



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO Y ENSAYO DE LA NORMA  
COGUANOR NTG 41013 H1 Y H3 (CONCRETO LANZADO)**

**Miguel Andrés Muñoz Calí**

Asesorado por la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, mayo de 2018



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO Y ENSAYO DE LA NORMA  
COGUANOR NTG 41013 H1 Y H3 (CONCRETO LANZADO)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MIGUEL ANDRÉS MUÑOZ CALÍ**

ASESORADO POR LA INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, MAYO DE 2018



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |  |
|------------|--|
| DECANO     | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco     |
| VOCAL I    | Ing. Angel Roberto Sic García          |
| VOCAL II   | Ing. Pablo Christian De León Rodríguez |
| VOCAL III  | Ing. José Milton De León Bran          |
| VOCAL IV   | Br. Oscar Humberto Galicia Núñez       |
| VOCAL V    | Br. Carlos Enrique Gomez Donis         |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López      |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO     | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco   |
| EXAMINADOR | Ing. Marco Antonio García Díaz       |
| EXAMINADOR | Ing. Walter Rolando Salazar González |
| EXAMINADOR | Ing. Alejandro Castañón López        |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López    |



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO Y ENSAYO DE LA NORMA COGUANOR NTG 41013 H1 Y H3 (CONCRETO LANZADO)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, el 24 de febrero de 2016.

**Miguel Andrés Muñoz Calí**



Guatemala, 5 de febrero de 2018

Ingeniero  
José Gabriel Ordoñez Morales  
Área de Materiales y Construcciones Civiles  
COORDINADOR

Ingeniero Ordoñez

Me dirijo a usted para informarle, que he revisado el trabajo de graduación: **VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO Y ENSAYO DE LA NORMA COGUANOR NTG 41013 H1 Y H3 (CONCRETO LANZADO)**, elaborado con el estudiante universitario Miguel Andrés Muñoz Calí, quien contó con la asesoría de la suscrita.

Considerando que el trabajo desarrollado por el estudiante universitario Muñoz Calí, satisface los requisitos exigidos en el reglamento de graduación, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,

*"Id y enseñad a todos"*

  
Inga. Civil Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Col. 5947  
ASESORA





**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala,  
 10 de abril de 2018

Ingeniero  
 Hugo Leonel Montenegro Franco  
 Director Escuela Ingeniería Civil  
 Facultad de Ingeniería  
 Universidad de San Carlos

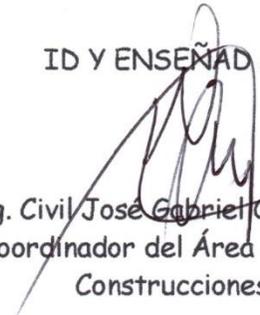
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **VALIDACIÓN DEL METODO DE MUESTREO Y ENSAYO DE LA NORMA COGUANOR NTG 41013 H1 Y H3 (CONCRETO LANZADO)** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Miguel Andrés Muñoz Calí quien contó con la asesoría de la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
 Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales  
 Coordinador del Área de Materiales y  
 Construcciones Civiles



**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**AREA DE MATERIALES Y**  
**CONSTRUCCIONES CIVILES**  
**USAC**

/mrrm.



*Mas de 137 años de Trabajo y Mejora Continua*



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Miguel Andrés Muñoz Calí VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO Y ENSAYO DE LA NORMA COGUANOR NTG 41013 H1 Y H3 (CONCRETO LANZADO) da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo 2018

/mmm.

*Mas de 137 años de Trabajo y Mejora Continua*



Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref.DTG.D.175.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO Y ENSAYO DE LA NORMA COGUANOR NTG 41013 H1 Y H3 (CONCRETO LANZADO)**, presentado por el estudiante universitario: **Miguel Andrés Muñoz Calí**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, mayo de 2018

/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios todopoderoso**

Durante toda mi vida has estado ahí, latente y real en mí, formándome para vivir por ti y para ti, mostrándome tus bondades y amor. Te doy las gracias Dios por darme la vida cada día, y la oportunidad de culminar mi carrera, proceso en el cual en ningún momento me has abandonado.

### **Mis padres**

Mauro Muñoz Andrade y Vilma Elizabeth Calí García de Muñoz, por el apoyo incondicional y sacrificio a lo largo de mi vida y en mis estudios, han sido un ejemplo a seguir. Son las personas más importantes en mi vida y a quienes debo tanto. Gracias por hacerme un hombre de bien.

### **Mis hermanos**

Thelma Elizabeth y Mauro Alexander Muñoz Calí, porque me ayudaron en los tiempos difíciles con su apoyo incondicional, por brindarme confianza, cariño y palabras de aliento para culminar mi carrera.

### **Mis abuelos**

Juana Francisca García Hernández (q.e.p.d.) y Andrés Calí, por su amor y sabios consejos que me brindaron en todo momento, hoy y siempre los llevaré en mi corazón.

**Mi novia**

Jessica Paola Orozco Franco, por ser el apoyo y motivación que me ayudó a culminar mi carrera; por tu tiempo, comprensión, palabras, sonrisas y, sobre todo, por tu inmenso amor. Te amo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por darme la oportunidad de realizar mis estudios y hacerme parte hoy de la misma, en especial a la Facultad de Ingeniería por formarme como ingeniero civil.

**Facultad de Ingeniería**

Por formarme como ingeniero civil.

**CII/Usac**

Por permitirme elaborar cada ensayo de este trabajo de graduación. En especial, al personal de la Sección de Agregados, Concretos y Morteros, por su amistad y gran apoyo durante la realización de mis ensayos.

**Inga. Dilma Yanet  
Mejicanos Jol**

Por brindarme su apoyo, sus consejos y sus conocimientos que me ayudaron para la realización del presente trabajo de investigación.

**Ingenieros**

Luis Mariano Alvarez Muralles y Dario Francisco Lucas Mazariegos, por sus sabias enseñanzas, consejos, apoyo, disciplina y dedicación con el cual realizan su trabajo.

**Mis amigos**

Guillermo Lucero, Julio Alvarez, César Vásquez, Iván Cano, Elder Ramos, Eliezar Chopén, Adrian Rouda, Carlos Suque, Jhonny Simon, Jorge Sipaque, Edson Chojolan, Fernando Cardenas, Kevin Coloma, Roger Calderon, Cristhian Valle, Angel Herdocia, Jorge Tobar y a todos mis amigos y compañeros universitarios que no nombre y que me han brindado su apoyo

**HERGO****Movimientos Masivos S.A.**

Por brindarme el apoyo, sus conocimientos y la oportunidad de utilizar tanto sus instalaciones como el material en Mina Marlín, para poder realizar este trabajo.







