puede observar que, siguiendo los resultados obtenidos a las 8 horas, la diferencia entre valores de resistencia se mantiene:

- Los valores obtenidos con las dosificaciones el Sureshot AF de EUCO siguen siendo los más bajos entre los 3 a las 8 horas. Sin embargo, la ganancia de resistencia a 1 día de las dosificaciones de 4% y 6% es muy similar a los valores obtenidos por las muestras con Sigunit L-50 AF de SIKA.
- Los valores obtenidos con el Sigunit L-50 AF de SIKA siguen una misma tendencia de ganancia entre las 8 y 24 horas de vaciado.
- Los resultados obtenidos con las dosificaciones del aditivo de BASF (Meyco SA160), siguen siendo los más altos, llegando hasta un valor de 111 kg/cm² al dosificarlo al 10% del aditivo. (Aproximadamente un poco más del 30% de la resistencia final a alcanzar).

La gráfica de la resistencia a los 3 días de vaciado se muestra a continuación:

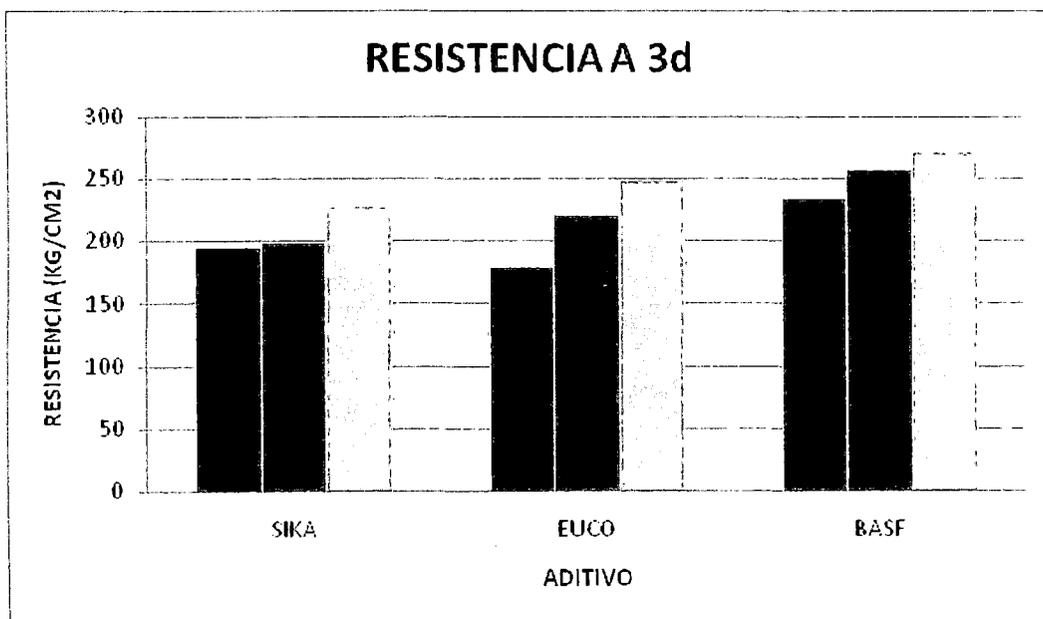


Fig.7.4 Resistencia a Compresión a los 3 días (por cada aditivo, azul = mínima dosificación, rojo = dosificación media, verde = máxima dosificación)

Revisando los valores de los resultados obtenidos a los 3 días de vaciado, encontramos que los valores para el Sureshot AF de EUCO aumentaron de manera significativa, alcanzando y sobrepasando los valores obtenidos con el Sigunit L-50 AF de SIKA; mientras que los valores obtenidos con el producto de

BASF, el Meyco SA160, sigue desarrollando buenos valores de resistencia a compresión.

7.3 Análisis de Resultados a Edades Finales

Los valores para la resistencia final a compresión más importantes y significativos son a los 7 días y a los 28 días. Como se mencionó en capítulos anteriores, este shotcrete fue diseñado para alcanzar una resistencia a los 7 días de 25 MPa y a los 28 días de 35 MPa.

Para los resultados a los 7 días, obtenemos el siguiente gráfico:

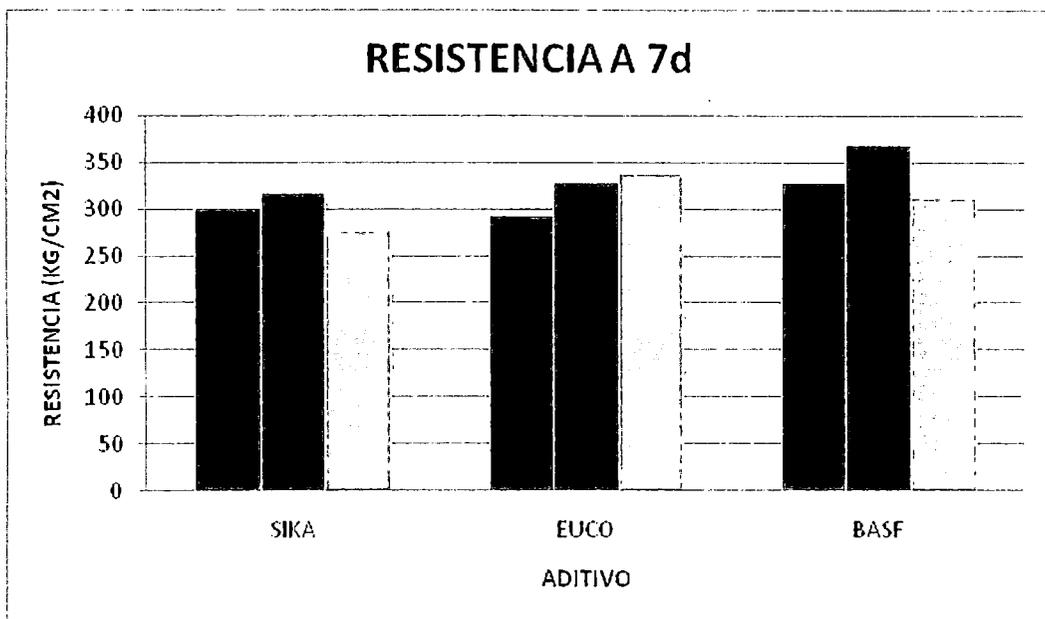


Fig.7.5 Resistencia a Compresión a los 7 días (por cada aditivo, azul = mínima dosificación, rojo = dosificación media, verde = máxima dosificación)

Se puede notas que para los 7 días, el valor de resistencia desarrollado en las muestras en las que se aplicó el aditivo Sureshot AF de la marca EUCO, sobrepasaron los valores desarrollados por las muestras con el aditivo Sigunit L-50 AF, el cual empezó a truncar la resistencia a los 7 días para la dosificación al 8%.

De la misma manera, el aditivo Meyco SA160 de la firma de BASF desarrolló valores de resistencia mayores a los 7 días, pero notamos que al igual que el

aditivo de SIKA, el valor obtenido con la dosificación de 10% desarrolló una resistencia menor en comparación con las dosificaciones menores.

Como podemos notar, todas las muestras logran desarrollar una resistencia mayor a los 25 MPa requeridos por las especificaciones técnicas. Sin embargo, se debe prestar atención a los valores que han empezado a alcanzar el tope de su resistencia, como son ambos casos mencionados anteriormente.

Para los resultados a 28 días, obtenemos los datos expresados en el gráfico siguiente:

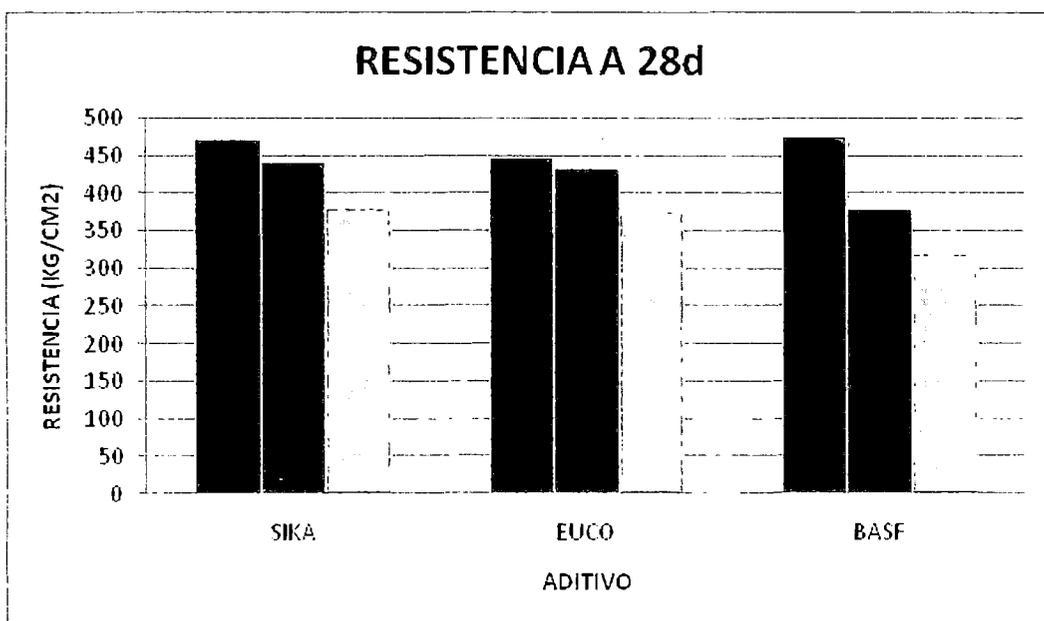


Fig.7.6 Resistencia a Compresión a los 28 días (por cada aditivo, azul = mínima dosificación, rojo = dosificación media, verde = máxima dosificación)

Como claramente lo expone la gráfica, la resistencia alcanzada por las dosificaciones mayores fue menor que las dosificaciones menores. Todos los aditivos acelerantes generan una pérdida de resistencia final en el concreto, y los acelerantes para shotcrete libres de álcali no son la excepción.

Para los productos tanto de SIKA como de EUCO, los valores de dosificaciones mayores no tuvieron un efecto tan notorio como para el caso de la dosificación mayor (al 8%) del aditivo de BASF, el cual en este caso no logró alcanzar el valor requerido por las especificaciones técnicas de 350 Kg/cm².

Esta dosificación fue la única que no logró alcanzar el valor de resistencia requerido, mientras que las demás dosificaciones si bien sufrieron la pérdida de resistencia final, no tuvieron mayor problema con el valor requerido.

Para poder visualizar mejor el desarrollo de la resistencia, podemos revisar los siguientes gráficos para cada marca:

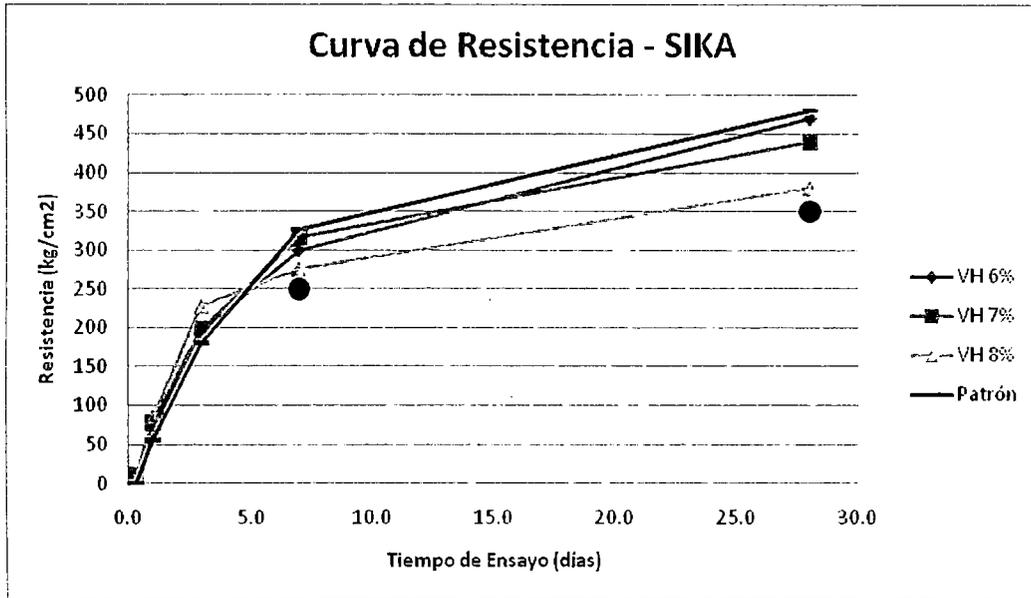


Fig. 7.7 Resultados de los ensayos a compresión del Sigunit L-50 AF

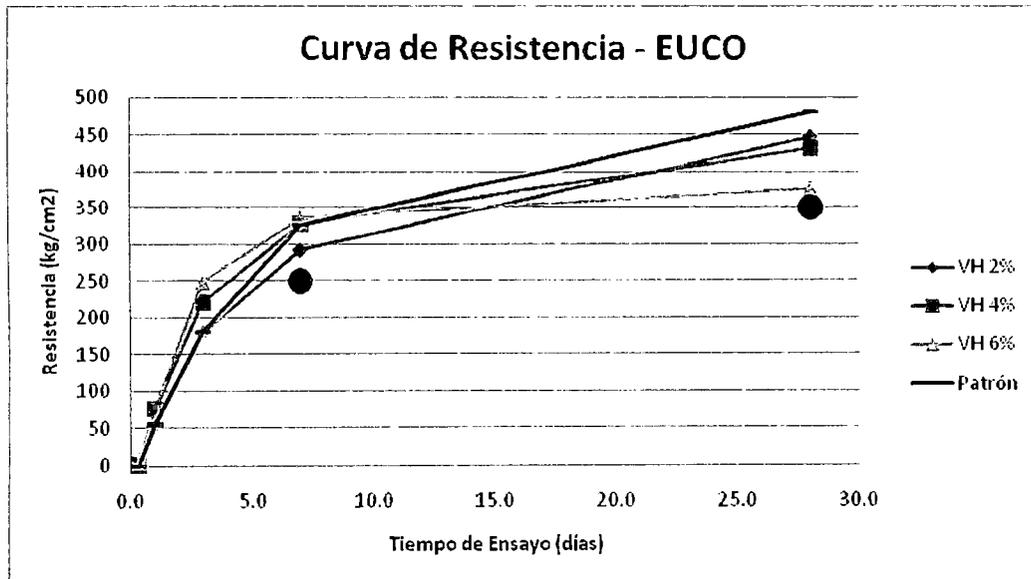


Fig. 7.8 Resultados de los ensayos a compresión del Sureshot AF

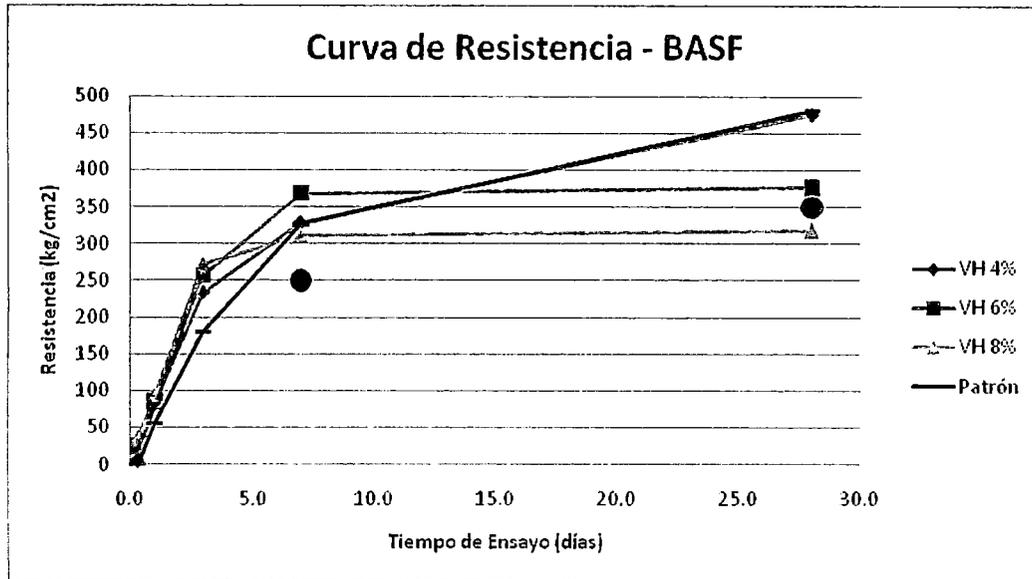


Fig. 7.9 Resultados de los ensayos a compresión del Meyco SA160

Los círculos negros marcan la resistencia mencionada en las especificaciones técnicas (250 kg/cm² para los 7 días y 350 kg/cm² para los 28 días). Mientras que la línea negra representa la ganancia de resistencia del shotcrete patrón.

En estos gráficos es más apreciable la pérdida de resistencia final que se produce en cada dosificación del aditivo. Con la ayuda de éstos gráficos es más fácil tanto visualizar como analizar el porcentaje de resistencia final perdida debido a la inclusión de los aditivos acelerantes.

En primer lugar, basándonos en el siguiente gráfico comparando los valores de resistencia alcanzados a los 28 días, se ha elaborado la tabla 7.5 comparando los valores obtenidos con la mezcla patrón y las probetas con aditivos acelerantes de fragua para shotcrete:

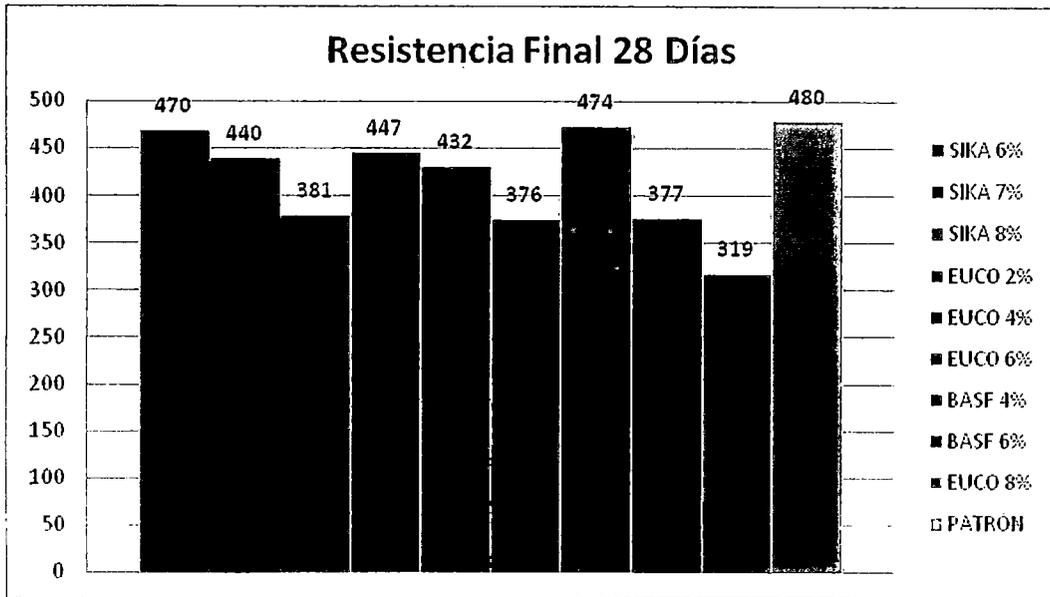


Fig. 7.10 Resultados obtenidos de resistencia al os 28 días comparados con el patrón

Del cual se obtiene la tabla comparativa siguiente:

		28d	Patrón	% Obtenido	% Pérdida
SIKA	6%	470	480	98%	2%
	7%	440	480	92%	8%
	8%	381	480	79%	21%
EUCO	2%	447	480	93%	7%
	4%	432	480	90%	10%
	6%	376	480	78%	22%
BASF	4%	474	480	99%	1%
	6%	377	480	79%	21%
	8%	319	480	66%	34%

Tabla. 7.7 Relaciones de resistencia a la compresión de 3 y 7 días hacia los 28 días

Observamos que para las dosificaciones bajas, la pérdida de resistencia final llega a ser hasta de un 10%, límite más o menos considerables dentro de lo esperado para los aditivos libres de álcali (de los cuales se dicen que la pérdida de resistencia generalmente es de 5%). Sin embargo, es notable que para las dosificaciones más altas éste valor de pérdida se incrementa, causando para el

caso de la dosificación máxima de BASF el no cumplir con el requerimiento a los 28 días de 350 kg/cm².