|            |   |    |
|------------|---|----|
| 1.2.3.3.   | Agua de mezclado .....  | 16 |
| 1.2.3.4.   | Aditivos químicos .....   | 17 |
| 1.2.3.4.1. | Reductores de agua<br>de bajo rango y alto<br>rango<br>(superplastificantes)..... | 18 |
| 1.2.3.4.2. | Controlador de<br>hidratación .....   | 18 |
| 1.2.3.4.3. | Acelerantes.....  | 19 |
| 1.2.3.4.4. | Fibras de refuerzo.....   | 21 |
| 1.2.3.4.5. | Mallas o barras de<br>refuerzo .....  | 24 |
| 1.2.4.     | Propiedades .....   | 25 |
| 1.2.4.1.   | Docilidad.....  | 25 |
| 1.2.4.2.   | Resistencia a compresión.....   | 26 |
| 1.2.4.3.   | Resistencia temprana .....  | 28 |
| 1.2.4.4.   | Resistencia a la flexión .....  | 29 |
| 1.2.4.5.   | Resistencia a la congelación y<br>descongelación.....                             | 30 |
| 1.2.4.6.   | Tenacidad.....  | 30 |
| 1.2.4.7.   | Densidad (masa / unidad de<br>volumen).....                                       | 32 |
| 1.2.4.8.   | Módulo de elasticidad .....   | 32 |
| 1.2.4.9.   | Retracción por secado (contracción)<br>y por flujo .....                          | 32 |
| 1.2.4.10.  | Fluencia lenta ( <i>creep</i> ) .....   | 33 |
| 1.2.4.11.  | Coefficiente de expansión térmica .....   | 34 |
| 1.2.4.12.  | Durabilidad .....   | 34 |
| 1.2.5.     | Usos generales .....  | 36 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 1.2.5.1.  | Tunelería.....  | 37 |
| 1.2.5.2.  | Minería.....  | 37 |
| 1.2.5.3.  | Edificación.....  | 39 |
| 1.2.5.4.  | Excavaciones para subterráneos y<br>estacionamientos .....              | 39 |
| 1.2.5.5.  | Reparación, restauración y<br>reforzamiento .....                       | 39 |
| 1.2.5.6.  | Relleno de hundimientos o<br>superficies sobreexcavadas .....           | 40 |
| 1.2.5.7.  | Canales, embalses y aliviaderos .....                                   | 40 |
| 1.2.5.8.  | Piscinas y <i>skatepark</i> .....                                       | 40 |
| 1.2.5.9.  | Protección contra el fuego.....   | 41 |
| 1.2.5.10. | Estabilización de taludes .....   | 41 |
| 1.2.5.11. | Refractarios.....   | 41 |
| 1.2.6.    | Consideraciones de diseño .....   | 42 |
| 1.2.6.1.  | Consideraciones de diseño para<br>estructuras de concreto lanzado ..... | 42 |
| 1.2.6.2.  | Consideraciones de diseño para el<br>refuerzo de concreto lanzado ..... | 44 |
| 1.2.7.    | Consideraciones arquitectónicas y de ingeniería ....                    | 48 |
| 1.2.8.    | Diseño de mezcla .....  | 49 |
| 1.2.8.1.  | Diseño de mezclas para piscinas .....                                   | 51 |
| 1.2.8.2.  | Mezclas especiales .....  | 52 |
| 1.2.8.3.  | Solución de problemas en el diseño<br>de mezclas .....                  | 53 |
| 1.2.9.    | Máquinas y equipo que se utiliza .....                                  | 55 |
| 1.2.9.1.  | Equipo para concreto lanzado por vía<br>seca .....                      | 56 |

|         |           |   |    |
|---------|-----------|---|----|
|         | 1.2.9.2.  | Equipo para concreto lanzado por vía húmeda .....   | 58 |
|         | 1.2.9.3.  | Equipos auxiliares.....   | 59 |
| 1.2.10. |           | Dosificación y mezclado .....   | 62 |
|         | 1.2.10.1. | Consistencias de la mezcla .....  | 63 |
| 1.2.11. |           | Aplicación del concreto lanzado .....   | 64 |
|         | 1.2.11.1. | Servicios .....   | 64 |
|         | 1.2.11.2. | Formación y entrenamiento .....   | 66 |
|         | 1.2.11.3. | Seguridad .....   | 66 |
|         | 1.2.11.4. | Concreto lanzado por el método manual.....  | 68 |
|         | 1.2.11.5. | Concreto lanzado por el método robotizado (mecanizado) .....  | 78 |
| 1.3.    |           | Metodología .....   | 86 |
|         | 1.3.1.    | Muestreo COGUANOR NTG 41013 h1 (ASTM C 1385/C1385M-10).....   | 86 |
|         | 1.3.2.    | Preparación y ensayo de especímenes de paneles de muestras de concreto lanzado COGUANOR NTG 41013 h2 (ASTM C 1140/C1140M-11)..... | 87 |
|         | 1.3.2.1.  | Paneles de prueba.....  | 87 |
|         | 1.3.2.2.  | Materiales .....  | 87 |
|         | 1.3.2.3.  | Procedimiento.....  | 88 |
|         | 1.3.2.4.  | Curado.....   | 88 |
|         | 1.3.2.5.  | Obtención y ensayo de especímenes ..  | 88 |
|         | 1.3.3.    | Obtención de núcleos perforados COGUANOR NTG 41013 h2 (ASTM C1604/C1604M-05) .....  | 89 |
|         | 1.3.3.1.  | Núcleos para resistencia a la compresión .....  | 89 |

|      |          |   |     |
|------|----------|---|-----|
|      | 1.3.3.2. | Núcleos para resistencia a la tracción  | 90  |
|      |          | .....   | 90  |
|      | 1.3.4.   | Ensayos .....   | 90  |
|      | 1.3.4.1. | Asentamiento COGUANOR NTG<br>41052 (ASTM C143-08) .....                       | 90  |
|      | 1.3.4.2. | Fluidez (Norma ASTM C939) .....   | 91  |
|      | 1.3.4.3. | Contenido de aire .....   | 91  |
|      | 1.3.4.4. | Resistencia a la compresión<br>COGUANOR NTG 41017 h1 (ASTM<br>C39/C39M).....  | 92  |
|      | 1.3.4.5. | Resistencia a la tracción<br>COGUANOR NTG 41017 h15 (ASTM<br>C496/C496M)..... | 92  |
| 1.4. |          | ACI 506 y la evaluación del grado de testigos .....                           | 93  |
|      | 1.4.1.   | Aseguramiento de calidad.....   | 93  |
| 2.   |          | DESARROLLO EXPERIMENTAL .....   | 95  |
|      | 2.1.     | Elaboración del concreto .....  | 95  |
|      | 2.1.1.   | Equipo de trabajo.....  | 95  |
|      | 2.2.     | Proceso de fabricación .....  | 97  |
|      | 2.2.1.   | Proporción de los materiales.....   | 97  |
|      | 2.2.2.   | Mezclado .....  | 97  |
|      | 2.2.3.   | Lanzado .....   | 98  |
|      | 2.2.4.   | Muestreo.....   | 99  |
|      | 2.2.5.   | Curado .....  | 100 |
|      | 2.2.6.   | Desencofrado .....  | 101 |
|      | 2.2.7.   | Extracción de núcleos .....   | 102 |
|      | 2.3.     | Ensayos de laboratorio .....  | 103 |
|      | 2.3.1.   | Concreto fresco.....  | 103 |