A pesar de ser aditivos libres de álcali, la resistencia final se puede ver muy afectada al utilizar una cantidad muy grande de aditivo, como podemos apreciar con estos resultados.

Además de la pérdida de resistencia con respecto al patrón, es posible cuantificar la relación que hay entre la resistencia a los 28 días y a 1, 3 y 7 días de las probetas preparadas con el aditivo en estudio, obteniendo los siguientes resultados:

RELACIÓN RESISTENCIAS A 1, 3 Y 7 DÍAS CON RESPECTO A 28 DÍAS								
		1d	3d	7d	28d	1/28	3/28	7/28
SILKA	6%	68	196	300	470	0.14	0.42	0.64
	7%	78	199	316	440	0.18	0.45	0.72
	8%	85	228	276	381			
EUCO	2%	53	179	292	447	0.12	0.40	0.65
	4%	77	221	328	432	0.18	0.51	0.76
	6%	78	248	337	376			
BASF	4%	82	234	328	474	0.17	0.49	0.69
	6%	85	257	369	377			
	8%	94	272	312	319			

Tabla. 7.8 Relaciones de resistencia a la compresión de 1, 3 y 7 días hacia los 28 días

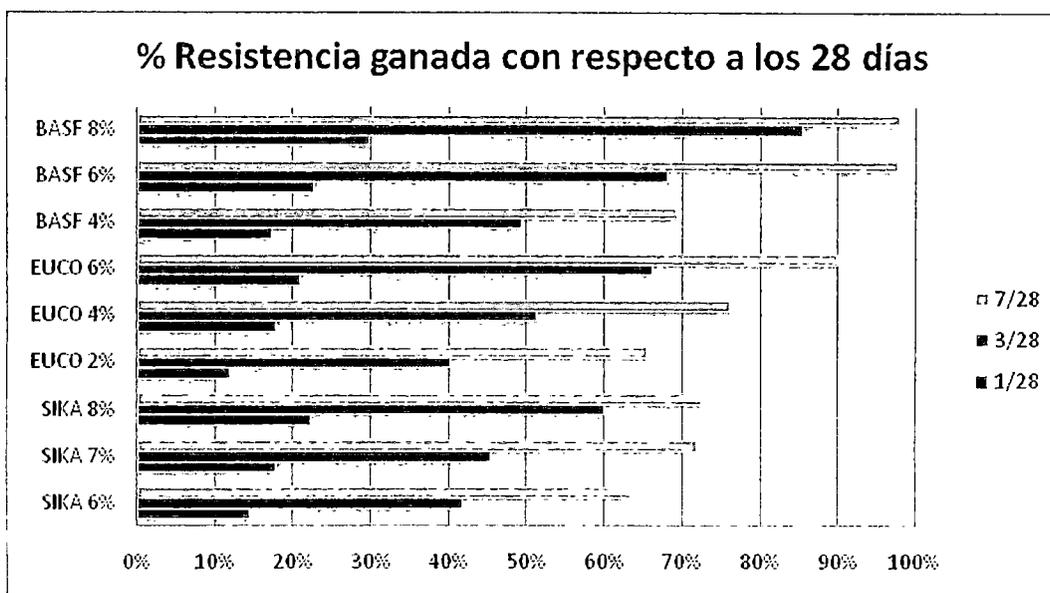


Fig. 7.11 Porcentaje de resistencia ganada con respecto a la alcanzada a los 28 días

Observamos que, para los resultados más favorables (los que cuentan con menor disminución de la resistencia final, principalmente las dosificaciones menores), la relación de resistencia de 7 días a 28 días está entre 0.65 y 0.75, mientras que para el caso de la relación de resistencia de 3 días a 28 días los resultados se encuentran entre 0.40 y 0.50.

Para los valores que sufrieron una gran pérdida de resistencia final, observamos que la relación de resistencias a los 7 días con respecto a los 28 días es mayor a 0.75, los mismos que presentan una relación de resistencias de 3 días con respecto de 28 superiores a 0.60.

Sin embargo, para poder tener una idea más clara de cuál sería la proyección de la resistencia a la compresión a los 28 días, podemos hallar la relación entre la resistencia a los 3 días y la resistencia a los 7 días, obteniendo la siguiente tabla:

RELACION RESISTENCIAS			
		1/7	3/7
SIKA	6%	0.23	0.65
	7%	0.25	0.63
	8%	0.31	0.83
EUCO	2%	0.18	0.61
	4%	0.23	0.67
	6%	0.23	0.74
BASF	4%	0.25	0.70
	6%	0.23	0.70
	8%	0.30	0.88

Tabla. 7.9 Relaciones de resistencia a la compresión de 1 y 3 días hacia los 7 días

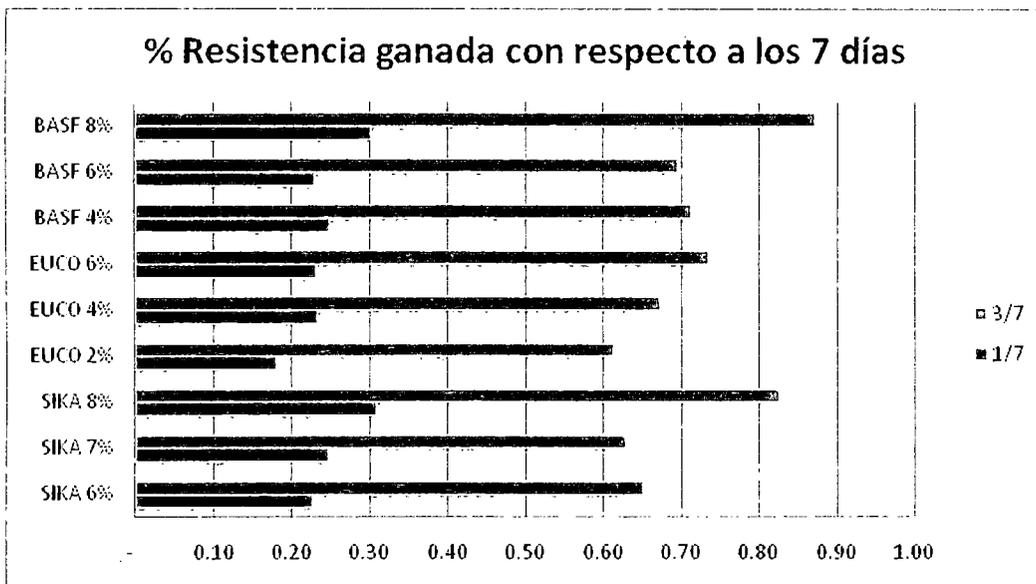


Fig. 7.12 Porcentaje de resistencia ganada con respecto a la alcanzada a los 28 días

Podemos notar que los valores los cuales en la tabla 7.5 presentaban valores entre 0.65 y 0.70, siguen presentando valores similares al relacionar las resistencias alcanzadas a los 3 y a los 7 días.

Algo parecido ocurre con el resto de los valores: en la tabla 7.5, los valores de relación de 7 días con respecto de 28 días mayores a 0.75 (con la única excepción de la dosificación al 8% del producto de SIKA), siguen presentando valores altos, para este caso también valores que superan el 0.75.

Finalmente, también podemos analizar el desarrollo de la ganancia de resistencia del shotcrete. Para ello, se toma los valores más representativos, los cuales son a los 28 días, 7 días y por resistencia temprana, a 8 horas.

Para terminar, basándonos en el precio y la presentación de cada producto, los cuales son los siguientes:

MARCA	PRODUCTO	PRESENTACIÓN	PRECIO
SIKA	Sigunit L-50 AF	Barril de 250 Kg.	S/. 570.00
EUCO	Sureshot AF	Barril de 300 Kg.	S/. 990.00
BASF	Meyco SA160	Barril de 400 Kg.	S/. 977.00

Tabla. 7.10 Relación de precios y presentaciones de los aditivos estudiados

Basándonos en las dosificaciones de mejor performance para dichos aditivos, los cuales son:

- SIKA Sigunit L-50 AF: 7%.
- EUCO Sureshot AF: 4%.
- BASF Meyco SA160: 6%.

MARCA	CANTIDAD	COSTO	DOSIF.	DOSIF./M3	M3/BARR.	\$/M3
SIKA	250 Kg.	S/. 570	7%	28 Kg.	8.929 M3	63.84
EUCO	300 Kg.	S/. 990	4%	16 Kg.	18.750 M3	52.80
BASF	300 Kg.	S/. 977	6%	24 Kg.	12.500 M3	78.16

Tabla. 7.11 Rendimiento de los aditivos acelerantes de fragua libres de álcali

Como se puede notar en la tabla 7.9, el aditivo de mayor rendimiento es el producto de EUCO, el Sureshot AF, seguido del Meyco SA160 de la marca BASF y finalmente el Sigunit L-50 AF. El rendimiento está principalmente afectado por la dosificación del aditivo utilizado en la mezcla.

Se está utilizando la dosificación media para cada caso. Para esta comparación, el aditivo de EUCO es el que presenta mejores valores en rendimiento y costo por metro cúbico.

De utilizar los valores mínimos de dosificación, obtendríamos, para el caso de EUCO, un resultado desfavorable para el sentido de la performance del aditivo, debido a que la dosificación mínima recomendada no tiene un buen comportamiento, al no tener un desarrollo temprano de resistencia adecuada (para este caso no se pudo ensayar a las 8 horas debido a que el concreto aún no pudo desmoldarse).

Al centrarse en el tema de las dosificaciones, observamos que la dosificación de 6% de SIKA tiene una mejor performance que la dosificación de EUCO al 4%. Y a su vez, el aditivo de BASF al 6% tiene una mucho mejor performance a resistencia temprana, a pesar de la gran pérdida de resistencia final.

De esta manera, podemos comparar las dosificaciones que tienen una mejor performance en lugar de comparar los valores intermedios de dosificación.

MARCA	CANTIDAD	COSTO	DOSIF.	DOSIF./M3	M3/BARR.	\$/M3
SIKA	250 Kg.	S/. 570	6%	24 Kg.	10.417 M3	54.72
EUCO	300 Kg.	S/. 990	4%	16 Kg.	18.75 M3	52.80
BASF	300 Kg.	S/. 977	4%	16 Kg.	18.75 M3	52.11

Tabla 7.12 Rendimiento de los aditivos acelerantes de fragua libres de álcali a la mejor dosificación

De esta manera es posible notar que el aditivo de BASF, al ser dosificado al 4% no sólo tiene una mejor performance que el aditivo de EUCO, sino que además es posible generar un posible ahorro debido al costo del material. Por su parte, el aditivo de SIKA es aquel de mejor performance a estas dosificaciones, pero el rendimiento es aproximadamente de la mitad y cuesta un poco más.

CONCLUSIONES

- El shotcrete, al ser un concreto especial de rápido fraguado utilizado principalmente para labores de soporte y revestimiento de taludes y túneles, requiere entre sus componentes un tipo de cemento de rápido fraguado y acelerante de fragua para shotcrete que ayude con la ganancia de resistencia muy temprana a la compresión. Por esta razón es que se utiliza cemento Portland Tipo I y diversos acelerantes de fragua.
- Debido a la rápida fragua proporcionada por los acelerantes utilizados en el shotcrete, se cambió el tipo de probeta de las cilíndricas convencionales de (5" x 10") a cubos de 2" de lado. Este cambio sirvió también para solucionar el problema de la mala mezcla de los acelerantes dentro del trompo.
- En este estudio se relaciona la rápida ganancia de resistencia a la compresión con el tiempo de fragua del shotcrete. Es así que el análisis de resultados se basa principalmente en la comparación de los valores de resistencia obtenidos a las diferentes edades de ensayo.
- Como es posible observar al comparar referencias de ensayos pasados con el actual estudio, cada diseño de mezcla es único y debe ser tratado como tal. El tipo de cemento, las condiciones de aplicación, el equipo de lanzado, el operario de la maquinaria son, entre otros, los factores más influyentes en la colocación del shotcrete.
- Para lograr una óptima comparación de aditivos, todos los ensayos deben realizarse con el mayor control de calidad posible de los materiales, los equipos y los procedimientos. Esto puede ser ampliado finalmente para la comparación de cualquier otro tipo de material, ya sea analizado mediante normativa internacional o por la performance de dicho material a comparar.

- El tipo de mezcla por vía seca debió descartarse debido a la poca trabajabilidad que se obtuvo al realizar una mezcla sin el uso de superplastificante. Ocurrió lo contrario con la mezcla por vía húmeda, donde el aditivo superplastificante también actúa como un estabilizador y provee un mayor tiempo para la manipulación de la mezcla.
- Del diseño final utilizado para la mezcla vía húmeda: 400kg de cemento, 175 lts de agua, 1 642kg de agregado, 30kg de micro sílice y 7.66kg de superplastificante, se varió el tipo y la dosificación de los acelerantes. Al llevar dicha mezcla a las condiciones reales en campo, se deberán tratar los temas de temperatura y humedad en Cuzco, los cuales son muy diferentes a las condiciones obtenidas en el laboratorio en Lima.
- De los valores de resistencia temprana obtenidas, es posible notar una ganancia lenta de resistencia para el aditivo de la marca EUCO (Sureshot AF), mientras que las marcas SIKA y BASF (Sigunit L-50 AF y Meyco SA160) cumplen con una ganancia aceptable de resistencia inicial.
- Para los valores de resistencia final, se observa que en su mayoría la pérdida de resistencia no pasa del 10% en comparación del concreto patrón. Para los casos donde este porcentaje es mayor, se concluye que el aditivo ha sido sobre dosificado y se traduce en una pérdida desmedida y considerable de la resistencia final.
- Con los índices calculados de los valores de resistencia temprana, es posible calcular una proyección a los 28 días que indique si el aditivo no ha sido sobre dosificado, lo cual se traduciría en una pérdida considerable de resistencia final. El valor adecuado para poder realizar esta proyección se obtuvo comparando la resistencia a los 3 y a los 7 días, para lo cual el porcentaje obtenido debería estar entre los valores de 60% y 70%.

- Comparando los valores obtenidos sobre las probetas moldeadas en laboratorio y las muestras tomadas directamente en campo, es notable la diferencia que existe entre los procedimientos de obtención. La colocación del shotcrete con la máquina de proyección neumática genera una compactación de la mezcla al impactarla a gran velocidad sobre la superficie de trabajo.
- Pasando al tema de costos, a pesar de que las presentaciones de las 3 marcas utilizadas son diferentes, es posible utilizar ratios de rendimiento (en este caso, m³ de shotcrete por barril de aditivo) para poder medir la eficiencia de cada marca. Cada rendimiento está además condicionado a la dosificación utilizada para el diseño del shotcrete.

RECOMENDACIONES

- A pesar de que se hayan realizado los ensayos en laboratorio, es mandatorio el realizar los ensayos en el campo, a condiciones reales y con el equipo de lanzado de shotcrete; ya que el moldeado en el laboratorio es solamente un aproximado de lo que se puede alcanzar mediante la proyección neumática, especialmente para el método de proyección vía seca debido a que el rápido tiempo de fragua evito un buen moldeado de probetas.
- Al ampliar la cantidad de probetas y seguir variando un poco más la dosificación es posible confirmar o en todo caso rectificar los valores obtenidos mediante los ensayos de esta investigación.
- Es posible ampliar la investigación y no solamente analizar la performance del producto en sí, si no que al tener en cuenta aspectos más amplios, como por ejemplo la calidad de la atención, los servicios de transporte o de venta y post venta, se puede generar un modelo de comparación más amplio que genere un mejor conocimiento de los proveedores y sus productos al momento de realizar la logística de las obras.
- Al utilizar los moldes cúbicos, mucho más pequeños y fáciles de mezclar y moldear, es posible generar una tanda más cercana a lo obtenido en campo al utilizar el equipo real de lanzado (con la diferencia de la energía aplicada de compactación entre el brazo humano y la máquina de lanzado). Por este motivo y debido a que generalmente el shotcrete va diseño para resistencias de 35 MPa, es recomendable utilizar moldes cúbicos antes de cilíndricos.
- La comparación se realizó utilizando la misma marca de aditivo súper plastificante, lo cual puede ser mejorado al utilizar cada aditivo acelerante de fragua con el súper plastificante de la misma marca, sin embargo, esto se traduce en que en el comparativo de costos se analice una variable más, ligada a las marcas previamente ensayadas.

- Debido a que el moldeo de las probetas en laboratorio requiere de la fuerza humana para la compactación de las probetas cúbicas, es recomendable de que todas las probetas sean preparadas por la misma persona o técnico para evitar variaciones debido a la fuerza de la persona encargada.
- Al realizar los ensayos de laboratorio, de lo posible se debe de tratar de simular no solo la metodología de aplicación, sino que también ayudará si es posible simular las condiciones ambientales a la cual será aplicado el shotcrete.
- Los ensayos de tenacidad deberían realizarse según la norma vigente, utilizando ya sea los paneles cuadrados (como lo especifica la EFNARC) o los circulares (como lo especifica la ASTM). Además, la realización de dichos ensayos con equipos automatizados mejora la precisión de los resultados de manera considerable, además de facilitar el procedimiento del ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS – ASTM

STANDARD TEST METHOD FOR SLUMP OF HYDRAULIC-CEMENT
CONCRETE

ASTM C-143 1998

STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF
HYDRAULIC CEMENT MORTARS (USING 2-IN. OR [50-MM] CUBE
SPECIMENS)

ASTM C-109 2008

STANDARD PRACTICE FOR PREPARING AND TESTING SPECIMENS FROM
SHOTCRETE TEST PANELS

ASTM C-1140 1998

STANDARD SPECIFICATION FOR ADMIXTURES FOR SHOTCRETE

ASTM C-1141 2008

STANDARD SPECIFICATION FOR CHEMICAL ADMIXTURES FOR
CONCRETE

ASTM C-494 2008

USE OF SILICA FUME AS A MINERAL ADMIXTURE IN HYDRAULIC -
CEMENT CONCRETE, MORTAR, AND GROUT

ASTM C-1240 2000

STANDARD DESCRIPTIVE NOMENCLATURE FOR CONSTITUENTS OF
CONCRETE AGGREGATES

ASTM C-294 1998

STANDARD SPECIFICATION FOR CONCRETE AGGREGATES

ASTM C-33 1999

STANDARD TERMINOLOGY RELATING TO CONCRETE AND CONCRETE
AGGREGATES

ASTM C-125 2000

DEL VISO, J. R. / CARMONA, J. R. / RUIZ, G.