|          |                                    |     |
|----------|------------------------------------|-----|
| 2.3.1.1. | Asentamiento.....                  | 104 |
| 2.3.1.2. | Fluidez.....                       | 105 |
| 2.3.2.   | Concreto endurecido .....          | 105 |
| 2.3.2.1. | Contenido de aire .....            | 106 |
| 2.3.2.2. | Longitud de núcleos.....           | 107 |
| 2.3.2.3. | Resistencia a la compresión .....  | 108 |
| 2.3.2.4. | Resistencia a la tracción .....    | 109 |
| 3.       | ANÁLISIS DE RESULTADOS.....        | 111 |
| 3.1.     | Resumen de resultados .....        | 111 |
| 3.1.1.   | Concreto fresco .....              | 111 |
| 3.1.2.   | Concreto endurecido .....          | 112 |
| 3.2.     | Interpretación de resultados ..... | 115 |
| 3.2.1.   | Concreto fresco .....              | 115 |
| 3.2.2.   | Concreto endurecido .....          | 116 |
|          | CONCLUSIONES .....                 | 119 |
|          | RECOMENDACIONES .....              | 121 |
|          | BIBLIOGRAFÍA .....                 | 123 |
|          | ANEXOS .....                       | 127 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | Equipo de concreto lanzado inventado por Carl Ethan Akeley .....                              | 6  |
| 2.  | Pistola para cemento con doble cámara.....  | 6  |
| 3.  | Concreto lanzado por vía seca.....  | 8  |
| 4.  | Concreto lanzado por vía húmeda.....  | 9  |
| 5.  | Fibras de acero .....   | 22 |
| 6.  | Malla de refuerzo .....   | 24 |
| 7.  | Perno de anclaje con placa .....  | 45 |
| 8.  | Distribución de fibra en la matriz de concreto lanzado.....                                   | 46 |
| 9.  | Máquina de plato rotatorio.....   | 57 |
| 10. | Máquina de plato rotatorio.....   | 58 |
| 11. | Detalles del equipo para concreto lanzado por vía húmeda .....                                | 59 |
| 12. | Equipo controlado por vía remota.....   | 60 |
| 13. | Detalle de la función de la boquilla e ingreso de los materiales del<br>concreto lanzado..... | 61 |
| 14. | Aplicación correcta del concreto lanzado .....  | 72 |
| 15. | Proceso de aplicación de concreto lanzado .....   | 72 |
| 16. | Inclinación de la cuña no menor a 45° .....   | 73 |
| 17. | Ángulo de boquilla y su efecto sobre el rebote .....  | 75 |
| 18. | Señalización de prevención.....   | 79 |
| 19. | Tipos de scaling .....  | 82 |
| 20. | Técnica de proyección por el método robotizado .....  | 84 |
| 21. | Planta central concreto lanzado .....   | 96 |
| 22. | Inspección.....   | 98 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 23. | Proyección concreto .....                          | 99  |
| 24. | Muestreo en paneles .....                          | 100 |
| 25. | Desencofrado .....                                 | 101 |
| 26. | Extracción de núcleos.....                         | 102 |
| 27. | Ensayo de asentamiento .....                       | 104 |
| 28. | Ensayo de fluidez .....                            | 105 |
| 29. | Ensayo porcentaje de absorción .....               | 106 |
| 30. | Ensayo experimental .....                          | 107 |
| 31. | Núcleo cabeceado con azufre.....                   | 108 |
| 32. | Ensayo de compresión .....                         | 109 |
| 33. | Ensayo de tracción .....                           | 110 |
| 34. | Evolución resistencia a compresión .....           | 114 |
| 35. | Evolución de resistencia a tracción indirecta..... | 115 |

## TABLAS

|       |  |    |
|-------|--|----|
| I.    | Comparación tipos de concreto lanzado .....  | 10 |
| II.   | Granulometrías recomendadas.....   | 15 |
| III.  | Clasificaciones aceptables.....  | 15 |
| IV.   | Ensayos para agua de mezclado.....   | 16 |
| V.    | Acelerantes para uso de concreto convencional y concreto lanzado .....                       | 21 |
| VI.   | Clasificación de los tipos de refuerzo.....  | 22 |
| VII.  | Relación agua/cemento (a/c) frente a resistencia .....                                       | 28 |
| VIII. | Resistencias típicas .....   | 28 |
| IX.   | Tenacidad recomendada en minería.....  | 31 |
| X.    | Tenacidad recomendada en obras civiles .....   | 31 |
| XI.   | Consideraciones generales de parámetros para el diseño de mezcla<br>de concreto lanzado..... | 49 |
| XII.  | Volumen de colocación de concreto lanzado .....  | 56 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| XIII. | Porcentajes de rebote .....                                   | 75  |
| XIV.  | Clasificación del grado de testigos de concreto lanzado ..... | 94  |
| XV.   | Resultados ensayos concreto fresco .....                      | 112 |
| XVI.  | Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas.....      | 113 |
| XVII. | Resistencia a tracción indirecta de muestras cilíndricas..... | 114 |



## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b>       | <b>Significado</b>                 |
|----------------------|------------------------------------|
| <b>a/c</b>           | Relación agua cemento              |
| <b>m</b>             | Metro                              |
| <b>cm</b>            | Centímetro                         |
| <b>m<sup>3</sup></b> | Metro cúbico                       |
| <b>°</b>             | Grados                             |
| <b>≥</b>             | Mayor o igual que                  |
| <b>°C</b>            | Grado Celsius                      |
| <b>kg</b>            | Kilogramo                          |
| <b>PSI</b>           | Libra por pulgada cuadrada         |
| <b>±</b>             | Más/menos                          |
| <b>#</b>             | Numeral                            |
| <b>No.</b>           | Número                             |
| <b>Min.</b>          | Mínimo                             |
| <b>Máx.</b>          | Máximo                             |
| <b>Ph</b>            | Potencial hidrógeno                |
| <b>ml</b>            | Mililitro                          |
| <b>mm</b>            | Milímetro                          |
| <b>%</b>             | Porcentaje                         |
| <b>Pulg</b>          | Pulgada                            |
| <b>“</b>             | Pulgada                            |
| <b>ppm</b>           | Partes por millón                  |
| <b>L/D</b>           | Relación longitud diámetro         |
| <b>f'c</b>           | Resistencia de diseño del concreto |

|                          |                              |
|--------------------------|------------------------------|
| <b>MPa</b>               | Megapascal                   |
| <b>GPa</b>               | Gigapascal                   |
| <b>mm/min</b>            | Milímetro por minuto         |
| <b>m<sup>3</sup>/h</b>   | Metro cúbico por hora        |
| <b>m<sup>3</sup>/min</b> | Metro cúbico por minuto      |
| <b>%/ml</b>              | Porcentaje por milímetro     |
| <b>Kg/m<sup>3</sup></b>  | Kilogramo por metro cúbico   |
| <b>Kg/m<sup>2</sup></b>  | Kilogramo por metro cuadrado |
| <b>cm</b>                | Centímetro                   |

## GLOSARIO

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>Adherencia</b> | Esfuerzo que se opone a la separación de dos cuerpos que se hallan en contacto.   |
| <b>Aditivo</b>    | Material activo agregado al concreto en pequeñas cantidades para modificar alguna de sus propiedades por acción física, química o físico-química. |
| <b>Arpillera</b>  | Recubrimiento de tejido que por lo común es de yute fuerte o estopa de cáñamo para defender de polvo y agua.                                      |
| <b>ASA</b>        | Siglas en inglés de la Sociedad Americana de concreto proyectado (American Shotcrete Association).  |
| <b>ASTM</b>       | Siglas en inglés de la Sociedad Americana para el Ensayo e Inspección de los Materiales (American Society for Testing and Materials).             |
| <b>Boquilla</b>   | Pieza final por donde el concreto lanzado es proyectado sobre el sustrato.  |
| <b>CII</b>        | Centro de Investigaciones de Ingeniería.  |