INFLUENCIA DE LA FORMA Y DEL TAMAÑO DE LA PROBETA EN LA
RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos – Universidad de Castilla

Ciudad Real – España 2007

ESPINOZA, N.

EXCAVACION Y SOSTENIMIENTO DE TÚNELES DE ROCA

Concytec

Lima – Perú 1994

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO POR DESEMPEÑO DE
CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS

Pontificia Universidad Católica del Perú – PUCP

Lima – Perú

EUROPEAN SPECIFICATION FOR SPRAYED CONCRETE

FORWARD, P.

SHOTCRETE DESIGN GUIDELINES

Roads and Traffic Authority – New South Wales Government. (RTA – NSW)

Gales 2005

HUAMBACHANO, J. C. – INFORME DE COMPETENCIA PROFESIONAL
PARA OPORTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

REVESTIMIENTO DE UN TRAMO DE TÚNEL CON CONCRETO LANZADO

Biblioteca FIC – UNI

LIMA PERÚ – 2009

HOEK, E.

SHOTCRETE SUPPORT

www.rocscience.com/hoek/pdf/16_Shotcrete_support.pdf

Toronto – Canada 2006

HÖFLER, J. / SCHLUMPF, J.

CONCRETO PROYECTADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES –
Introducción a la Tecnología Básica de Concreto Proyectado

Colombia 2004

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES

HISTORIA DEL CEMENTO

http://www.ieca.es/reportaje.asp?id_rep=5

Madrid – España

JOHANSEN, V. / KLEMM, W. / TAYLOR, P.

¿POR QUÉ LA QUÍMICA INTERESA EN EL HORMIGÓN?

ICPA Instituto del Cemento Portland Argentino – adaptación del artículo
publicado por el ACI Concrete Internacional en el 2002

Argentina 2009

KOSMATKA, S. / KERKHOFF, B. / PANARESE, W.

DESIGN AND CONTROL OF CONCRETE MIXTURES

PCA – 14th Edition

2002

MELBYE, T. / GARSHOL, K. F.

SHOTCRETE PARA SOPORTE DE ROCAS

Departamento de Construcciones Subterráneas, MBT Internacional Underground

Zurich – Suiza 2000

QUIMINET.COM

MICRO SÍLICE: PRODUCCIÓN Y USO

http://www.quiminet.com/ar4/ar_%2586%251D%25FF%25D3%25C0W%2597%2524.htm

Argentina 2005

RUIZ, J.

COMPONENTES Y PROCESOS QUÍMICOS DEL CEMENTO

I.E.S. Américo Castro

Granada – España 2009

TACILLA, E. / ARAUJO, F. / CARDOZO, V.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA – FACULTAD DE INGENIERÍA
CIVIL

Cajamarca – Perú 2004

TORRES ALAYO, JUAN CARLOS – TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE ADITIVOS ACELERANTES SOBRE LAS
PROPIEDADES DEL CONCRETO

Biblioteca FIC – UNI

Lima – Perú 2004

VINATEA, L.

SHOTCRETE EN MINERÍA

Conferencia: El Shotcrete y la Prevención de caída de rocas

Lima – Perú 2006

ANEXOS



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO N° 1 ENSAYO DE MATERIALES

MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA

CONSTANCIA

LA JEFA DEL LABORATORIO N°1 ENSAYO DE MATERIALES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, deja constancia que:

El **Bach. CESAR ALBERTO TENGAN SHIMABUKURO**, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, ha realizado los siguientes ensayos para la realización de su Tesis: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE ADITIVOS ACELERANTES DE FRAGUA LIBRES DE ALCALIS PARA CONCRETO PROYECTADO O SHOTCRETE”**.

A continuación se detalla los ensayos realizados:

- Determinación de las Propiedades Físicas de los Agregados.
- Diseños de mezcla con aditivos.
- Ensayos de compresión cúbicas.
- Ensayos de tenacidad sobre vigas.

Los ensayos fueron realizados durante el periodo de Julio de 2009 hasta Julio de 2010.

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado, para los fines que crea conveniente.

Lima, 27 de Mayo de 2011


.....
S. ING. ANA TORRE CARRILLO
Jefe


ANEXO B: PROBETAS DE ENSAYO – APLICACIÓN POR VÍA HÚMEDA

B.1. Aditivo: SIKA Sigunit L-50 AF

Dosificación: 6%

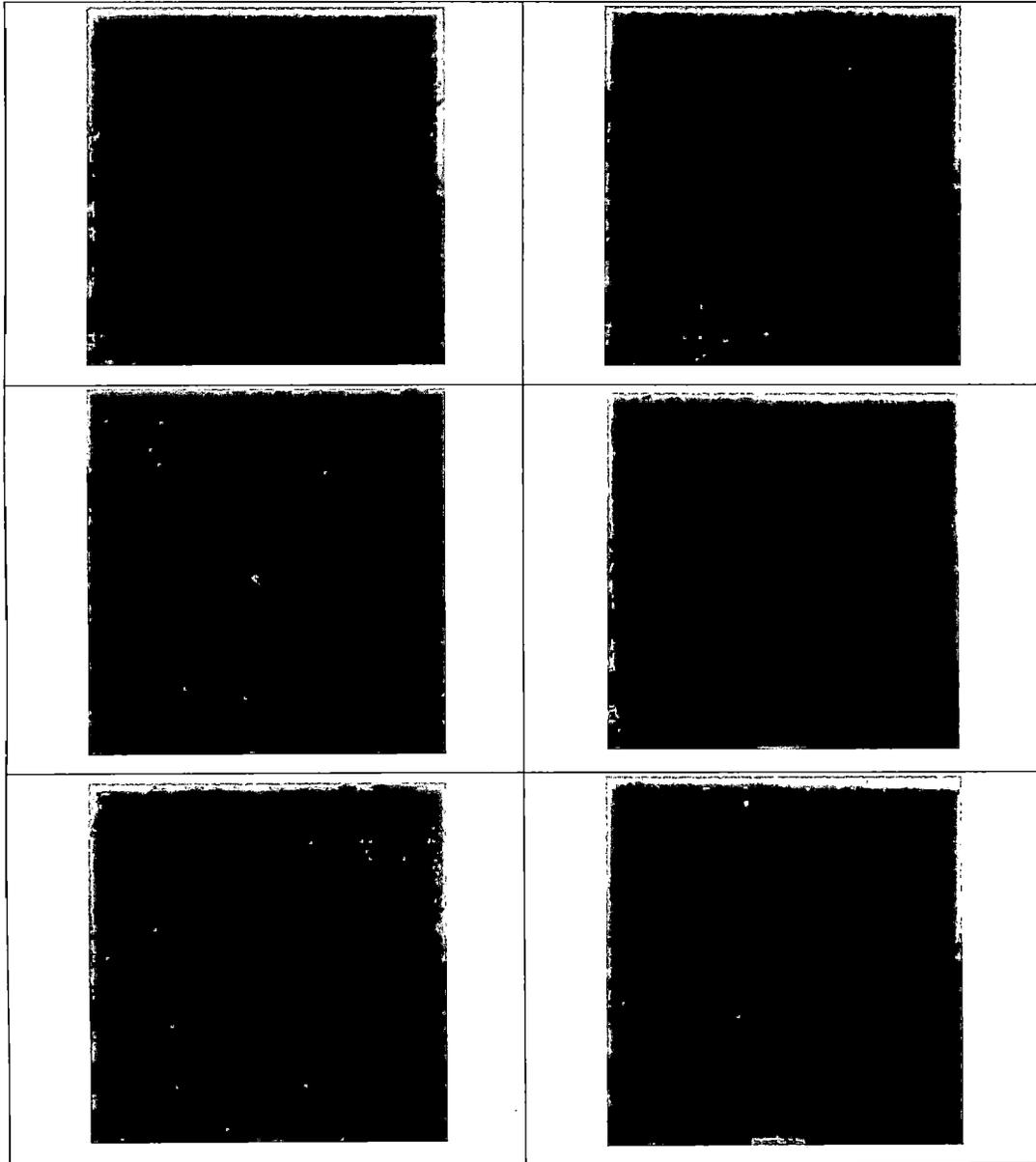


Tabla B.1. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sigunit L-50AF de SIKA, dosificado al 6%

B.2. Aditivo: SIKA Sigunit L-50 AF

Dosificación: 7%

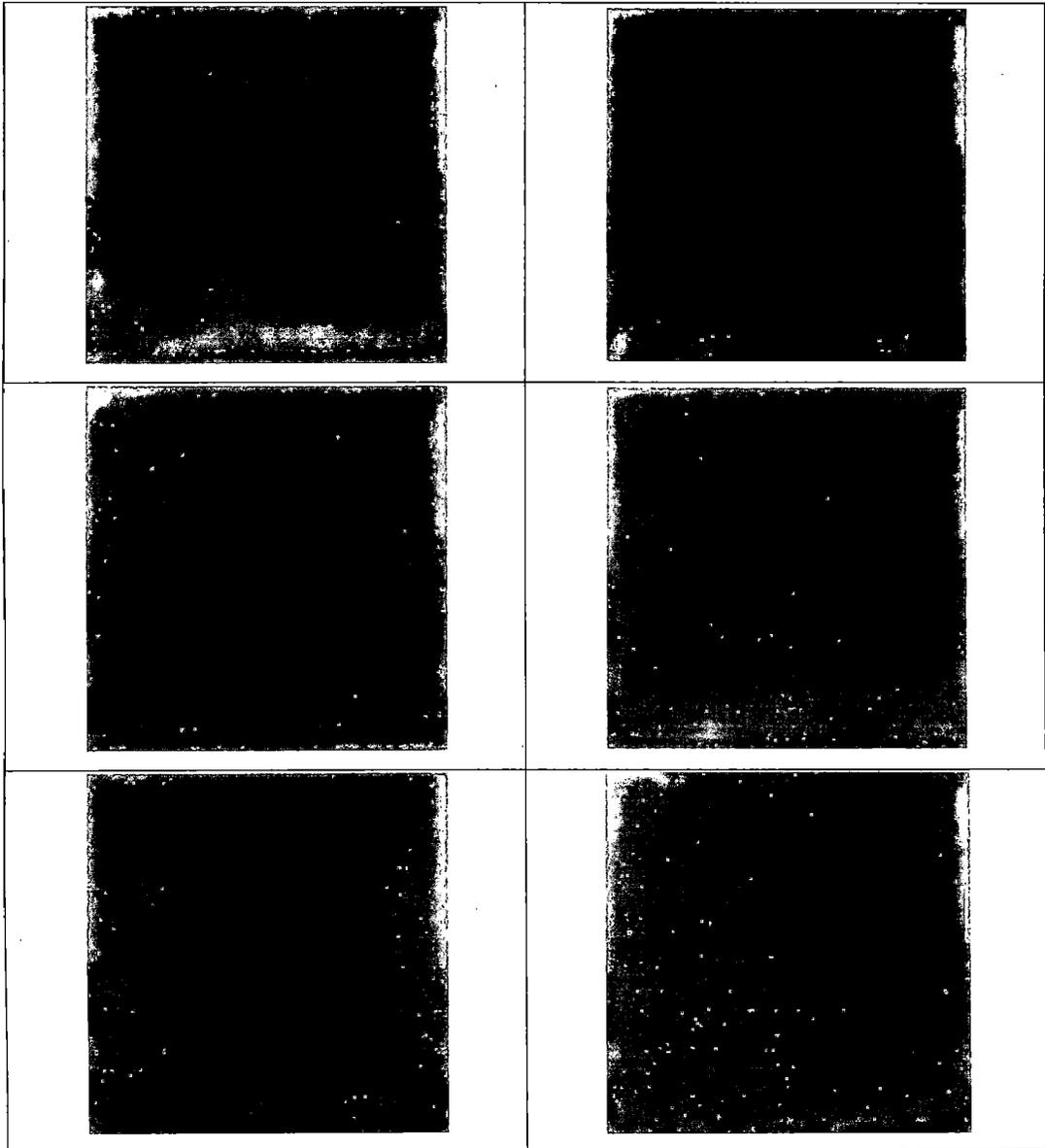


Tabla B.2. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sigunit L-50AF de SIKA, dosificado al 7%

B.3. Aditivo: SIKA Sigunit L-50 AF

Dosificación: 8%

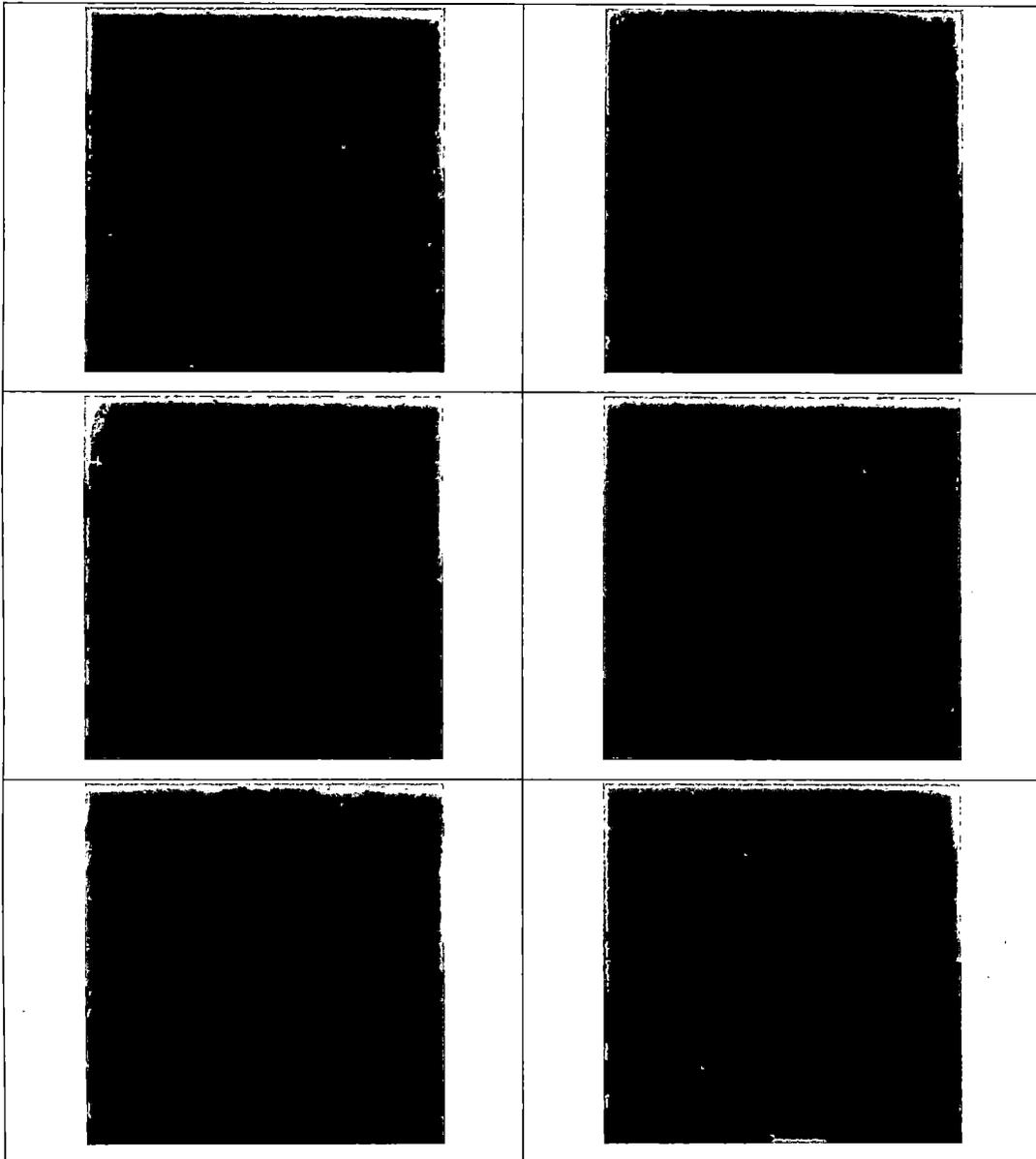


Tabla B.3. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sigunit L-50AF de SIKA, dosificado al 8%

B.4. Aditivo: EUCO Sureshot AF

Dosificación: 2%

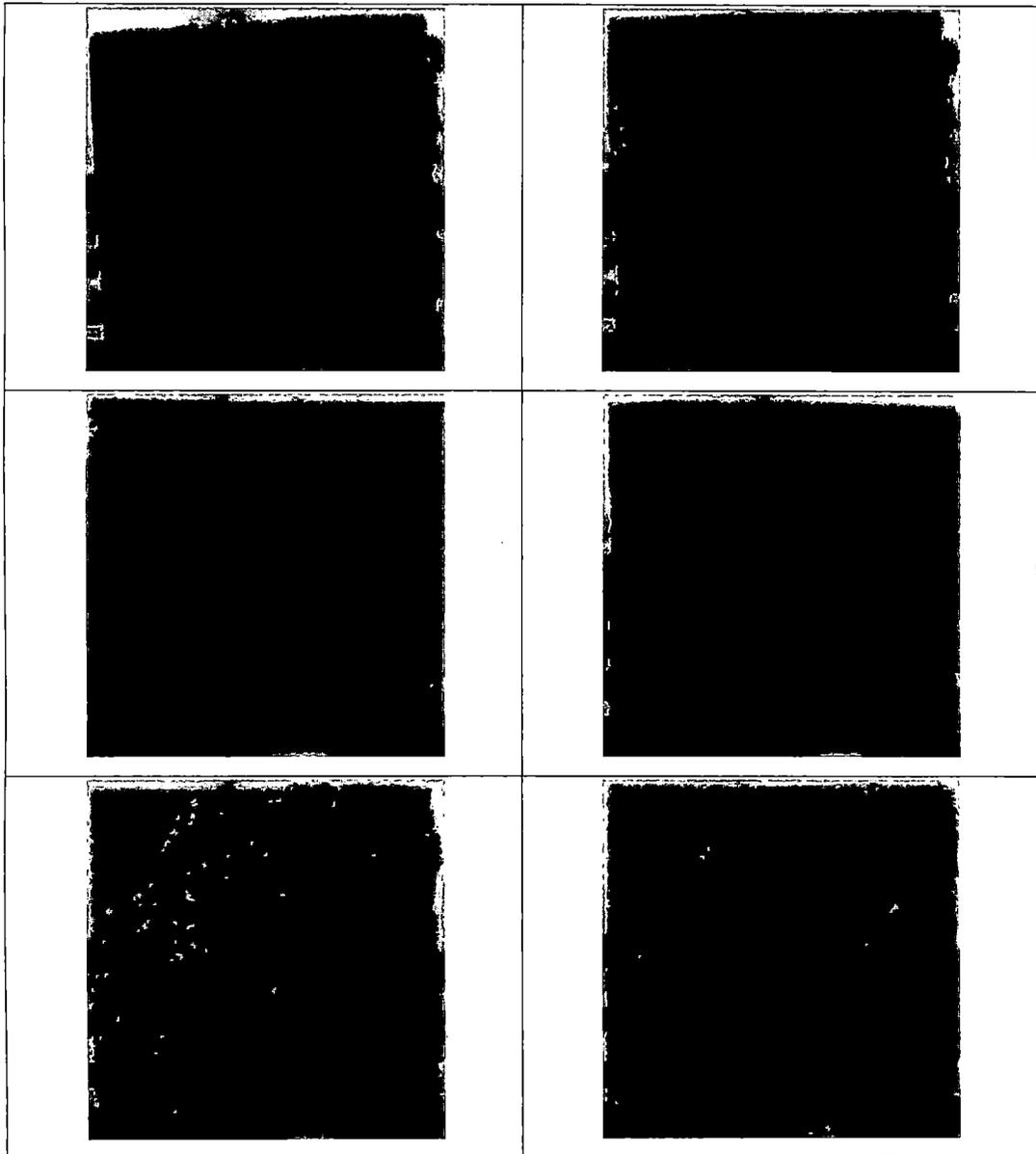


Tabla B.4. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de EUCO, dosificado al 2%

B.5. Aditivo: EUCO Sureshot AF

Dosificación: 4%

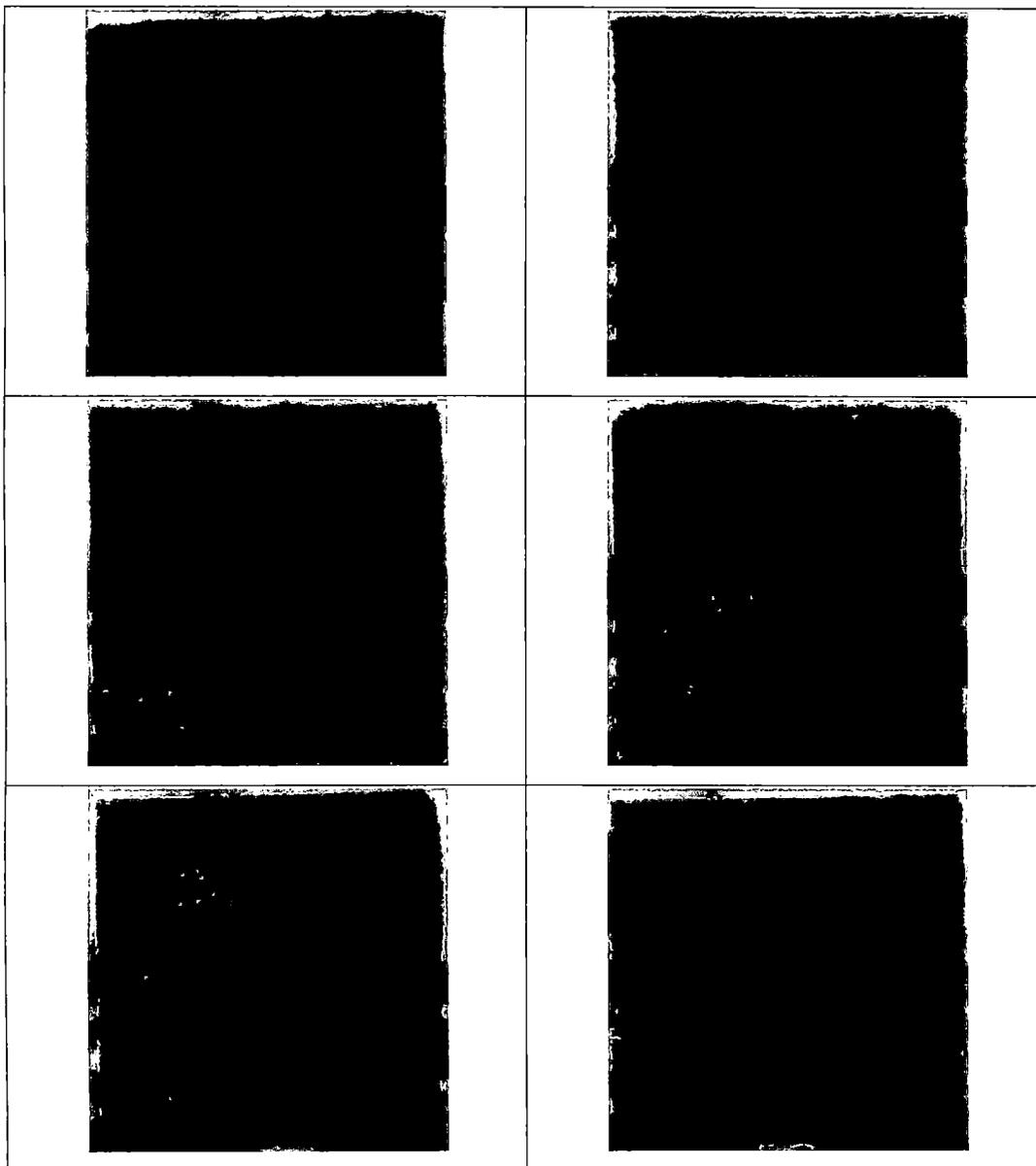


Tabla B.5. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de EUCO, dosificado al 4%

B.6. Aditivo: EUCO Sureshot AF

Dosificación: 6%

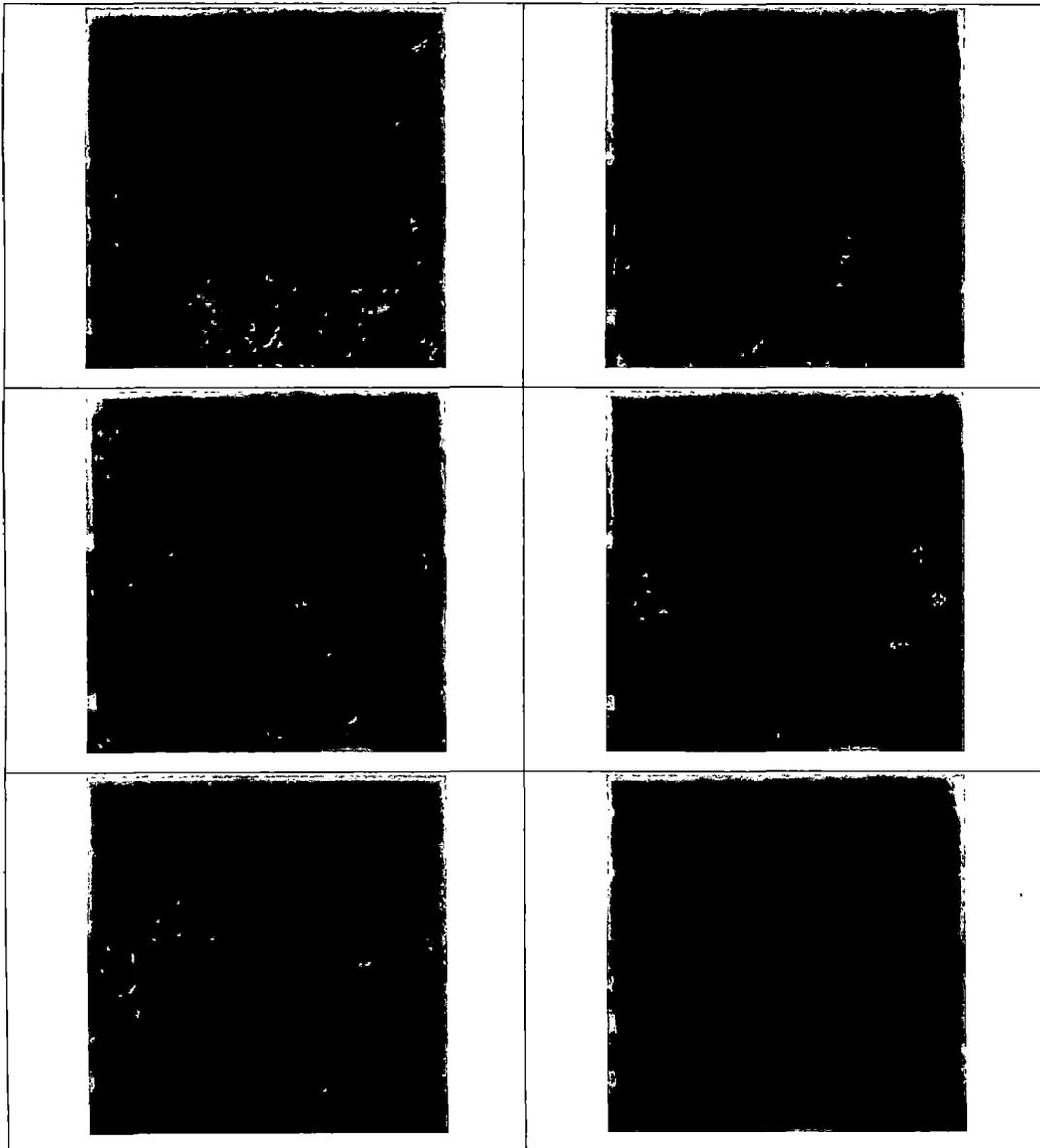


Tabla B.6. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de EUCO, dosificado al 6%

B.7. Aditivo: BASF Meyco SA160

Dosificación: 4%

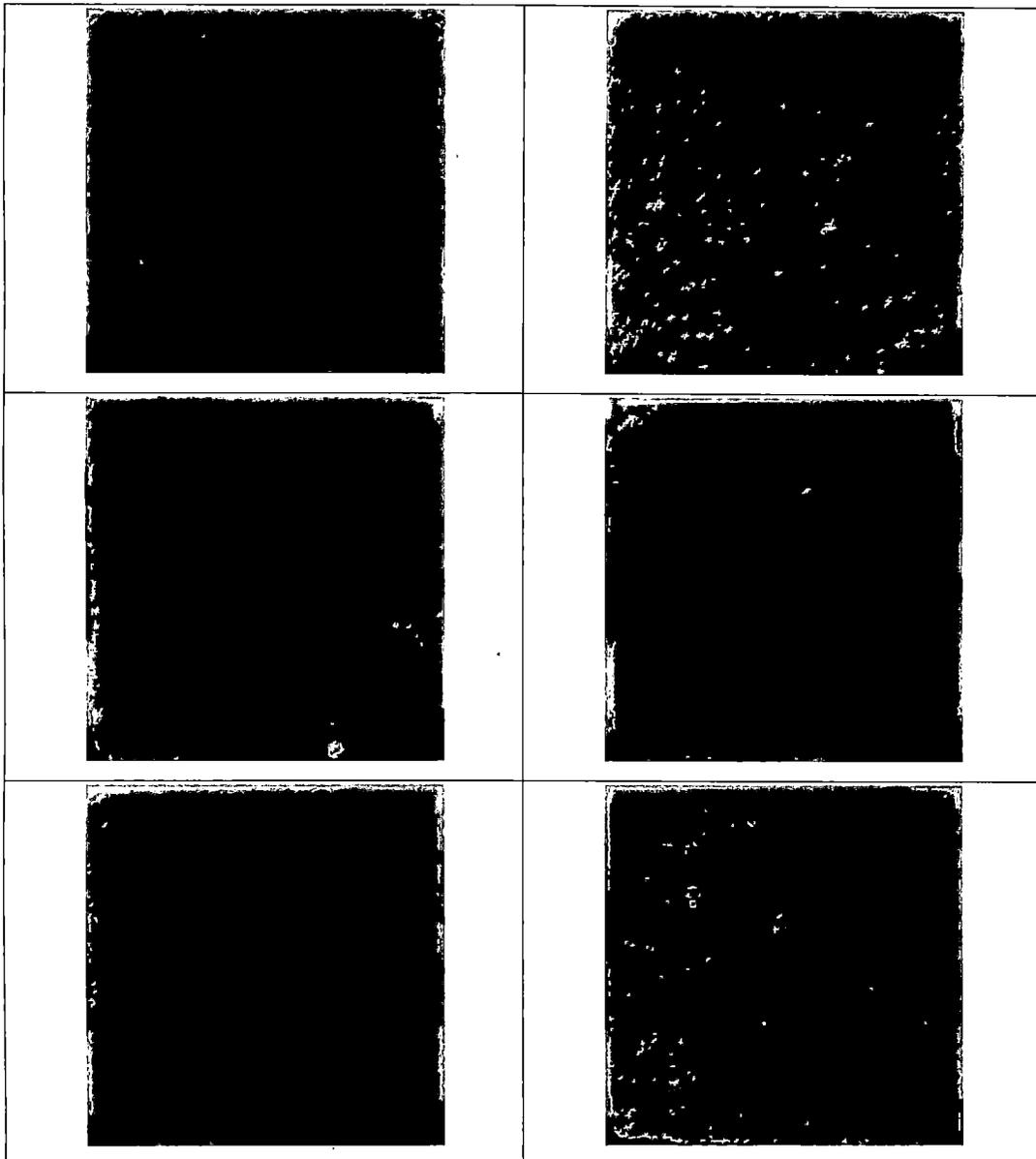


Tabla B.7. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de BASF, dosificado al 4%

B.8. Aditivo: BASF Meyco SA160

Dosificación: 6%

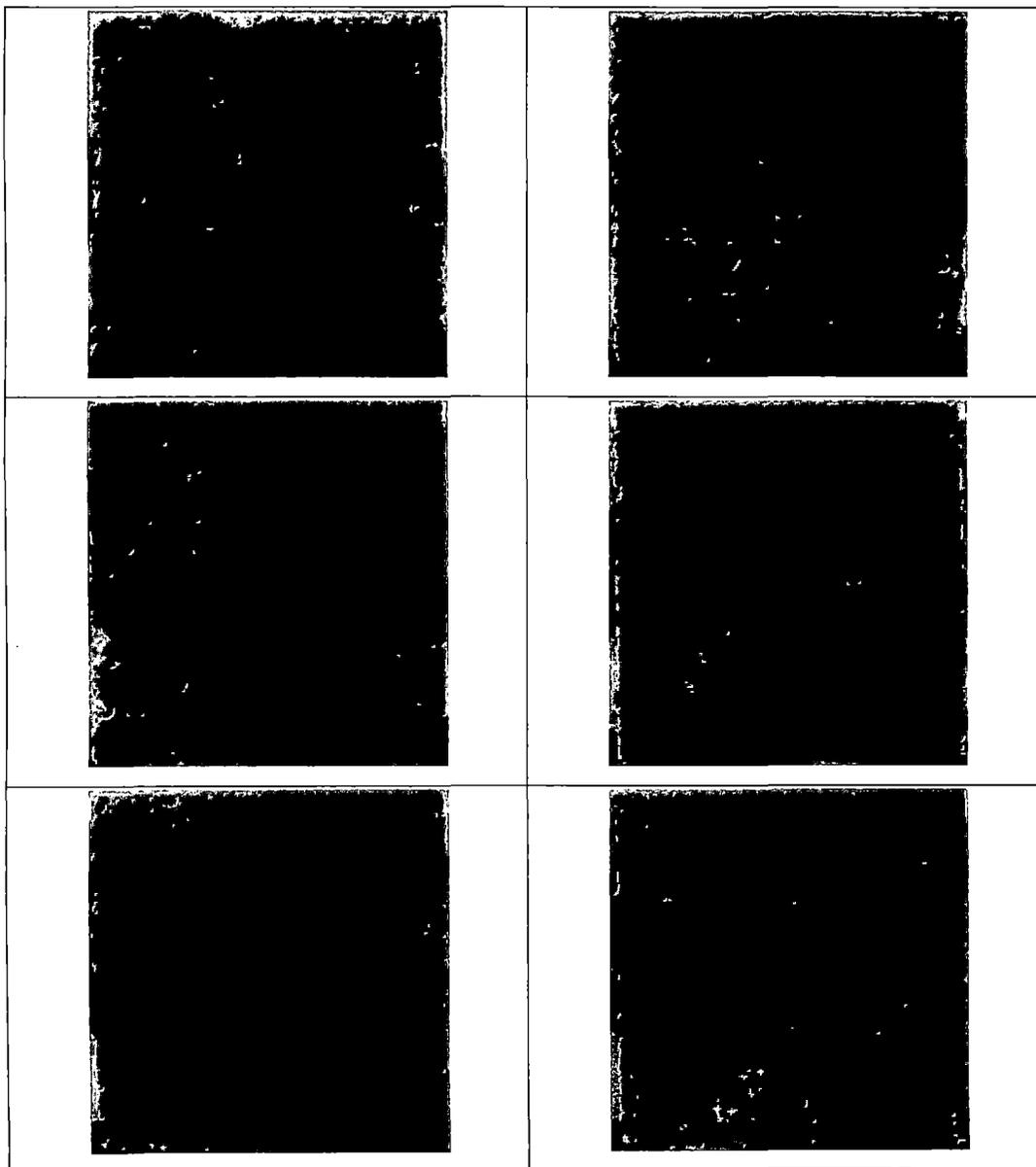


Tabla B.8. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de BASF, dosificado al 6%

B.9. Aditivo: BASF Meyco SA160

Dosificación: 8%

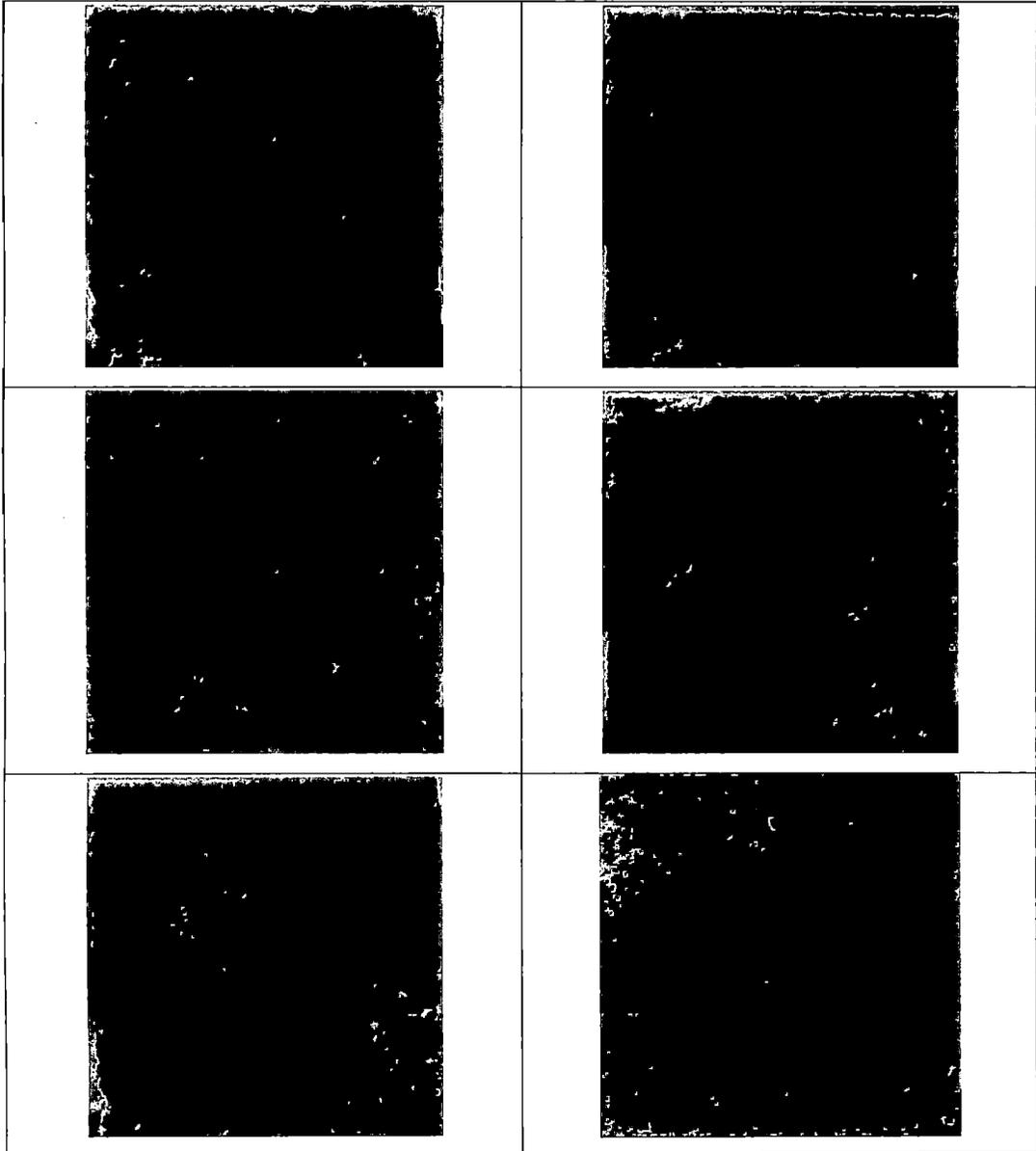


Tabla B.9. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de BASF, dosificado al 8%