|                  |   |
|------------------|---|
| <b>Cohesión</b>  | Atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de una sustancia.  |
| <b>Curado</b>    | Mantenimiento de un adecuado contenido de humedad y temperatura en el concreto a edades tempranas, de manera que este pueda desarrollar las propiedades para las cuales fue diseñada la mezcla. |
| <b>EFNARC</b>    | Siglas en inglés de la Federación Europea de Asociaciones Nacionales que representan para el concreto (European Federation of National Associations Representing for Concrete).                 |
| <b>Exudación</b> | Movimiento del agua desde el interior de la masa de concreto hacia la superficie, como resultado de la separación del líquido de los materiales sólidos en la mezcla.                           |
| <b>Fluidez</b>   | Propiedad de los cuerpos cuyas moléculas tienen entre sí poca coherencia y toman siempre la forma del recipiente donde están contenidos.  |
| <b>Fraguado</b>  | Fase de una mezcla en la que pasa de un estado plástico a un estado endurecido.   |
| <b>Hastiales</b> | Caras laterales de una excavación o voladura.   |
| <b>Lechada</b>   | Mezcla de cemento, arena fina y agua, que se utiliza para sellar fisuras o grietas en un enladrillado o piso,   |

y así evitar que se filtre el agua hacia las losas o techos y finalmente aparezcan dichas humedades en las habitaciones de una construcción.

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Llana</b>          | Herramienta compuesta de una plancha de hierro o acero y un asa que se utiliza en albañilería para extender y alisar.  |
| <b>Neumática</b>      | Es la técnica que se dedica al estudio y la aplicación del aire comprimido como modo de transmisión de la energía necesaria para mover y hacer funcionar mecanismos. |
| <b>Pitonero</b>       | Persona capacitada encargada del control de la boquilla y por tanto de la proyección del concreto.   |
| <b>Salobre</b>        | Por su naturaleza tiene una determinada salinidad.   |
| <b>Segregación</b>    | Descomposición mecánica del concreto fresco en sus partes constituyentes, cuando el agregado grueso tiene a separarse del mortero.                                   |
| <b>Trabajabilidad</b> | Facilidad con la cual pueden mezclarse los materiales y la mezcla resultante puede manejarse, transportarse y colocarse con poca pérdida de la homogeneidad.         |
| <b>Voladura</b>       | Proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca originan una zona de                   |

alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos (fragmentación y desplazamiento).

## RESUMEN

La presente investigación se enfoca en los conocimientos necesarios sobre el método de muestreo y las propiedades físicas y mecánicas que posee el concreto lanzado, con el fin de determinar si las normas guatemaltecas COGUANOR se encuentran adaptadas al medio nacional para determinar información detallada sobre cómo realizar muestreo, curado y ensayos de laboratorio al concreto lanzado y obtener los resultados exactos.

Para llevar a cabo la investigación se utilizaron dos tipos de concreto lanzado: con refuerzo y sin refuerzo, ambos para determinar si el método de muestreo es el correcto en el medio nacional; también, para determinar sus propiedades en estado fresco; pero únicamente el concreto lanzado sin refuerzo se utilizó para determinar la resistencia del concreto mediante ensayos a compresión y tracción. El muestreo y los ensayos están basados en especificaciones establecidas en las normas COGUANOR y ASTM realizados tanto *in situ* (muestreo) como en el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería (ensayos mecánicos).

Los resultados obtenidos muestran que el método de muestreo indicado en la norma guatemalteca COGUANOR no posee información importante para mejorarlo en cuanto al panel que sirve para recaudar la muestra, pues no indica la forma, la distancia y el ángulo de proyección sobre el panel de prueba como tampoco el ángulo al cual debe estar colocado el panel a la hora de la proyección. Los ensayos a compresión y tracción son procedimientos ya adaptados al medio, obteniendo así resultados favorables con los cuales se puede indicar que son exactos y confiables.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Validar el método de muestreo y ensayos de control de calidad acerca del concreto lanzado.

### **Específicos**

1. Conocer los procedimientos para la obtención de muestras representativas de los materiales a utilizar en el equipo de concreto lanzado.
2. Determinar la resistencia a la compresión de los núcleos perforados del concreto lanzado, por medio del método de ensayo de la Norma COGUANOR NTG 41013 h3.
3. Determinar la resistencia a la tracción de los núcleos perforados del concreto lanzado, por medio del método de ensayo de la Norma COGUANOR NTG 41013 h3.
4. Determinar si los paneles de prueba descritos en la Norma COGUANOR NTG 41013 h2 son idóneos para la proyección de concreto.
5. Determinar el aporte que realiza el refuerzo de fibras metálicas en el concreto lanzado mediante la realización de los ensayos de compresión y tracción indirecta.

6. Determinar si el procedimiento de muestreo indicado en la Norma COGUANOR NTG 41013 h3 se encuentra bien detallada y adecuada a nuestro medio.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día en Guatemala se viene utilizando con mucho éxito el concreto lanzado, cuyo campo de aplicación es variado como el: revestimiento, la estabilización de taludes, pero más enfocado en la minería. El comité ACI 506 lo define como: mortero o concreto aplicado neumáticamente proyectado a alta velocidad sobre una superficie.

El concreto lanzado posee ventajas enormes en su calidad de proceso de construcción y de soporte de rocas; ello sumado al avance en materiales, equipos y conocimientos de aplicación, ha hecho que sea una herramienta muy importante y necesaria para los trabajos de construcción subterránea. Gracias a este tipo de concreto, proyectos que en el pasado eran imposibles de llevar a cabo, son ahora viables. Independientemente del tipo de terreno, hoy en día es posible aplicar esta tecnología en cualquier condición. Por lo tanto, una norma es necesaria para conocer la calidad y capacidad del concreto lanzado bajo estándares nacionales.

Conocer la historia sobre el tema, es importante; por lo que se desglosan: definición, propiedades y métodos (tipos) del concreto lanzado, cada uno con su propia línea de equipos y procedimientos de fabricación y aplicación. Además, se muestra el diseño de mezcla y la de muestreo y ensayos de laboratorio.

La descripción del equipo de trabajo para la elaboración del concreto lanzado por vía húmeda es importante, ya que será utilizado en el desarrollo experimental para los ensayos de laboratorio a concreto fresco y endurecido para

fortalecer esta investigación. Finalmente, se tabulan y analizan los resultados de los distintos ensayos realizados al concreto lanzado.

Dicho estudio tiene la finalidad de establecer la importancia de la validación de una norma al adaptarla al medio para determinar información detallada del procedimiento correcto y adecuado de: muestreo, curado y ensayos de laboratorio al concreto lanzado para obtener resultados exactos y confiables.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Conceptos básicos

Norma es el documento establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido, que proporciona para uso común y repetido, reglas, directrices o características para ciertas actividades o sus resultados, con el fin de conseguir un grado óptimo en un contexto dado. Contiene especificaciones técnicas u otros criterios precisos diseñados para ser utilizados uniformemente como regla general para obtener buenos resultados.

Las normas son el resultado del consenso entre todas las partes interesadas e involucradas en la actividad u producto que es su objeto. En definitiva, contienen criterios precisos que aseguran que los materiales, productos, procesos y servicios están realizados con la calidad necesaria para alcanzar sus objetivos.

La normalización es: “la actividad de establecer, frente a problemas reales o potenciales, disposiciones para uso común y repetido, encaminadas a la obtención del grado óptimo de orden en un contexto dado. Importantes beneficios de la normalización son el mejoramiento de la utilidad de los productos, procesos y servicios para los propósitos asignados, prevención de barreras al comercio y apoyo a la cooperación tecnológica.”<sup>1</sup>. Los conceptos básicos de la normalización son: consenso, apertura, relevancia, transparencia, imparcialidad, coherencia y efectividad.