ANEXO C: PROBETAS DE ENSAYO – APLICACIÓN POR VÍA SECA

C.1. Aditivo: SIKA Sigunit L-50 AF

Dosificación: 6%

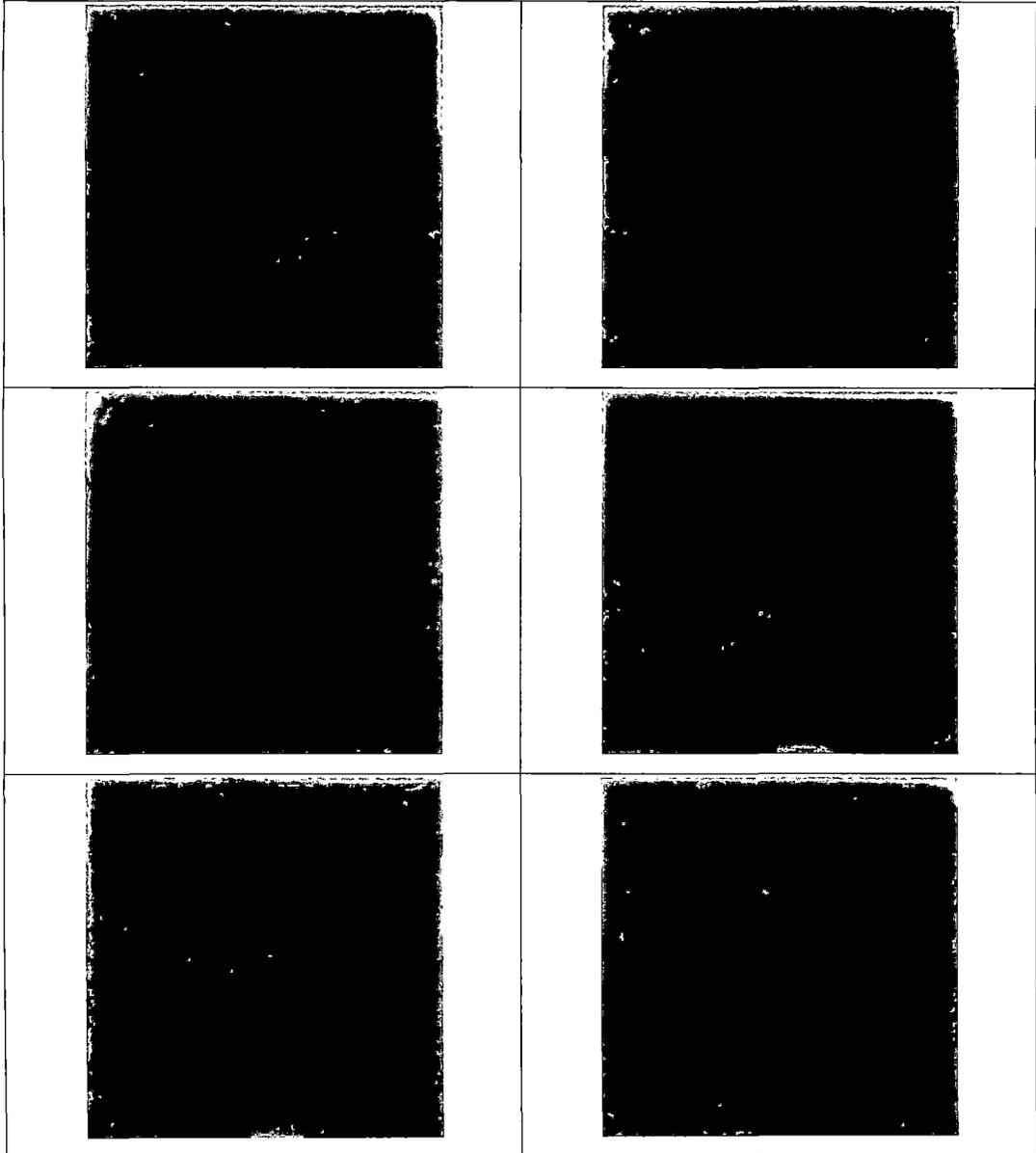


Tabla C.1. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sigunit L-50AF de SIKA, dosificado al 6%

C.2. Aditivo: SIKA Sigunit L-50 AF

Dosificación: 7%

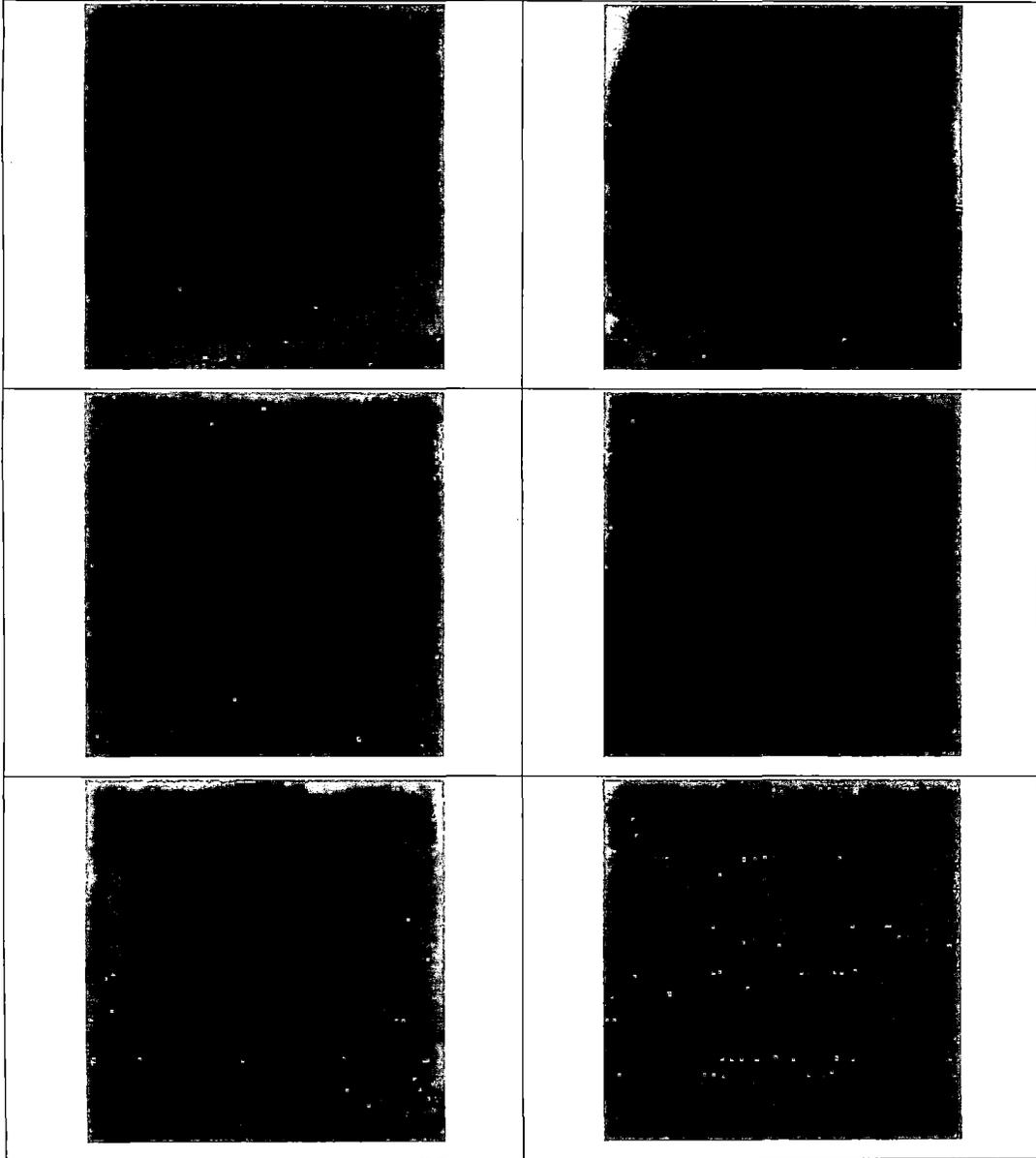


Tabla C.2. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sigunit L-50AF de SIKA, dosificado al 7%

C.3. Aditivo: SIKA Sigunit L-50 AF

Dosificación: 8%

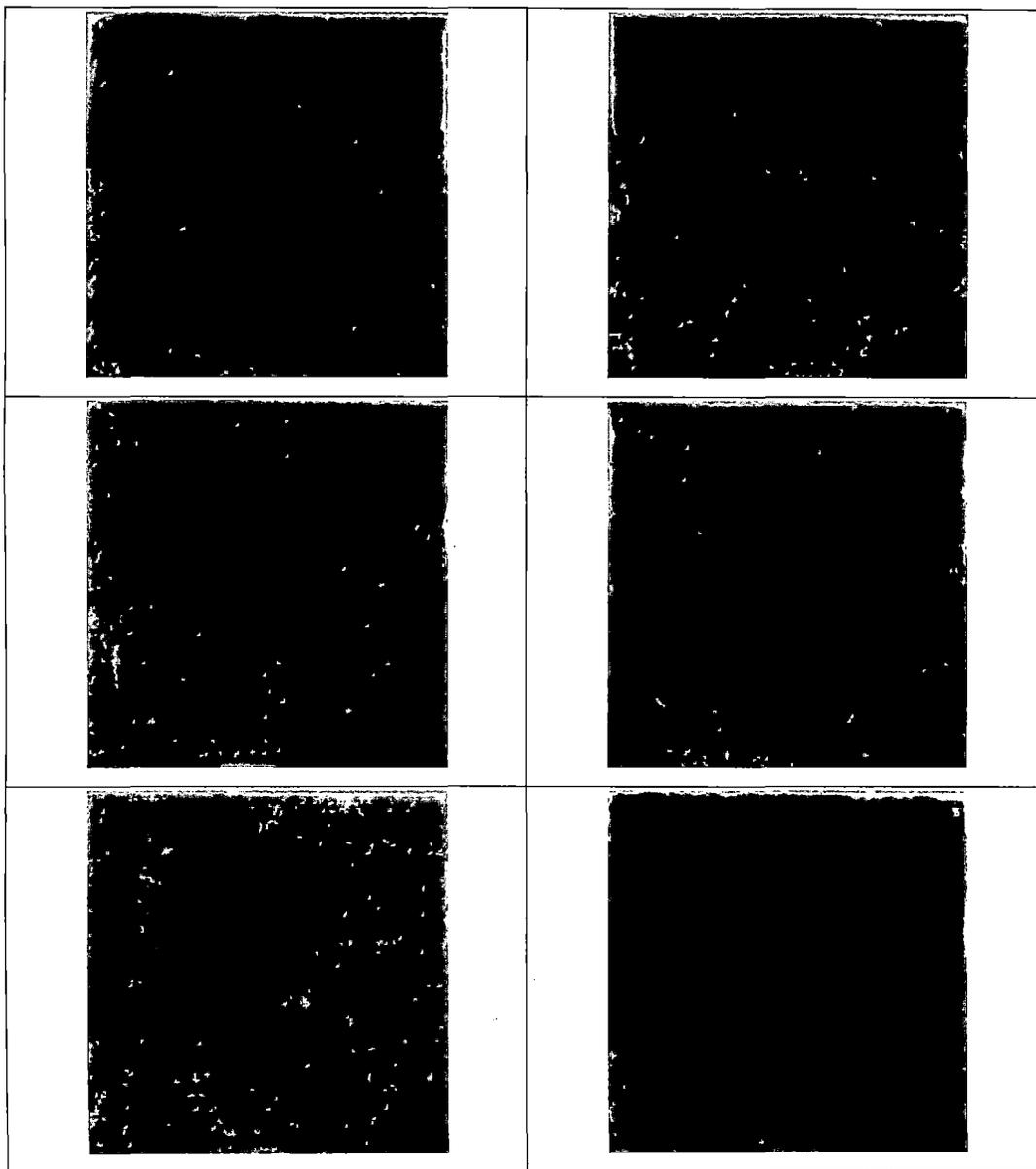


Tabla C.3. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sigunit L-50AF de SIKA, dosificado al 8%

C.4. Aditivo: EUCO Sureshot AF

Dosificación: 2%

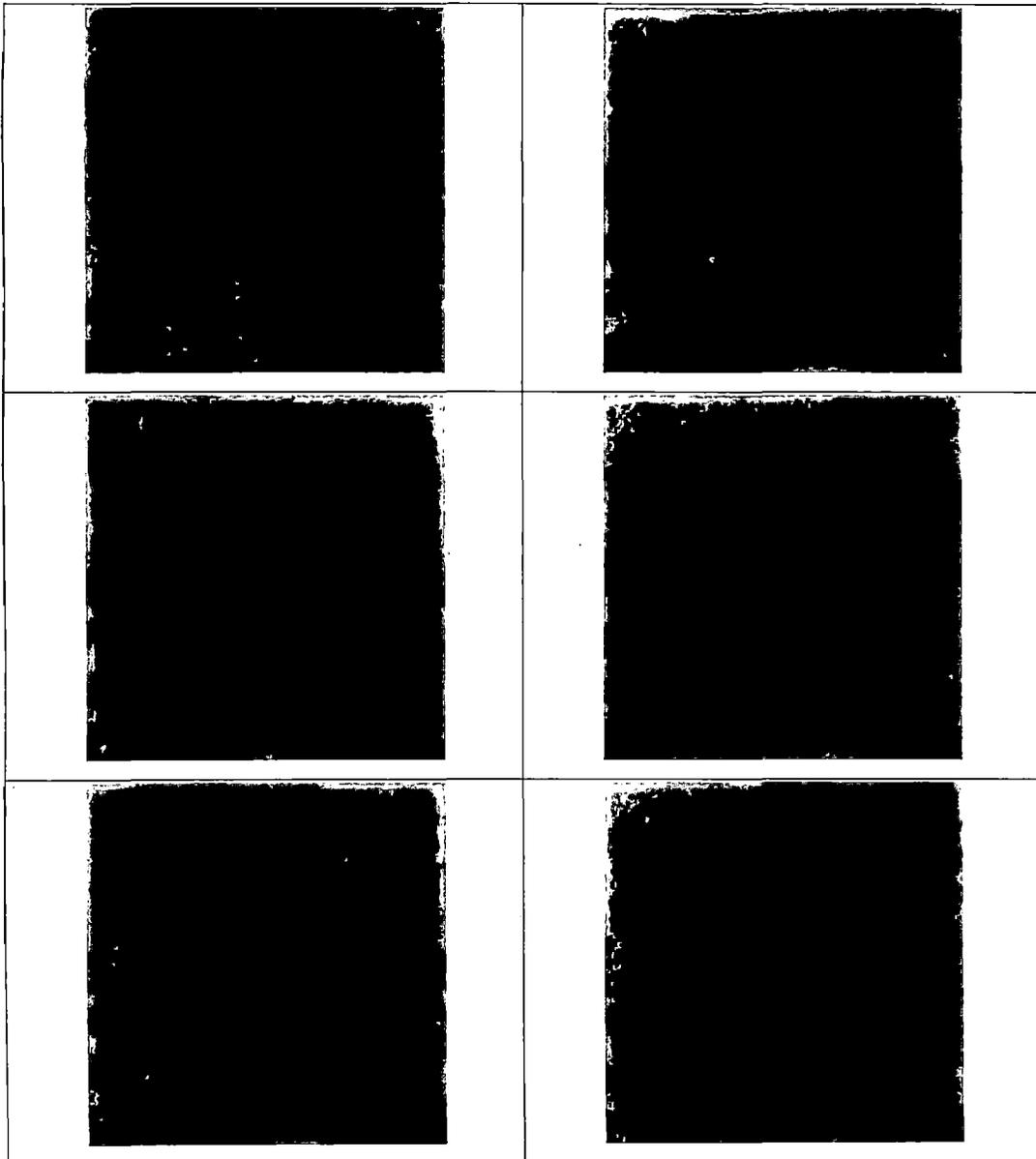


Tabla C.4. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de EUCO, dosificado al 2%

C.5. Aditivo: EUCO Sureshot AF

Dosificación: 4%

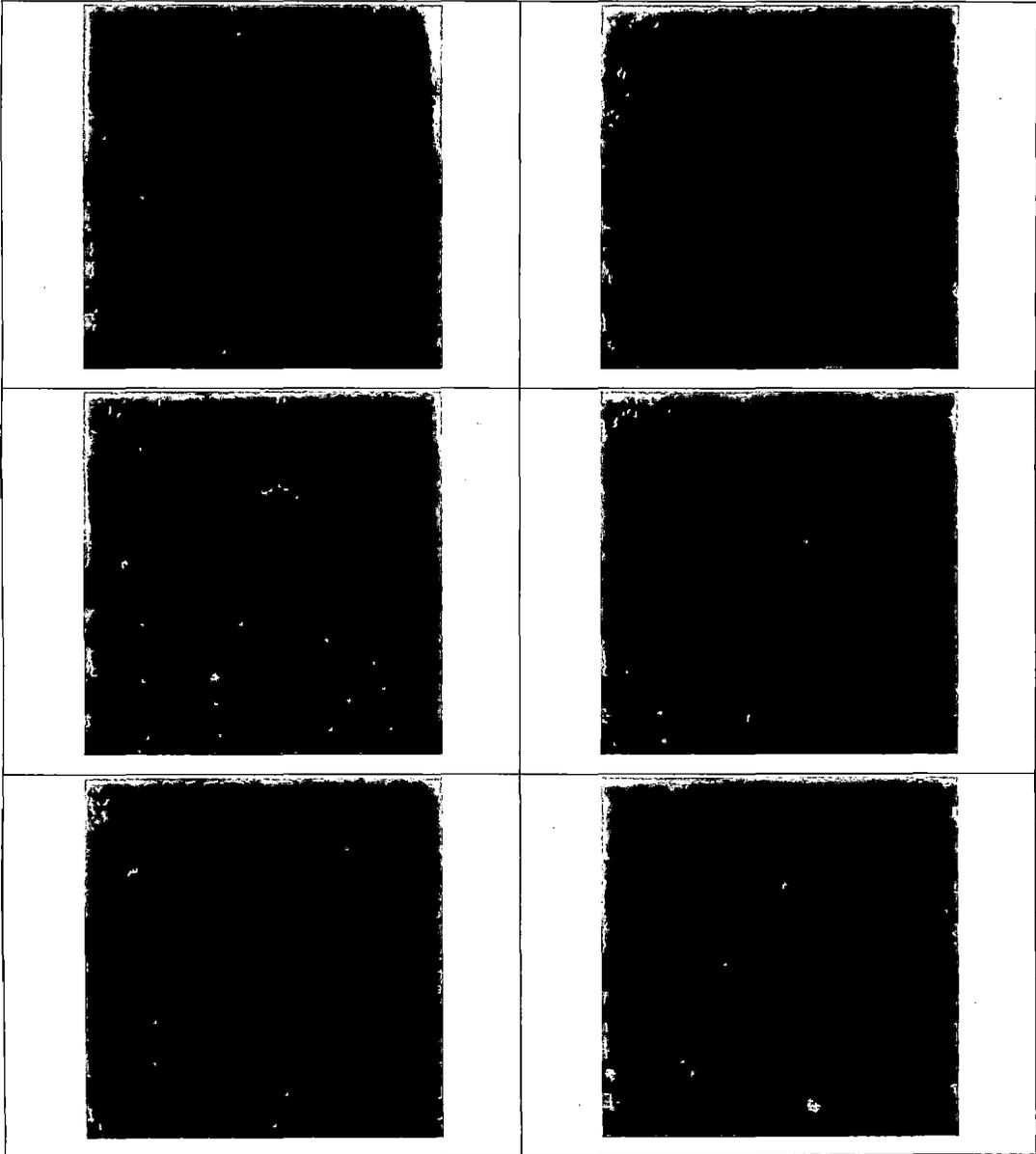


Tabla C.5. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de EUCO, dosificado al 4%

C.6. Aditivo: EUCO Sureshot AF

Dosificación: 6%

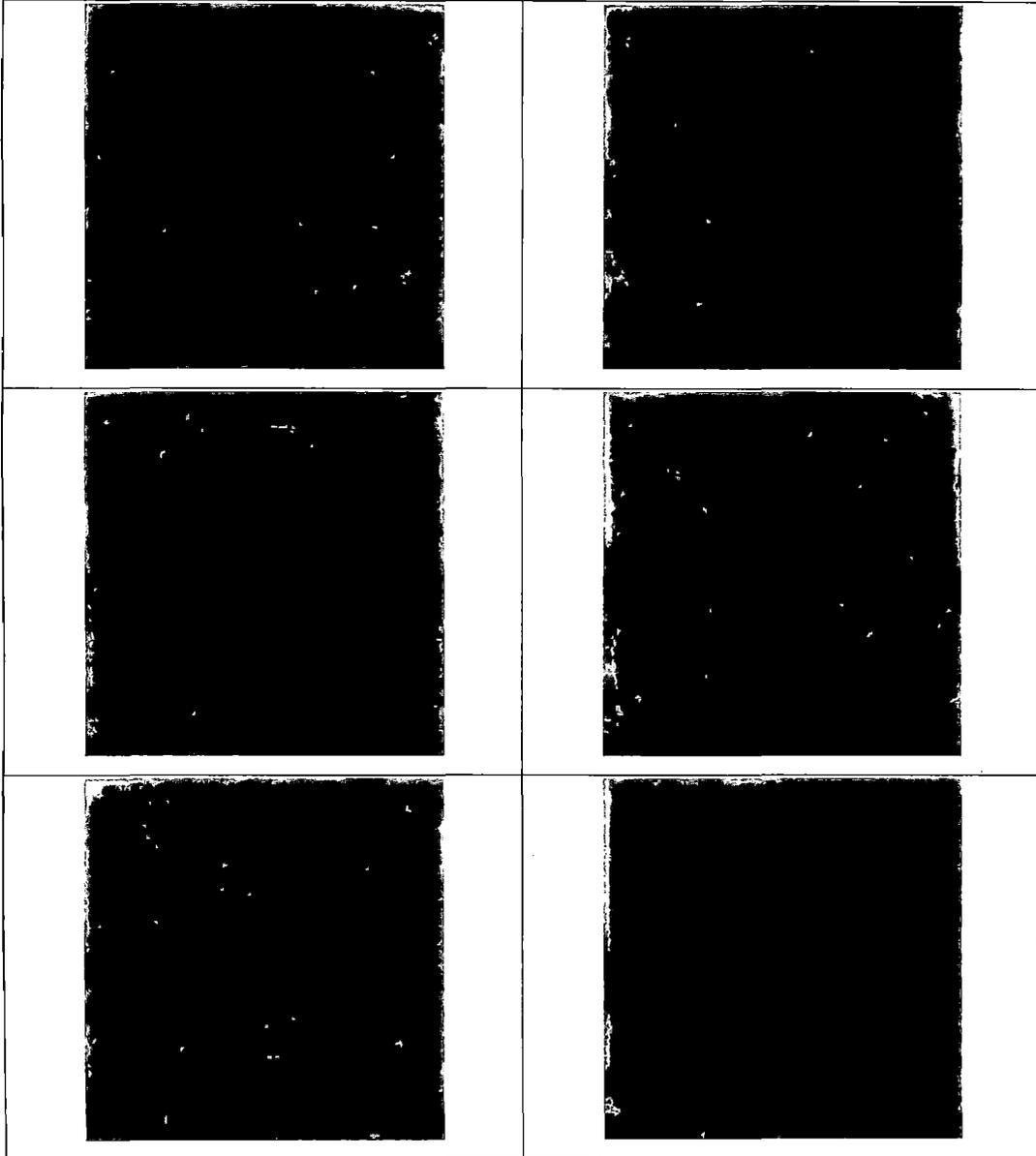


Tabla C.6. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de EUCO, dosificado al 6%

C.7. Aditivo: BASF Meyco SA160

Dosificación: 4%

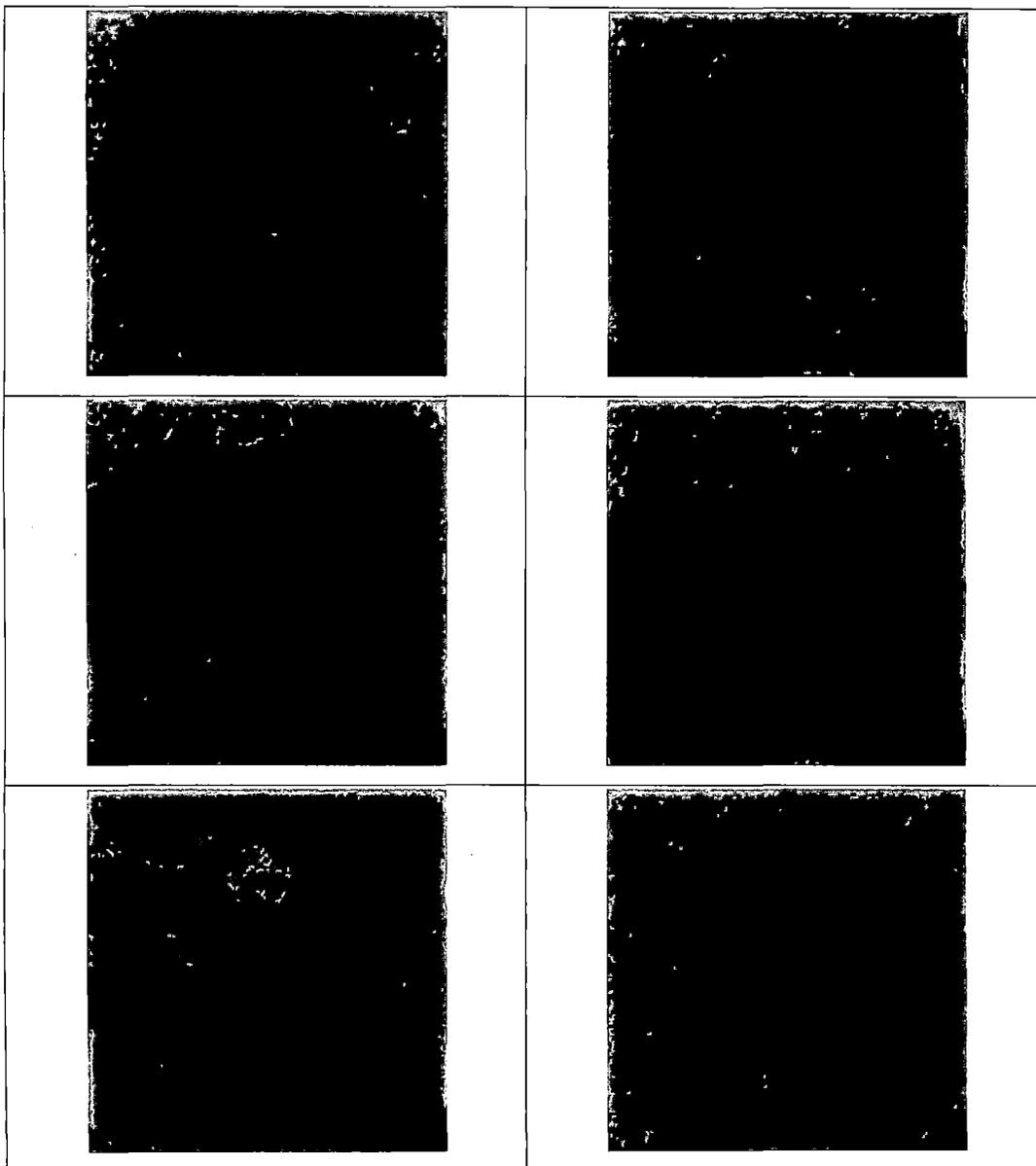


Tabla C.7. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de BASF, dosificado al 4%

C.7. Aditivo: BASF Meyco SA160

Dosificación: 4%

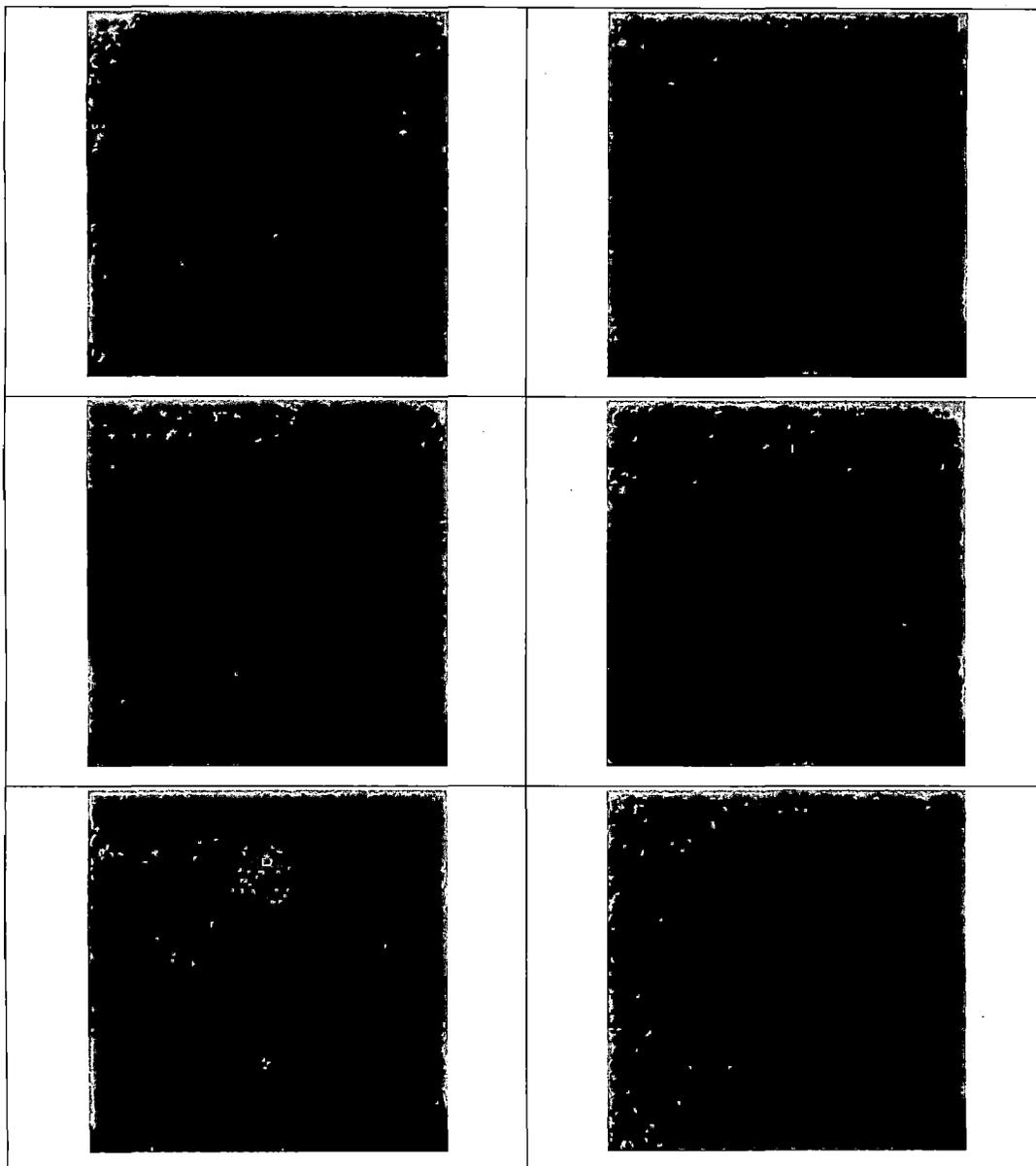


Tabla C.7. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de BASF, dosificado al 4%

C.8. Aditivo: BASF Meyco SA160

Dosificación: 6%

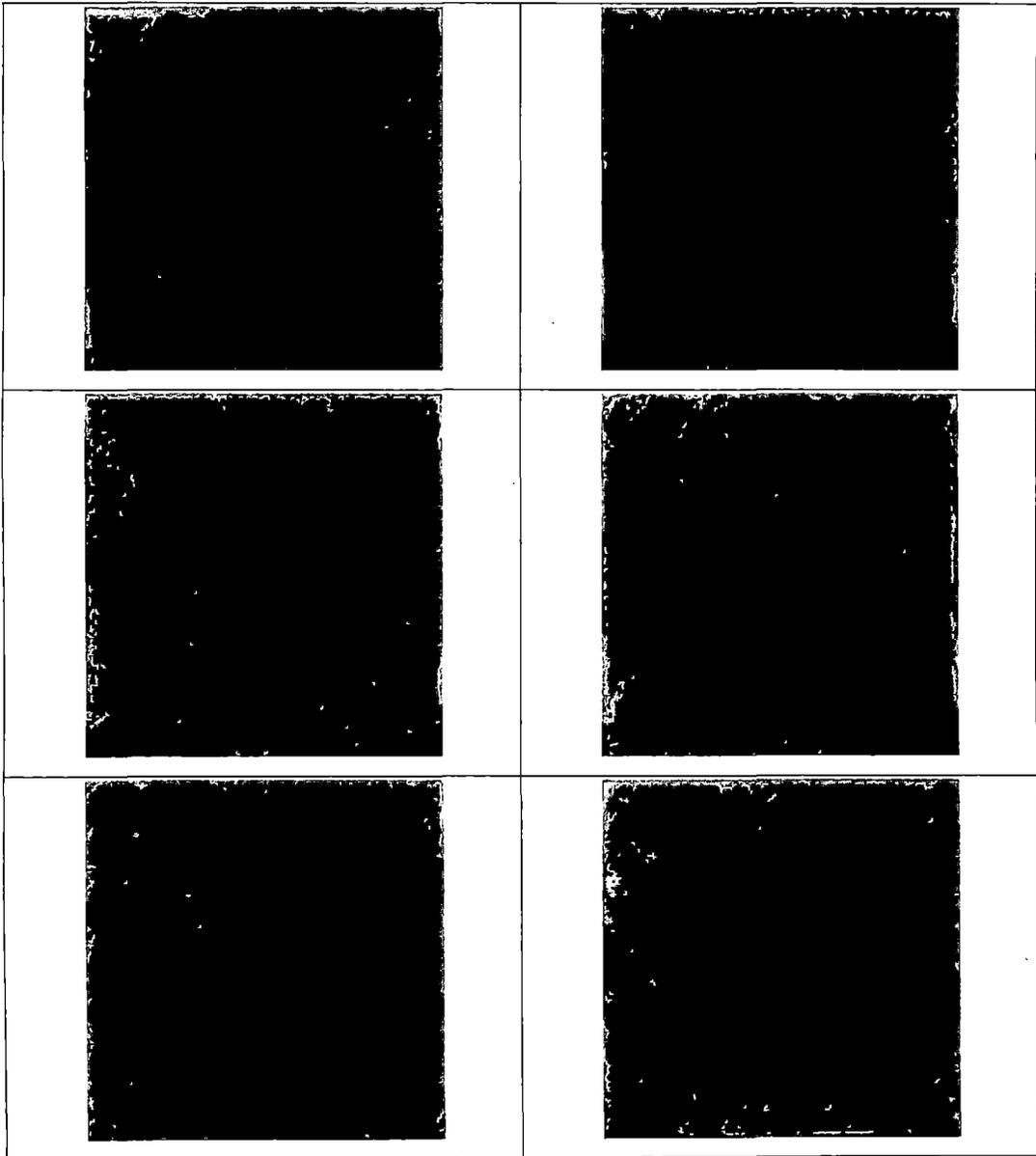


Tabla C.8. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de BASF, dosificado al 6%