---

<sup>1</sup> ISO. *Norma ISO/IEC Guide 2:2004*. p. 8.

Metodología de la normalización:

- Investigación bibliográfica e industrial.
- Elaboración de un anteproyecto de norma basándose en los datos obtenidos.
- Confrontación de este anteproyecto con la opinión de los sectores comprador, productor y de interés general, hasta llegar a un acuerdo.
- Promulgación de la norma.
- Confrontación con la práctica.

La norma es un trabajo colectivo programado y elaborado por el organismo normalizador; un organismo reconocido en el ámbito nacional, regional o internacional que tiene entre sus funciones la elaboración, aprobación o adopción de normas que se ponen a disposición del público.

### **1.1.1. Normas COGUANOR**

De conformidad con lo que establece el artículo 1 del Decreto No. 1523, la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) es el organismo nacional de normalización, adscrito al Ministerio de Economía, lo cual se ratifica en el Decreto No. 78-2005, *Ley del sistema nacional de la calidad*. La principal función de COGUANOR es desarrollar actividades de normalización que contribuyan a mejorar la competitividad de las empresas nacionales y elevar la calidad de los productos y servicios que dichas empresas ofertan en el mercado nacional e internacional. Su ámbito de actuación abarca todos los sectores económicos.

Las normas técnicas que COGUANOR elabora, publica y difunde, son de observancia, uso y aplicación voluntarios.

La misión de la Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR es gestionar la normalización técnica y actividades conexas, para propiciar la obtención de productos y servicios de calidad, contribuyendo a mejorar la competitividad y la calidad de vida, así como a generar confianza entre los sectores involucrados.

### **1.1.2. Validación**

Se define como el establecimiento de pruebas documentales que aportan un alto grado de seguridad de que un proceso planificado se efectuará uniformemente en conformidad con los resultados previstos especificados. Los estudios de validación son aplicables a las pruebas analíticas, los equipos, los sistemas y servicios del establecimiento (aire, agua, vapor, entre otros) y procesos.

Los estudios de validación verifican el sistema en estudio y en condiciones de prueba extrema, semejante a las que cabría esperar durante el proceso, a fin de comprobar que dicho sistema está bajo control.

Una vez ya validado cabe prever que permanezca bajo control, siempre y cuando no se realicen cambios en el mismo. Si se producen modificaciones o surgen problemas, o si un equipo se sustituye habrá que efectuar la revalidación. Los equipos y procesos de importancia crítica se revalidan en forma sistemática en intervalos adecuados a fin de demostrar que el proceso sigue bajo control. Hay tres tipos de validación:

- Validación prospectiva: validación que se lleva a cabo durante la etapa de desarrollo cuando se realiza un análisis de riesgo de cada etapa del proceso, el cual se divide en pasos individuales, que son luego evaluados basándose en la experiencia pasada a fin de determinar qué pasos pueden llevar a situaciones críticas.
- Validación concurrente: también denominada revalidación, es aquella que se lleva a cabo durante la manufactura de rutina de un producto a comercializar.
- Validación retrospectiva: validación de un proceso que involucra la evaluación de experiencias pasadas a través de documentación de producción, bajo la condición de que la composición, los procedimientos y los equipos permanezcan sin cambios.

## **1.2. Concreto lanzado**

Es el mortero o concreto transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente a gran velocidad sobre una superficie. La fuerza del chorro, que produce un impacto sobre la superficie, compacta el material.

La Federación Europea de Productores y Aplicadores de productos especiales para estructuras (EFNARC) lo define como: mezcla de cemento, agregados y agua proyectados neumáticamente desde una boquilla dentro de una masa uniforme de concreto. Denominado también por el Comité ACI 506 como: mortero o concreto aplicado neumáticamente, proyectado a alta velocidad sobre una superficie.

El concreto lanzado cuenta con propiedades similares a las de cualquier concreto estructural; la diferencia radica en la característica física, la cual se muestra en su consistencia, que no es totalmente plástica; su utilización en la mayoría de los casos es por razones de costo o conveniencia. Es ventajoso en situaciones en las cuales el encofrado es poco práctico y donde las formas pueden ser reducidas o eliminadas, el acceso a la zona de trabajo es dificultoso, se requieren capas delgadas o grosores variables o las técnicas de colocación normales no pueden ser empleadas. Es un posible ahorro, debido a que este requiere solamente una planta pequeña y portátil para la fabricación y colocación; dichas operaciones a menudo pueden llevarse a cabo en zonas de acceso limitado para realizar reparaciones a estructuras.

La fuerza de agarre o unión del concreto lanzado es a menudo una importante consideración de diseño. La fuerza de impacto de este material neumáticamente impulsado a la superficie, hace que la compactación de la matriz de la pasta de concreto lanzado en las superficies finas e irregulares tenga una buena adhesión. Dentro de ciertos límites, el material es capaz de soportar en sus aplicaciones verticales o elevadas. Una buena aplicación de este concreto se convierte en un concreto estructuralmente sólido y duradero, el cual presenta una excelente adherencia al concreto ya existente, roca, acero, entre muchos otros materiales. Puede tener una alta resistencia, baja absorción, buena resistencia a la intemperie y algunos ataques químicos.

### **1.2.1. Historia**

El primer hito en la historia del concreto lanzado o proyectado ocurrió en 1907 con la máquina inventada por Carl Ethan Akeley en Estados Unidos (figura 1). El científico inventó una máquina de doble cámara presurizada para proyectar mortero por vía seca, en la que el agua era acondicionada en la boquilla a fin de

humedecer el material antes de su consolidación neumática en la superficie en que se aplicaba.

Figura 1. **Equipo de concreto lanzado inventado por Carl Ethan Akeley**



Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 18.

En 1910 se desarrolló y comenzó a utilizar una pistola para cemento con doble cámara, basada en el mismo diseño de Akeley (figura 2).

Figura 2. **Pistola para cemento con doble cámara**



Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 18

El concepto de gunita consistía esencialmente en un mortero utilizado en los años veinte como protección contra el fuego en piques mineros de Estados Unidos. A comienzo de los años treinta nació el término: *shotcrete* (concreto lanzado u hormigón proyectado), difundido por la Asociación Americana de Ingenieros de Ferrocarriles (American Railway Engineering Association), para describir el proceso de gunita. En 1966, el ACI (Instituto Americano del Concreto) adoptó el término *shotcrete* para todas aquellas aplicaciones neumáticas de mortero y concreto incluyendo la vía húmeda y seca.

En los años cuarenta se introdujo el uso de agregado grueso de 10 mm dentro de las mezclas de concreto proyectado. El concreto lanzado por vía húmeda fue el primero que se empezó a utilizar, este tuvo sus inicios en 1955.

A finales de los años sesenta se introdujeron los equipos operados en forma remota. Las primeras fibras como refuerzo para el concreto lanzado fueron utilizadas en 1971 en Norte América y en 1977 los noruegos utilizaron la fibra metálica y los equipos remotos en gran escala. En la actualidad, el desarrollo de esta tecnología ha permitido la introducción en las obras civiles de nuevos equipos, procesos y materiales. La tecnología del concreto lanzado continúa desarrollándose gracias a la creación de nuevos aditivos superplastificantes, el humo de sílice, fibras, materiales refractarios, máquinas de control remoto y otros más. Responde así a nuevos y mayores retos ingenieriles, ampliando su uso para diversos tipos de obras.

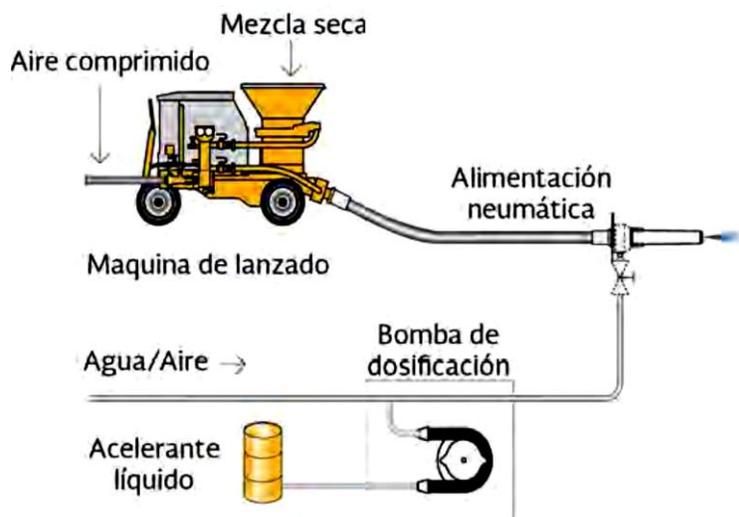
### **1.2.2. Tipos**

El concreto lanzado puede ser aplicado por dos distintas técnicas, según el proceso de proyección: mezcla seca y el de mezcla húmeda o mojada.

### 1.2.2.1. Concreto lanzado por vía seca

Técnica en la que tanto el cemento como los agregados se procesan por lotes y se mezclan mecánicamente sin hidratar el cemento. El material es transportado neumáticamente a través de mangueras o tuberías a la boquilla, en la cual se introduce agua de hidratación antes de la proyección, ya que el interior de la boquilla está provista de un anillo, el cual inyecta agua uniformemente. Este tipo de técnica de concreto lanzado también puede incluir aditivos, fibras o combinación de estos (figura 3).

Figura 3. Concreto lanzado por vía seca



Fuente: VEGA, Carlos. *Concreto lanzado. Shotcrete*. p. 13.

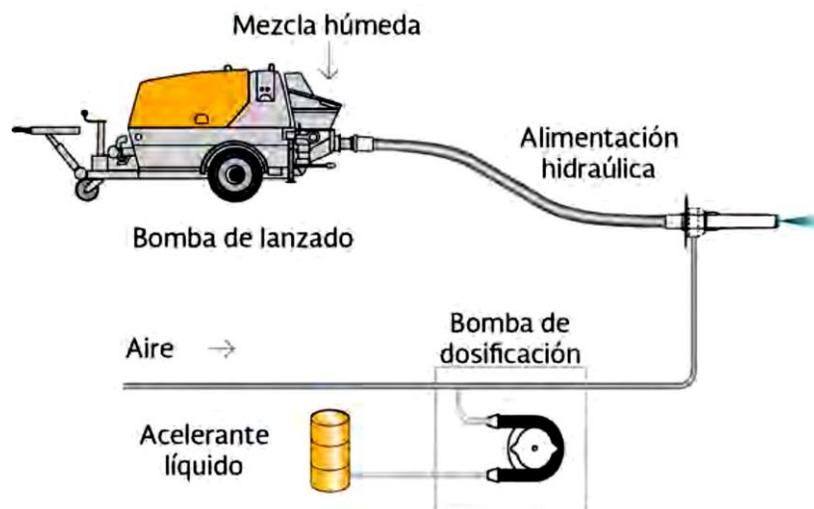
### 1.2.2.2. Concreto lanzado por vía húmeda

Técnica en la que el material cementante, agregados, agua y otros componentes se procesan por lotes y se mezclan juntos en una planta o equipo móvil de mezclado (como se haría para el concreto convencional), para luego ser

transportados y descargados a una bomba en donde la mezcla se transporta a través de tuberías y mangueras a una boquilla, desde la cual se proyecta neumáticamente sobre la superficie.

El aire comprimido se introduce al flujo en la boquilla con el fin de proyectar el material hacia el sustrato. En este tipo de concreto lanzado es usualmente necesario añadir un acelerante (líquido) en la boquilla para acelerar el tiempo de fraguado y ganar una resistencia inicial del concreto en el sustrato (figura 4).

Figura 4. **Concreto lanzado por vía húmeda**



Fuente: VEGA, Carlos. *Concreto lanzado. Shotcrete*. p. 16.

### 1.2.2.3. Comparación de tipos de concreto lanzado

Ambos tipos de concreto lanzado tienen sus ventajas y desventajas, y la selección de uno u otro dependerá de los requisitos del proyecto (tipo de terreno, disposición de materiales, equipos y cantidad a proyectar) y de la experiencia del personal encargado de ejecutarlo.

Sin embargo, las diferencias en el costo del equipo, los requisitos de mantenimiento, las características operativas, las características de colocación y la calidad de los productos pueden hacer que uno de los tipos sea más conveniente para una aplicación en particular. En la tabla I se presenta un cuadro comparativo entre ambos tipos de concreto lanzado.

Tabla I. **Comparación tipos de concreto lanzado**

| <b>Ítem</b>             | <b>Concreto lanzado vía húmeda</b>   | <b>Concreto lanzado vía seca</b>  |
|-------------------------|--|---|
| <b>Equipamiento</b>     | Bajo costo de mantenimiento.<br>Mayor costo inicial.   | Alto costo de mantenimiento.<br>Menor costo inicial.  |
| <b>Mezclado</b>         | Mezcla exacta en planta por lotes.<br>Se puede utilizar concreto premezclado en planta.<br>Acepta agregados húmedos.                           | Mezclado en el lugar de colocación o en planta de predosificado.<br>Entrega por lotes en pequeñas o grandes cantidades.<br>Rendimiento afectado por humedad de los agregados limitado usualmente a un máximo del 6 %.<br>Requiere mayor mano de obra. |
| <b>Cantidad de agua</b> | Controlada en la planta y se mide al momento de la dosificación.   | El agua es controlada por el operador o por el equipo robotizado mediante la boquilla para cumplir con las condiciones de campo variables.  |
| <b>Rendimiento</b>      | Moderada a alta tasa de colocación de 3 a 10 m <sup>3</sup> /h para proyección manual y hasta de 25 m <sup>3</sup> /h con equipo robotizado.   | Baja tasa de colocación usualmente de 1 a 6 m <sup>3</sup> /h.  |
| <b>Rebote</b>           | Bajo rebote generalmente se encuentra dentro del rango del 5 % al 15 % este valor depende de la mezcla, el diseño y la aplicación de la misma. | Generalmente un alto porcentaje de rebote dentro del rango sobre 30 % hasta 60 % este valor depende de las condiciones del lugar y aplicación.  |
| <b>Adherencia</b>       | Resistencia a la adherencia muy baja, sin embargo, son a menudo más altas que la de un concreto convencional.                                  | Resistencia a la adherencia muy alta.   |

Continuación de la tabla.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Inclusión de aire y resistencia a la congelación y descongelación</b> | La inclusión de aire es posible. Posee una resistencia aceptable tanto para la congelación como para la descongelación. | El uso de inclusores de aire no son beneficios. Su resistencia tanto para la congelación como para la descongelación es pobre.  |
| <b>Calidad del concreto lanzado</b>                                      | Calidad consistente.  | Potencialmente una mayor variabilidad de calidad en el lugar de la colocación o proyección.   |
| <b>Transporte a través de ductos o tuberías</b>                          | Distancias cortas de transporte (hasta 200 m) dependiendo de condiciones, equipos y mezcla.                             | Distancias mayores de transporte (hasta 500 m) con equipos adecuados.   |
| <b>Aplicaciones</b>  | Tiene una mayor adaptación a altos volúmenes de aplicación.   | Tiene una mayor adaptación a bajos volúmenes de aplicación. Es ideal para iniciar y detener operaciones sin dificultad además que es adecuado en lugares de acceso remoto o cuando la entrega de concreto premezclado es logísticamente compleja. |

Fuente: elaboración propia.