C.8. Aditivo: BASF Meyco SA160

Dosificación: 6%

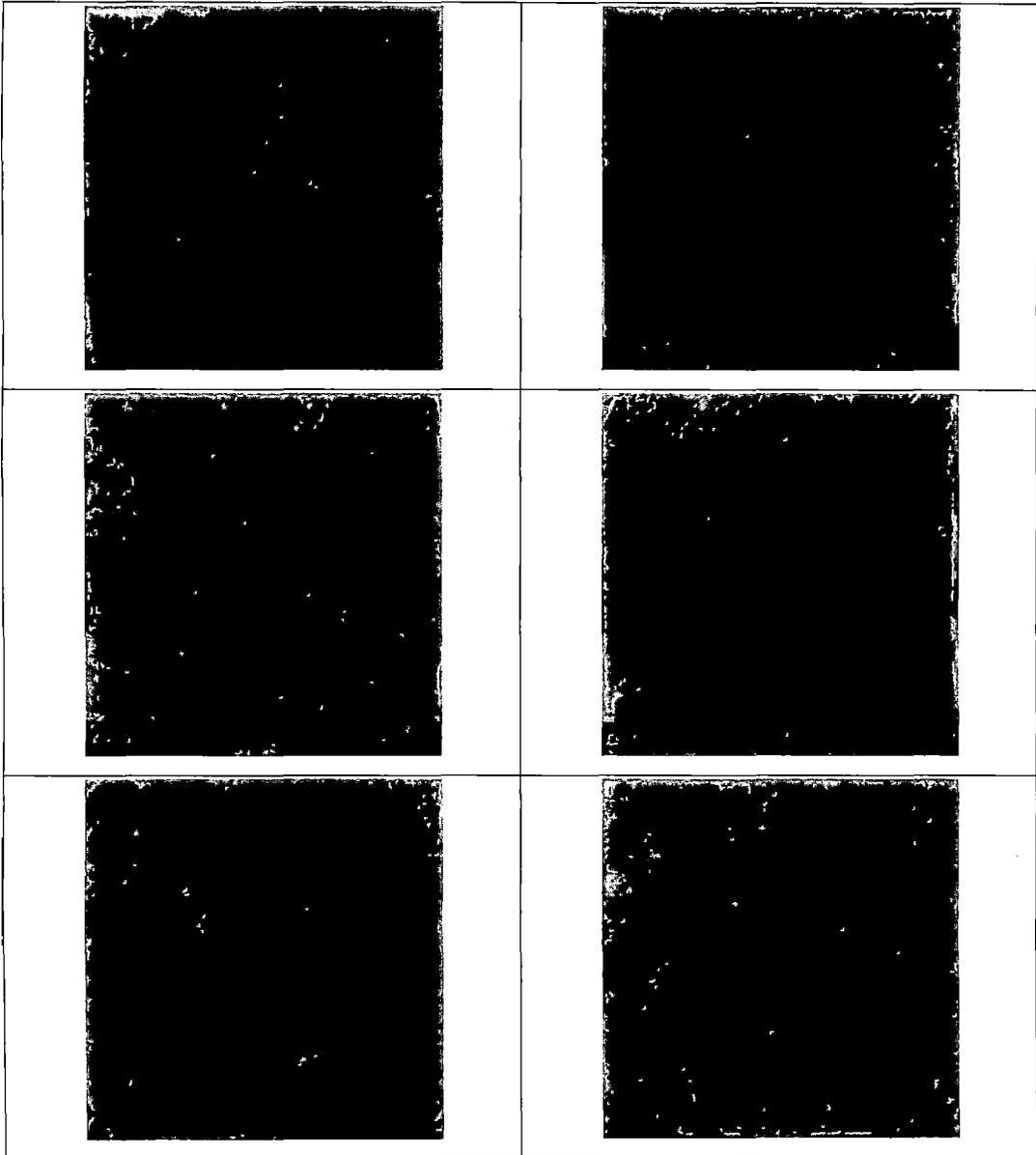


Tabla C.8. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de BASF, dosificado al 6%

C.9. Aditivo: BASF Meyco SA160

Dosificación: 8%

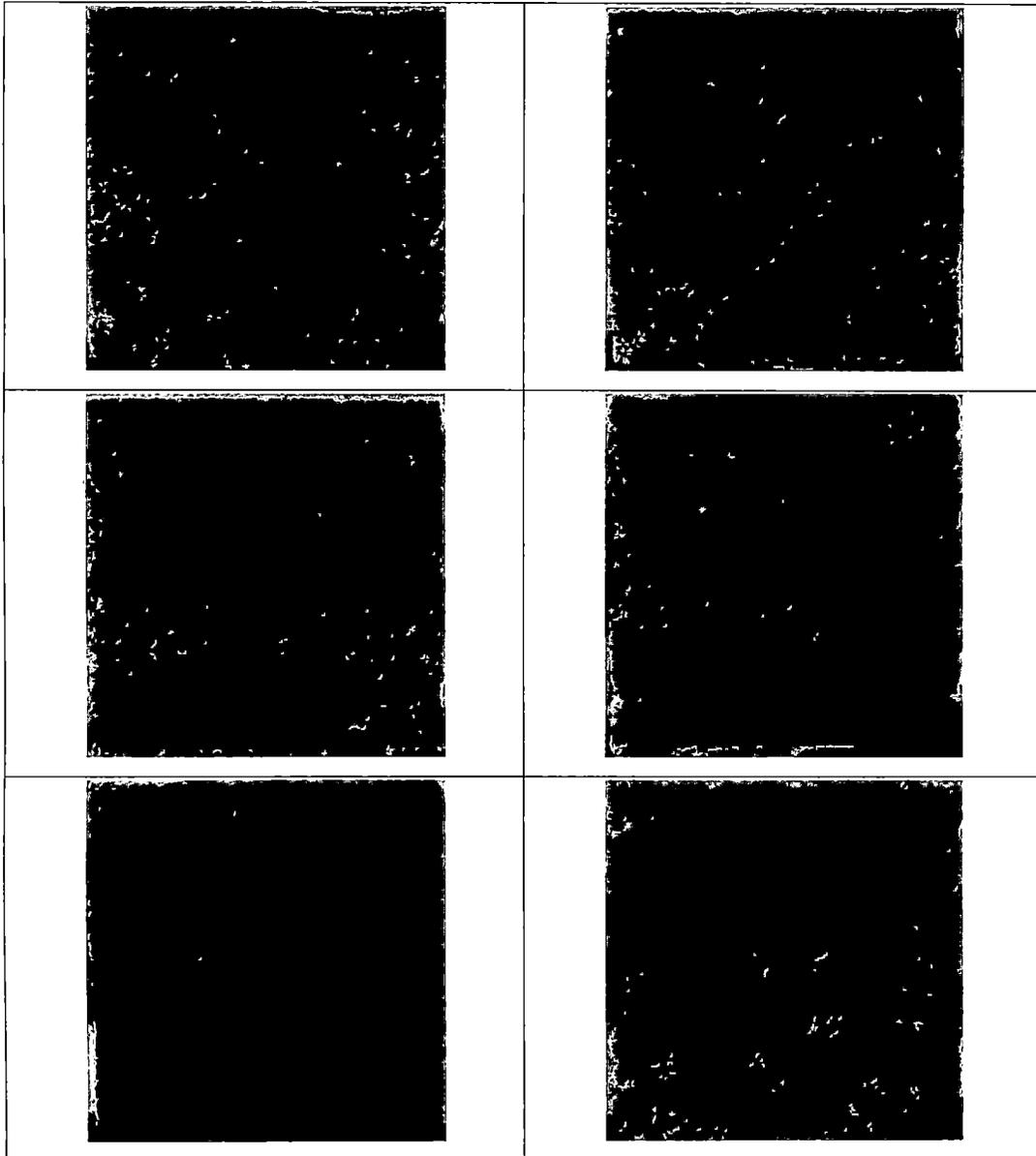


Tabla C.9. Muestra de Probeta de Ensayo preparada con el aditivo Sureshot AF de BASF, dosificado al 8%

BASF

The Chemical Company

MEYCO® SA160

Acelerante líquido, libre de álcali, de alto desempeño para shotcrete

USOS RECOMENDADOS

- Soporte temporal y permanente de rocas en túneles
- Soporte de rocas en proyectos de minería subterránea
- Pisos en malas condiciones
- Estabilización de declives
- Aceleración de grouts cementicios, como los que se usan en los revestimientos de túneles por máquinas perforadoras de túneles (TBM), inyección subterránea de cemento, y relleno de concreto en espuma

DESCRIPCION

MEYCO SA160 es un acelerante libre de álcali, de alto desempeño para concreto proyectado o shotcrete. Es un aditivo líquido cuya dosificación puede variarse para obtener los tiempos de endurecimiento y fraguado deseados. Es adecuado para todas las aplicaciones donde se requieren capas gruesas con una resistencia inicial alta, y buena resistencia final.

VENTAJAS

Por su rápido fraguado se logra el avance rápido de la obra y la formación de revestimientos gruesos de shotcrete, aplicándolo por capas en una misma secuencia.

- Permite el desarrollo de una resistencia inicial continua, a la vez de alcanzar una resistencia y durabilidad excelentes en el largo plazo.
- Fácil de manejar y dosificar en forma precisa.
- Muy bajo desprendimiento de polvo y por lo tanto, crea un ambiente de trabajo saludable
- Mejora la seguridad laboral ya que no es agresivo, reduce el impacto ambiental y disminuye los costos de manejo.

FORMA DE APLICACION

Preparación de la superficie

El sustrato debe estar limpio, sin material suelto y de preferencia húmedo.

Dosificación

La dosificación de MEYCOSA 160 depende de la temperatura del concreto, aire y sustrato. Otro factor importante que influye en la dosificación es la reactividad del cemento. Dependiendo en el tiempo requerido de fraguado y resistencia temprana, el consumo del aditivo MEYCOSA160 normalmente fluctúa entre 4-8% del peso del bacheo. Sobredosis de > 10% pueden resultar en una disminución de resistencia final.

Para todos los casos se recomienda realizar pruebas preliminares para verificar el fraguado y la resistencia a las 24 horas de los cementos que se utilizarán en el proyecto.

Aplicación

MEYCO SA160 se dosifica en la boquilla. Como MEYCO SA 160 es una suspensión por lo que no todas las bombas de proyección funcionarán de forma apropiada. Para asegurar una dosificación constante y precisa, asegurando la calidad del concreto proyectado, recomendamos la utilización de las siguientes bombas de dosificación:

- Mono bombas (bombas de tornillo)
- Bombas peristálticas tipo Bredel
- MEYCO® Dosa

Puede ser usada también con

- Bombas de membrana
- MEYCO® Mix
- Bombas de engranaje



BASF

The Chemical Company

No se debe usar con:

- Bombas de pistón
- Bombas con válvulas de globo y asiento
- Tanques presurizados
- Bombas de engranajes

Nota: No utilice filtros en la línea de succión, ya que pueden causar taponamiento. Preferiblemente el material se debe extraer del fondo del tambor/ contenedor.

Limpieza

Antes de utilizar MEYCO® SA160, el equipo de dosificación y demás partes del sistema se deben limpiar por completo con abundante agua. El no hacerlo provoca taponamientos en el sistema. Asegúrese de que todos los operadores involucrados en la operación estén bien informados.

RECOMENDACIONES

Compatibilidad

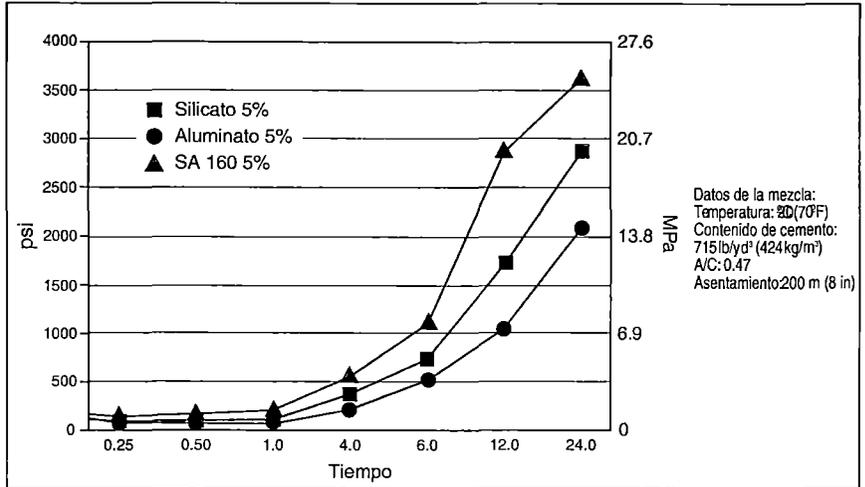
No mezcle MEYCO SA 160 con otros aceleradores que no sean de BASF, ya que esto causará inmediato taponamiento de los equipos de dosificación.

DATOS TECNICOS

Forma	Líquida
Color	Beige
Densidad, 20°C	1.43 ± 0.03
pH (1:1 solución acuosa)	2.5 - 3
Viscosidad	
Haake Sp 1, 20°C (1)	> 450 ± 50 MPa.s
Estabilidad térmica	5°C - 35°C
Contenido de Cloruros	< 0.1%

(1) Depende del grado de agitación y temperatura del producto

Resistencia a la Compresión



EMPAQUE

MEYCO SA160 se suministra en tambores de 185 l (49 gal) , tanques de 1018 l (269 gal) y a granel.

ALMACENAMIENTO

MEYCO SA160 debe almacenarse mínimo a 5°C (45°F) y máximo a 35°C (95°F), en contenedores cerrados de plástico, fibra de vidrio o acero inoxidable. No debe almacenarse en contenedores metálicos convencionales, puesto que el pH del producto induce corrosión que puede afectar su desempeño.

Después de un almacenamiento prolongado recomendamos que MEYCO SA160 sea siempre reconstituido mediante agitación mecánica o recirculación. No se debe utilizar aire comprimido.

Los contenedores abiertos permitirán el contacto prolongado con el aire causando la formación de una película delgada y grumos que pueden bloquear el sistema acelerante.

Antes de usar cualquier producto que se haya congelado, consulte a su representante local BASF.

Si se almacena en su envase original bien cerrado, bajo las condiciones descritas arriba, tiene una vida útil de 3 meses, como mínimo.

SEGURIDAD

Riesgos

MEYCO SA160 no contiene sustancias peligrosas que requieran un etiquetado especial. Sin embargo, se deben tomar las mismas precauciones a las indicadas para el uso y manejo de productos cementicios.

Precauciones

Mantenga fuera del alcance de los niños. Mantenga el recipiente cerrado cuando no se utilice. Evite el contacto con la piel, los ojos y la ropa. Lave sus manos perfectamente después de usar el producto. Use guantes protectores y lentes de protección. Debe seguir las



The Chemical Company

advertencias indicadas en la etiqueta hasta que el envase sea comercialmente limpiado y reacondicionado.

Primeros auxilios

En el caso de contacto con los ojos, lave perfectamente con agua limpia por un mínimo de 15 minutos. Si hay contacto con la piel, lave el área afectada con agua y jabón. Si la irritación persiste, busque atención médica. Retire y lave la ropa contaminada.

Para mayor información, consulte la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) para este producto, o al representante local de BASF Construction Chemicals.

BASF Construction Chemicals Latin America

Argentina (54-34-8843-3000)	Brasil (55-11-6108-5555)	Chile (56-2-444-9760)	Colombia (57-1-321-7210)	Costa Rica (506-440-9110)	Ecuador (593-2-256-6011)	México (52-55-2122-2200)	Perú (511-385-0109)	Puerto Rico (787-258-2737)	Rep Dominicana (809-957 9303)	Venezuela (58-212-762-5471)
---------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	-------------------------------	--------------------------------------	---	---------------------------------------

® Marca registrada de BASF Aktiengesellschaft
© 2006 BASF Construction Chemicals Latin America

08/06
MeycoSA160.pmd

www.basf-cc-la.com

Sigunit® L-50 AF

Acelerador Líquido Libre de Álcalis para Concreto Proyectado

Descripción

General

SigunitL-50 AF es un acelerante líquido libre de álcalis desarrollado en base a sustancias inorgánicas especiales, para ser utilizado en concreto proyectado tanto por vía húmeda como por vía seca.
No contiene cloruros.

Campos de aplicación

Sigunit L-50 AF es un acelerante para uso en el proceso de proyección por vía seca y vía húmeda en las siguientes aplicaciones principales:

- Concretos y morteros proyectados en túneles, muros de contención, canales, estanques y reparaciones.
- Concreto proyectado de alta calidad en revestimientos y trabajos de construcción en general.
- Estabilización de taludes y rocas.

Ventajas

- Libre de álcalis.
- Rápido desarrollo de la resistencia inicial
- Mayor resistencia a largo plazo.
- No contamina las aguas superficiales o subterráneas debido a que está libre de álcalis.
- Aumenta la adherencia del concreto proyectado a la roca y concreto, facilitando la aplicación sobre cabeza.
- Libre de cloruros, no ataca el acero de refuerzo.
- Permite aplicar capas sucesivas rápidamente.
- Disminuye el rebote.

Datos Básicos

Aspecto

Líquido

Color

Incoloro - transparente

Presentación

Cilindro de 250 kg.

Almacenamiento

3 meses bajo techo en su envase original cerrado a temperaturas entre 7°C y 30°C.

Datos Técnicos

Densidad

1.27 ± 0.02

pH

4 ± 0,5

Sólidos

37 ± 2

Aplicación

Consumo

Se recomienda utilizar dosis de 6% a 8% del peso del cemento. Es posible utilizar mayores o menores dosis realizando ensayos previos.

Consideraciones generales

El efecto del acelerante depende del contenido, edad y tipo de cemento utilizado, así como el sustrato, temperatura, sistema de proyección y espesor de capa. La razón A/C del concreto en el proceso de proyección por vía húmeda y el agua agregada en la boquilla en el proceso vía seca son parámetros que influyen el efecto acelerador de Sigunit L-50 AF. A temperatura más bajas se requiere mayor dosis de aditivo para una misma aceleración de la resistencia inicial. En el proceso vía húmeda es recomendable una relación A/C <0.50. Es recomendable el uso de Sikament o Sika VicoCrete

Construcción



Método de aplicación	<p>La dosis de Sigunit L-50 AF más efectiva se obtiene a través de ensayos previos en terreno en las condiciones de faena. Para una capa de hasta 15 cm. de espesor en una pasada se recomienda utilizar dosis de 6% al 8% del peso del cemento.</p> <p>Sigunit L-50 AF se agrega junto con el aire comprimido en el sistema de mezcla húmeda o diluido en el agua en el sistema de mezcla seca. Consulte con el fabricante de la máquina proyectora o con nuestro Departamento Técnico respecto al dosificador más adecuado.</p> <p>Es recomendable agitar el producto antes de usar.</p>
Instrucciones de Seguridad Precauciones de manipulación	<p>Durante la manipulación de cualquier producto químico, evite el contacto directo con los ojos, piel y vías respiratorias. Protéjase adecuadamente utilizando guantes de goma natural o sintéticos y anteojos de seguridad.</p> <p>En caso de contacto con los ojos, lavar inmediatamente con abundante agua durante 15 minutos manteniendo los párpados abiertos y consultar a su médico.</p>
Observaciones	<p>La Hoja de Seguridad de este producto se encuentra a disposición del interesado. Agradeceremos solicitarla a nuestro Departamento Comercial, teléfono: 618-6060 o descargarla a través de Internet en nuestra página web: www.sika.com.pe</p>
Nota Legal	<p>La información y en particular las recomendaciones sobre la aplicación y el uso final de los productos Sika son proporcionadas de buena fe, en base al conocimiento y experiencia actuales en Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados, manipulados y transportados; así como aplicados en condiciones normales. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra en donde se aplicarán los productos Sika son tan particulares que de esta información, de alguna recomendación escrita o de algún asesoramiento técnico, no se puede deducir ninguna garantía respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad particular, así como ninguna responsabilidad contractual. Los derechos de propiedad de las terceras partes deben ser respetados.</p> <p>Todos los pedidos aceptados por Sika Perú S.A. están sujetos a Cláusulas Generales de Contratación para la Venta de Productos de Sika Perú S.A. Los usuarios siempre deben remitirse a la última edición de la Hojas Técnicas de los productos; cuyas copias se entregarán a solicitud del interesado o a las que pueden acceder en Internet a través de nuestra página web www.sika.com.pe.</p>

“La presente Edición anula y reemplaza la Edición N°2 la misma que deberá ser destruida”



Sika Perú S.A., Centro Industrial "Las Praderas de Lurin "
 S/N, MZ "B" Lote 5 y 6 Lurin, Lima – Perú
 Tel: (51-1) 618-6060 / Fax: (51-1) 618-6070
 E-mail: construccion@pe.sika.com / Web: www.sika.com.pe



SURESHOT AF[®]

ACELERANTE PARA CONCRETO Y MORTERO PROYECTADO LIBRE DE ALCALIS, CLORUROS Y ECOLÓGICO

SURESHOT AF es un aditivo líquido, LIBRE DE CLORUROS Y ÁLCALIS que reduce los tiempos de fraguado y acelera el desarrollo de las resistencias mecánicas iniciales de concretos ó morteros lanzado bien sea por vía húmeda ó vía seca, SIN DETRIMENTO de las resistencias finales.