### **1.2.3. Materiales**

Los materiales, proporciones de mezcla y las propiedades del concreto lanzado son similares en muchos aspectos a los concretos convencionales. El concreto lanzado se encuentra constituido por materiales cementantes, árido fino, árido grueso (hasta 10 mm), agua, aditivos y eventualmente con adiciones finas complementarias.

#### **1.2.3.1. Materiales cementantes**

Son aquellos que puesto en estado plástico (mediante la adición de agua u otro disolvente) tienen la función de unir fragmentos minerales entre sí, para formar así una estructura cohesiva, resistente y durable.

#### **1.2.3.1.1. Cemento Portland**

Los requisitos del cemento para el concreto lanzado son iguales a los del concreto convencional. El cemento Portland debe cumplir con los requisitos de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales bajo la norma ASTM C-150 para el tipo I o II. Cuando el concreto lanzado esta expuesto a suelo o agua con alto contenido en sulfatos solubles, se debe de utilizar tipo II o V. El cemento premezclado debe cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C-595; tipo IP o IS y resistencia moderada a los sulfatos, pueden ser especificadas mediante el uso del sufijo MS a la designación del tipo. Cuando los requisitos estructurales requieren una alta resistencia temprana se deben considerar los requisitos de la Norma ASTM C-150 para el cemento tipo III.

El cemento de bajo contenido de álcalis debe especificarse cuando los áridos utilizados son considerados químicamente reactivos con los álcalis que posee el cemento. El cemento Portland con incorporadores de aire se ha utilizado en el concreto lanzado vía húmeda y se han logrado resultados variados. En general, no se recomienda el uso del cemento Portland con incorporadores de aire, ya que el contenido de aire se ve afectado por factores externos como lo son la presión del aire, longitudes de la manguera y el tipo de equipo a utilizar.

#### **1.2.3.1.2. Puzolana**

Cuando esta se añade a una matriz o mezcla de cemento Portland, la puzolana reacciona con el hidróxido de calcio y agua que produce así más gel de silicato de calcio. En consecuencia el concreto lanzado con puzolana puede exhibir un rendimiento mejorado de resistencia a largo plazo y baja permeabilidad. La puzolana se puede agregar al concreto lanzado vía húmeda para mejorar su trabajabilidad, capacidad de bombeo, aumentar la resistencia al

ataque de sulfatos y reducir la expansión causada por la reacción álcali-sílice. La utilización de cenizas volantes facilita el bombeo para largas distancias.

El reemplazo de puzolana por el cemento Portland debe ser cuidadosamente considerado, esto porque el desarrollo de resistencia a temprana edad se retrasa. Las puzolanas se deben ajustar bajo la Norma ASTM C-618. Las puzolanas naturales y cenizas volantes no son utilizadas en el concreto lanzado vía seca. Sin embargo, el humo de sílice se utiliza a menudo en este y no retrasa el desarrollo de resistencia.

#### **1.2.3.1.3. Humo sílice (microsílice)**

Es una forma de sílice amorfa, es un material extremadamente fino, el humo de sílice se condensa de los gases de escape que forman diminutas partículas esféricas. El material es más del 85 % de dióxido de sílice, es aproximadamente 100 veces más fino que el cemento Portland y tiene una gravedad específica que va desde 2,1 a 2,6.

Los beneficios del humo de sílice en el concreto lanzado incluyen: mayor durabilidad con la reducción de la permeabilidad, debido a su tamaño (las partículas del humo de sílice llenan los huecos microscópicos entre el cemento); reducción de rebote; mejora la adherencia a los sustratos; mejora en la capacidad de bombeo reduciendo el desgaste en la bomba y en la boquilla; y en la cohesión de la mezcla, lo que permite la proyección (lanzamiento) de capas más gruesas.

La adición de humo de sílice a la mezcla del concreto lanzado vía húmeda debe realizarse de manera conjunta con la adición de plastificantes, ya sean normales o de gama alta, ya que sin el uso de estos se precisarán grandes adiciones de agua para mantener un nivel adecuado de trabajabilidad y, por lo

tanto, el agua adicional incrementa la relación agua-cemento ( $a/c$ ) y afecta los beneficios de la adición del humo de sílice. Por otro lado, no se recomienda el uso de plastificantes cuando se adiciona el humo de sílice para el concreto lanzado vía seca, ya que la mezcla total está en contacto con agua solamente en el momento de que sale de la boquilla hasta su impacto a la superficie, esto hace hundimientos en la superficie.

### **1.2.3.2. Áridos**

Los agregados deben cumplir con la Norma ASTM C-33. Cada árido a utilizarse en la mezcla debe de tener una clasificación de acuerdo con la granulometría recomendada, ya sea por el proveedor o comprador. Generalmente, el uso de arenas más finas da como resultado una mayor retracción, mientras que en el uso de arenas gruesas resulta en un aumento de rebote.

Es necesario que los áridos propuestos para ser utilizados en el concreto lanzado hayan sido previamente ensayados para determinar sus propiedades con las normas pertinentes, antes de aceptar su uso.

Este debe cumplir con la granulometría en la que se puede tener granulometrías o bandas combinadas para concreto lanzado recomendadas por el ACI (American Concrete Institute), EFNARC (European Federation of National Associations Representing for Concrete) y la norma Austriaca (tabla II). A continuación, se muestran los límites de clasificación aceptables (tabla III).

Una clasificación uniforme es esencial, tanto el árido grueso como el fino deben ser dosificados por separado para evitar la segregación.

Tabla II. **Granulometrías recomendadas**

| Malla |      | EFNARC      | ACI 506 – G1 | ACI 506 – G2 | Austria     |
|-------|------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| ASTM  | mm   | Min. – Máx. | Min. - Máx.  | Min. - Máx.  | Min. – Máx. |
| #100  | 0,15 | 6 -16       | 2 - 10       | 2 - 10       | 6 – 12      |
| #50   | 0,30 | 14 – 32     | 10 - 30      | 8 - 20       | 10 – 17     |
| #30   | 0,60 | 26 – 56     | 25 - 60      | 20 - 35      | 21 – 29     |
| #16   | 1,20 | 41 – 76     | 50 - 85      | 35 - 55      | 33 – 44     |
| #8    | 2,40 | 59 – 92     | 80 - 98      | 50 - 70      | 50 – 60     |
| #4    | 4,75 | 77 - 100    | 95 - 100     | 70 - 85      | 70 – 80     |
| 3/8”  | 10   | 93 - 100    | 100          | 90 - 100     | 90 – 97     |
| 5/8”  | 16   | 100         | --           | 100          | 100         |

Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 42.