PROPIEDADES:

Apariencia : Líquido
Color : Blanco translucido
Densidad : 1.35 kg./lt

APLICACIONES PRINCIPALES

SURESHOT AF es recomendado para concreto lanzado, por vía seca ó húmeda en:

- Sostenimiento y estabilización de taludes.
- Sostenimiento y recubrimiento en túneles viales y minería subterránea.
- Construcción de canales, piscinas y estanques.
- En la ejecución de cascaras, bóveda y losas en edificaciones.
- Reparación de concreto deteriorado.
- En toda aplicación donde se requieren concreto o mortero lanzado.

CARACTERISTICAS Y BENEFICIOS

- Rápido endurecimiento y aceleración del fraguado.
- Mayor cohesión.
- Bajo porcentaje de rebote.
- Mínima segregación de la mezcla.
- Mezcla más impermeable.
- NO PRODUCE PÉRDIDAS DE RESISTENCIA.
- Considerable ahorro de cemento.
- Mayor velocidad de ejecución de capas sucesiva.
- ES PRACTICAMENTE INOCUO, al no contener sustancias irritantes a la piel ni a las mucosas. Siempre se recomienda el uso

de elementos de seguridad antes de su aplicación (lentes, guantes, etc.).

DOSIFICACION

La dosis del **SURESHOT AF** depende del efecto deseado, de la temperatura ambiente, del tipo y características del diseño.

SURESHOT AF se recomienda en dosis 2 - 6 % del peso del cemento utilizado, haciendo previamente ensayos de compatibilidad.

Para evitar que el **SURESHOT AF** reaccione con la mezcla antes de que sea colocada, se recomienda su incorporación en la boquilla de proyección.

APLICACIÓN

SURESHOT AF se recomienda en la aplicación de concreto ó mortero lanzado por vía húmeda o seca, en ambos métodos de aplicación se observa una notable disminución del rebote y gran adherencia de la mezcla al substrato base y entre capas.

PRESENTACION

Cilindro x 300 Kg.

MANEJO Y ALMACENAMIENTO:

SURESHOT AF se debe almacenar en su envase original herméticamente cerrado y bajo techo.

Almacenado por mas de seis meses requiere agitado en el envase original.

Vida útil de almacenamiento: 1 año.



CSM

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE CONCRETO

TIPO DE CONCRETO : 350 kg/cm²

OBRA : REHABILITACION CH MACHUPICCHU

ENCARGADO: JUAN SANTISTEBAN

MES: NOVIEMBRE

Probeta N°	ESTRUCTURA	Progresiva	Rev. Sin aditivo (cm)	Rev. Con aditivo (cm)	Fecha Vaclado	Fecha Rotura	Edad Días	Medidas Probetas		Peso Probeta (Kg)	Area Probeta (cm ²)	Carga Rotura (Kg)	Resistencia Cilíndrica (kg/cm ²)	Resistencia Cilíndrica Proyectada R _{cc} (kg/cm ²)	Volumen (cm ³)	Densidad (kg/dm ³)	OBSERVACIONES
								Diámetro (cm)	Altura (cm)								
3	TUNEL ACCESO PRINCIPA	0+035,70	NA	NA	16/12/2009	19/12/2009	3,00	10,39	23,05	4,31	84,79	26.288,38	310,06	157,00	1.954,30	2,20	
3	TUNEL ACCESO PRINCIPA	0+035,70	NA	NA	16/12/2009	19/12/2009	3,00	10,41	23,42	4,39	85,11	25.054,52	294,37	157,00	1.993,33	2,20	
3	TUNEL ACCESO PRINCIPA	0+035,70	NA	NA	16/12/2009	19/12/2009	3,00	10,41	23,59	4,32	85,11	26.441,34	310,66	157,00	2.007,79	2,15	

CONFIRMADO POR CONTRATISTA

FIRMA

NOMBRE: Juan Santisteban LC

FECHA: 19-12-09

HORA: 14.00 HS

APROBADO POR SUPERVISION

FIRMA

NOMBRE: EIDIAN GONZALEZ



LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES AREA DE AGREGADOS Y CONCRETOS

EXPEDIENTE 1609
 PETICIONARIO G Y M S.A.
 OBRA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU FASE II
 UBICACION MACHUPICCHU
 FECHA DE RECEPCION 28/10/2009
 FECHA DE CANCELACION 28/10/2009
 FECHA DE EMISION 03/11/2009
 CÓDIGO NTP 339.034-1999
 TITULO HORMIGON (CONCRETO). Metodo de ensayo para el esfuerzo a la compresion de muestras cilindricas de concreto
 Codigo ASTM C39/C39M-2004
 Titulo Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

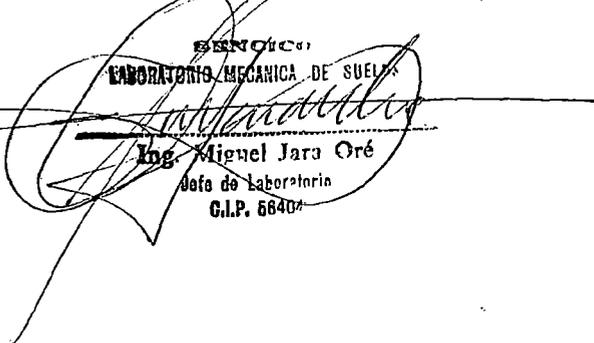
INFORME DE ENSAYO (PAG. 01 DE 01)

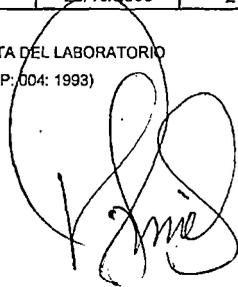
PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESION AXIAL

Nro.de Briquea	Detalle	Fecha Vaciado	Fecha Rotura	RESISTENCIA Kg/cm2
1	AFRONTONAMIENTO DE SHOTCRETE	14-09-09	03/11/2009	272
2	AFRONTONAMIENTO DE SHOTCRETE	14-09-09	25/10/2009	235
3	AFRONTONAMIENTO DE SHOTCRETE	14-09-09	03/11/2009	267
4	AFRONTONAMIENTO DE SHOTCRETE	14-09-09	03/11/2009	249
5	FALSO TUNEL DE GALERIA DE ACCESO A TUNEL	09-10-09	25/10/2009	240
6	FALSO TUNEL DE GALERIA DE ACCESO A TUNEL	09-10-09	25/10/2009	132
7	FALSO TUNEL DE GALERIA DE ACCESO A TUNEL	09-10-09	25/10/2009	211

OBSERVACIONES:

EL PRESENTE DOCUMENTO NO DEBERA REPRODUCIRSE SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO SALVO QUE LA REPRODUCCION SEA EN SU TOTALIDAD (GUIA PERUANA INDECOPI: GP-004: 1993)

SENCICO
 LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

 Ing. Miguel Jara Oré
 Jefe de Laboratorio
 C.I.P. 68407


 Arqu^o DARIO MOGROVEJO NINAN
 FRENTON ZONAL CUSCO
 SENCICO



“Año de la Unión Nacional Frente a la Crisis Externa”

**LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DEL SENCICO
LABORATORIO DE AGREGADOS Y CONCRETO**

INFORME

EXPEDIENTE N° : 41131-A-2010
PETICIONARIO : GyM S.A
ATENCIÓN : ING. JORGE MIRANDA
OBRA : CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU
UBICACIÓN : CUSCO
FECHA DE RECEPCIÓN SOLICITUD : SAN BORJA, 07 DE ENERO DEL 2010
FECHA DE RECEPCIÓN DEL PANEL : SAN BORJA, 07 DE ENERO DEL 2010
FECHA DE CANCELACIÓN : SAN BORJA, 13 DE ENERO DEL 2010 (FACT.No. 040-012445)
FECHA DE EMISIÓN : SAN BORJA, 22 DE ENERO DEL 2010

Código : ASTM C 1018 -1997
Título : *Standard Test Method for Flexural toughness and First Crack Strength of Fiber - Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*

Código : NTP 339.205 - 2007
Título : *HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo estándar para rigidez en flexión y resistencia en fractura inicial del concreto con fibras de refuerzo (usando vigas con cargas en el tramo central).*

I. GENERALIDADES

El *peticionario* solicitó al Laboratorio de Agregados y Concreto de SENCICO, la realización de ensayo para determinación de los índices de Tenacidad en 01 viga moldeada por él mismo, identificada como:
Viga (Muestra de Shotcrete Vía Húmeda)

II. EQUIPOS

Para la realización del presente ensayo, se utilizaron los siguientes equipos:
Deformómetro de carátula de 50 mm de carrera, LC-10/0.1 mm. Número de Serie: 932845112, marca BATTY.
Equipo de Flexión, con capacidad de 11000 lb. Número de Serie: 122331406, marca ELE SOILTEST
Soportes imantados. Número de Serie: 70105-9411, marca MITUTOYO.

III. IDENTIFICACIÓN

VIGA No. 01: Identificada por el *peticionario* como: MUESTRA DE SHOTCRETE VIA HUMEDA

Fecha de Lanzado: 2009/11/25
Fecha de ensayo a flexión: 2010/01/22
Tipo de espécimen: Prismático.
Ancho promedio: 100 mm
Altura promedio: 100 mm
Longitud promedio: 350 mm
Luz libre entre apoyos: 300 mm



“Año de la Unión Nacional Frente a la Crisis Externa”

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DEL SENCICO
LABORATORIO DE AGREGADOS Y CONCRETO

EXPEDIENTE : 41131-A-2010
PETICIONARIO : GyM S.A
FECHA DE EMISIÓN : SAN BORJA, 22 DE ENERO DEL 2010

IV. RESULTADOS :

VIGA No. 01: Identificada por el peticionario como: MUESTRA DE SHOTCRETE VIA HUMEDA

DEFORMACIÓN (mm)	CARGA (lb)						
0,05	400	2,20	2100	4,35	1100	6,50	750
0,10	600	2,25	2000	4,40	1100	6,55	700
0,15	650	2,30	2000	4,45	1100	6,60	700
0,20	900	2,35	2000	4,50	1050	6,65	700
0,25	1500	2,40	1950	4,55	1050	6,70	700
0,30	2000	2,45	1950	4,60	1050	6,75	700
0,35	2700	2,50	1900	4,65	1000	6,80	700
0,40	2800	2,55	1900	4,70	1000	6,85	700
0,45	3000	2,60	1900	4,75	950	6,90	700
0,50	3600	2,65	1900	4,80	950	6,95	700
0,55	4100	2,70	1900	4,85	900	7,00	700
0,60	4900	2,75	1800	4,90	900	7,05	700
0,65	4450	2,80	1800	4,95	900	7,10	700
0,70	4450	2,85	1800	5,00	850	7,15	700
0,75	4450	2,90	1750	5,05	800	7,20	700
0,80	5500	2,95	1750	5,10	750	7,25	700
0,85	5600	3,00	1700	5,15	750	7,30	700
0,90	5500	3,05	1650	5,20	750	7,35	650
0,95	5550	3,10	1600	5,25	750	7,40	650
1,00	5550	3,15	1600	5,30	750	7,45	650
1,05	5450	3,20	1550	5,35	750	7,50	650
1,10	4700	3,25	1500	5,40	750	7,55	650
1,15	4500	3,30	1450	5,45	750	7,60	650
1,20	4400	3,35	1400	5,50	750	7,65	650
1,25	3800	3,40	1300	5,55	750	7,70	650
1,30	3800	3,45	1300	5,60	750	7,75	650
1,35	3500	3,50	1300	5,65	750	7,80	650
1,40	3500	3,55	1300	5,70	750	7,85	600
1,45	3500	3,60	1300	5,75	750	7,90	600
1,50	3800	3,65	1250	5,80	750	7,95	600
1,55	3200	3,70	1250	5,85	750	8,00	600
1,60	3100	3,75	1250	5,90	750	8,05	600
1,65	3050	3,80	1250	5,95	750	8,10	600
1,70	3000	3,85	1250	6,00	750	8,15	600
1,75	2950	3,90	1250	6,05	750	8,20	600
1,80	2750	3,95	1200	6,10	750	8,25	600
1,85	2600	4,00	1200	6,15	750	8,30	600
1,90	2400	4,05	1200	6,20	750	8,35	600
1,95	2200	4,10	1200	6,25	750	8,40	600
2,00	2200	4,15	1150	6,30	750	8,45	600
2,05	2200	4,20	1150	6,35	750	8,50	600
2,10	2100	4,25	1100	6,40	750	8,55	600
2,15	2100	4,30	1100	6,45	750	8,60	600
2,20	2100	4,35	1100	6,50	750	8,65	600



“Año de la Unión Nacional Frente a la Crisis Externa”

**LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DEL SENCICO
LABORATORIO DE AGREGADOS Y CONCRETO**

EXPEDIENTE : 41131-A-2010
 PETICIONARIO : GyM S.A
 FECHA DE EMISIÓN : SAN BORJA, 22 DE ENERO DEL 2010

IV. RESULTADOS :

VIGA No. 01: Identificada por el peticionario como: MUESTRA DE SHOTCRETE VIA HUMEDA

DEFORMACIÓN (mm)	CARGA (lb)	DEFORMACIÓN (mm)	CARGA (lb)
8,65	600	10,80	500
8,70	600	10,85	500
8,75	600	10,90	500
8,80	600	10,95	500
8,85	600	11,00	400
8,90	600	11,05	400
8,95	500	11,10	400
9,00	500	11,15	400
9,05	500	11,20	400
9,10	500	11,25	400
9,15	500	11,30	400
9,20	500	11,35	400
9,25	500	11,40	400
9,30	500	11,45	400
9,35	500	11,50	400
9,40	500	11,55	400
9,45	500	11,60	400
9,50	500	11,65	300
9,55	500	11,70	300
9,60	500		
9,65	500		
9,70	500		
9,75	500		
9,80	500		
9,85	500		
9,90	500		
9,95	500		
10,00	500		
10,05	500		
10,10	500		
10,15	500		
10,20	500		
10,25	500		
10,30	500		
10,35	500		
10,40	500		
10,45	500		
10,50	500		
10,55	500		
10,60	500		
10,65	500		
10,70	500		
10,75	500		
10,80	500		

Fecha de Lanzado : 2009/11/25
 Fecha de ensayo : 2010/01/22

Largo : 35,0 cm
 Ancho : 10,0 cm
 Altura : 10,0 cm



“Año de la Unión Nacional Frente a la Crisis Externa”

**LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DEL SENCICO
LABORATORIO DE AGREGADOS Y CONCRETO**

INFORME

EXPEDIENTE N° : 41131-B-2010
 PETICIONARIO : GyM S.A
 ATENCIÓN : ING. JORGE MIRANDA
 OBRA : CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU
 UBICACIÓN : CUSCO
 FECHA DE RECEPCIÓN SOLICITUD : SAN BORJA, 07 DE ENERO DEL 2010
 FECHA DE RECEPCIÓN DEL PANEL : SAN BORJA, 07 DE ENERO DEL 2010
 FECHA DE CANCELACIÓN : SAN BORJA, 13 DE ENERO DEL 2010 (FACT.No. 040-012445)
 FECHA DE EMISIÓN : SAN BORJA, 22 DE ENERO DEL 2010

I. ENSAYO:

Código : NTP 339.078:2001
 Título : HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del hormigón en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo
 Código : ASTM C 78:2008
 Título : Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third point loading)

IDENTIFICACIÓN	FECHA LANZADO	FECHA ROTURA	Lxbxh mm	CARGA MÁXIMA kg	Mr MPa
VIGA N° 01	2009/11/25	2010/01/22	300x100x100	2545	7,65

VIGA No. 01: Identificada por el peticionario como: MUESTRA DE SHOTCRETE VIA HUMEDA

UBICACIÓN DE LA FALLA: TERCIO CENTRAL NOTA ILUSTRATIVA: 1 MPa = 10 kg/cm²

Donde:

Mr = Módulo de rotura de la viga, en MPa.
 L = Luz libre entre apoyos, en mm
 b = Ancho promedio de la probeta en la sección de falla, en mm
 h = Altura promedio de la probeta en la sección de falla, en mm
 Mr = Módulo de rotura de la viga

OBSERVACIONES:

.Viga moldeada, curada e identificada por el peticionario.
 .El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (GUÍA PERUANA INDECOPI: G004:1993).

TÉCNICO LAC-LEM : J.B.S

Ing. FELIPE GARCÍA BEDOYA
 Jefe del Laboratorio de Ensayo
 de Materiales - SENCICO (e)

FLEXION VIGA 1



“Año de la Unión Nacional Frente a la Crisis Externa”

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DEL SENCICO
LABORATORIO DE AGREGADOS Y CONCRETO

INFORME RESUMEN

EXPEDIENTE N° : 41131-C-2010
 PETICIONARIO : GyM S.A
 ATENCIÓN : ING. JORGE MIRANDA
 OBRA : CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU
 UBICACIÓN : CUSCO
 FECHA DE RECEPCIÓN SOLICITUD : SAN BORJA, 07 DE ENERO DEL 2010
 FECHA DE RECEPCIÓN DEL PANEL : SAN BORJA, 07 DE ENERO DEL 2010
 FECHA DE CANCELACIÓN : SAN BORJA, 13 DE ENERO DEL 2010 (FACT.No. 040-012445)
 FECHA DE EMISIÓN : SAN BORJA, 22 DE ENERO DEL 2010

Código : ASTM C 1018-1997
Título : Standard Test Method for Flexural toughness and First Crack Strength of
 Fiber - Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)

Código : NTP 339.205 - 2007
Título : HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo estándar para rigidez en flexión y
 y resistencia en fractura inicial del concreto con fibras de refuerzo (usando vigas con
 cargas en el tramo central

IDENTIFICACIÓN	I5	I10	I20	R5,10	R10,20
VIGA N° 01	3,3	4,5	5,8	24	13

VIGA No. 01: Identificada por el peticionario como: MUESTRA DE SHOTCRETE VIA HUMEDA

Donde:

I_5, I_{10} e I_{20} : Indices de Tenacidad del concreto

$R_{5,10}$ y $R_{10,20}$: Factores de esfuerzo residual

OBSERVACIONES:

.Viga moldeada, curada e identificada por el peticionario.

.El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad (GUIA PERUANA INDECOPI: G004:1993).

TÉCNICO LAC-LEM : J.B.S

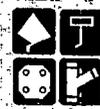
Ing. FELIPE GARCÍA BEDOYA
 Jefe del Laboratorio de Ensayo
 de Materiales - SENCICO (e)

RESUMEN VIGA 1



PERÚ

Ministerio de Vivienda
Construcción y Saneamiento



SENCICO
SERVICIO NACIONAL DE CAPACITACIÓN PARA
LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

“Año de la Unión Nacional Frente a la Crisis Externa”

TENACIDAD VIGA No. 01:
FECHA DE LANZADO: 2009/11/25
FECHA DE ENSAYO: 2010/01/22

Exp.41131-01A-2010
LAC-LEM SENCICO