Tabla III. **Clasificaciones aceptables**

| Malla |      | Porcentaje que pasa |                 |                 |
|-------|------|---------------------|-----------------|-----------------|
|       |      | Clasificación 1     | Clasificación 2 | Clasificación 3 |
| ASTM  | mm   | Min. – Máx.         | Min. – Máx.     | Min. – Máx.     |
| ¾”    | 19   | --                  | --              | 100             |
| ½”    | 13   | --                  | 100             | 80 – 95         |
| 3/8”  | 10   | 100                 | 90 – 100        | 70 – 90         |
| #4    | 4,75 | 95 – 100            | 70 – 85         | 50 – 70         |
| #8    | 2,40 | 80 – 100            | 50 – 70         | 35 – 55         |
| #16   | 1,20 | 50 – 85             | 35 – 55         | 20 – 40         |
| #30   | 0,60 | 25 – 60             | 20 – 35         | 10 – 30         |
| #50   | 0,30 | 10 – 30             | 8 – 20          | 5 – 17          |
| #100  | 0,15 | 2 – 10              | 2 - 10          | 2 – 10          |

Fuente: ASTM. *Norma ASTM C-33*. p. 4.

La clasificación No. 1 se debe utilizar si se desea una mezcla de mortero. Las clasificaciones No. 2 y No. 3 contienen áridos gruesos; el último es similar a 19 mm convencional (3/4") tamaño máximo nominal, exceptuando por una reducción en los áridos gruesos para reducir el rebote.

El agregado fino que se utiliza para un acabado y otras aplicaciones especiales puede ser más fino que la clasificación No. 1. Es de vital importancia que los áridos propuestos para ser utilizados en el concreto lanzado hayan sido analizados para determinar su contenido de sales, cloruros y sulfatos para su uso.

### 1.2.3.3. Agua de mezclado

La calidad del agua a utilizarse puede tener un efecto muy importante en el comportamiento del concreto lanzado. Dicha agua debe ser obtenida de una fuente de calidad aceptable si es posible; si no está disponible se necesitarán todas las pruebas y/o ensayos necesarios para determinar su calidad (tabla IV).

Tabla IV. **Ensayos para agua de mezclado**

| <b>Ensayo</b>               | <b>Límite partes por millón (ppm)</b> |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| Sólidos en suspensión       | Máx. 3 000 ppm                        |
| Materia orgánica            | Máx. 3 ppm                            |
| Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) | Máx. 600 ppm                          |
| Cloruros (Cl)               | Máx. 1 000 ppm                        |
| Ph                          | 5 - 8                                 |

Fuente: elaboración propia.

Los sólidos disueltos pueden afectar el comportamiento y la durabilidad del concreto lanzado. Solamente cuando sea necesario se debe utilizar agua refrigerada o calentada para el control de la temperatura del concreto durante el mezclado. Debe ser limpia y estar libre de sustancias que puedan ser nocivas al concreto y acero. No existe ningún requisito especial para el tratamiento del agua de mezclado, únicamente que pueda ser de consumo humano.

#### **1.2.3.4. Aditivos químicos**

Debido a las limitaciones en el equipo del concreto lanzado, el uso de aditivos químicos no es de la misma manera que en un concreto convencional. Estos aditivos intervienen en un porcentaje mínimo del volumen total de la mezcla pero modifican algunas características del comportamiento del concreto lanzado y dan lugar a toda una gama de concretos modernos y especiales.

Cuando se desean incorporar dos o más aditivos a la mezcla se deben probar su compatibilidad antes de su uso para evitar efectos no deseados. Los aditivos que son añadidos a la boquilla deben ser abastecidos a la mezcla por algún sistema mecánico calibrado en proporciones que no excedan el máximo recomendado por el fabricante o por el proyecto.

El uso de aditivos químicos a la mezcla tiene una efectividad decreciente inversamente proporcional al aumento de la edad de la mezcla. Los aditivos principales se utilizan para mejorar algunos aspectos del comportamiento del concreto lanzado: capacidad de bombeo, control de fraguado e hidratación y resistencia. Estos aditivos principales se enumeran a continuación:

#### **1.2.3.4.1. Reductores de agua de bajo rango y alto rango (superplastificantes)**

Los reductores de agua de bajo rango se utilizan para mejorar la trabajabilidad y/o reducir la relación agua/cemento; además, pueden tener otros efectos como el retraso en su inicio de fraguado, en el cual puede ser necesaria la opinión de un experto y/o los ensayos pertinentes para verificar este comportamiento. Hay que advertir que el ajuste de la mezcla puede ser demoroso luego de su inclusión en la mezcla.

Los reductores de agua de alto rango son utilizados para aumentar la resistencia final, por su manejo en bajas relaciones de a/c, o para aumentar la trabajabilidad de una mezcla sin perder resistencia. Gracias al desarrollo tecnológico se puede disponer de superplastificantes que permiten utilizar relaciones de agua/cemento muy inferiores a las comunes, logrando así mayores resistencias, mejor trabajabilidad y bombeo. Los superplastificantes normalmente solo se añaden al concreto lanzado vía húmeda. Las proporciones, dependiendo del tipo de superplástificante, generalmente varían entre 0,5 % a 2 % en peso del material cementante (siempre es importante respetar las indicaciones del fabricante al respecto).

#### **1.2.3.4.2. Controlador de hidratación**

Debido a que el concreto lanzado puede ser transportado en distancias consideradas o mantenido en un estado plástico por un número de horas o días, se requiere la adición de aditivos especiales para mantener la trabajabilidad adecuada. El proceso de hidratación del cemento ocasiona una rápida reducción de la trabajabilidad debido a la formación de cristales de silicato de calcio

hidratado para evitar este proceso se pueden incorporar un aditivo de control de hidratación comúnmente conocido como: estabilizador, el cual cubre los granos de cemento y detiene temporalmente el proceso normal de hidratación.

La hidratación del concreto lanzado puede ser reactivada con la adición de un acelerante de fraguado. La pérdida de asentamiento sigue aún con el uso de un aditivo estabilizador. El concreto debe ser remezclado antes de su uso para superar la posible segregación que pudo ocurrir durante el tiempo que estuvo en reposo. El uso del aditivo estabilizador debe estar sujeto a ensayos de desempeño y compatibilidad.

#### **1.2.3.4.3. Acelerantes**

Estos se utilizan principalmente para ayudar a la colocación del concreto lanzado, mediante la aceleración del fraguado normal de la mezcla aportando la aceleración del desarrollo de resistencia inicial. Estos son esenciales en algunas aplicaciones como el soporte de túneles, donde la acumulación rápida de la sección y el desarrollo rápido de su resistencia son necesarios. Muchos aceleradores reducen el tiempo de fraguado de 28 días entre un 25 % a 40 % dependiendo de la compatibilidad del acelerante con el cemento.

Entre algunas ventajas en la utilización de acelerantes se incluyen: reducción en el desprendimiento y deslizamiento; aumento de los espesores de capa (especialmente en proyecciones por encima de la cabeza del lanzador) y el aumento de velocidad de la construcción. Los acelerantes para el concreto lanzado deben de ser del tipo *álkali-free* (libre de álcalis) y no cáustico, ya que el *álkali-free* tiene aproximadamente un  $\text{Ph} = 3$ , el cual permite un entorno de trabajo más seguro para los operadores en comparación con los acelerantes con un  $\text{Ph}$  entre 11 a 13.

Los acelerantes tienen efectos diferentes, los cuales dependen de su química, la química del cemento y el índice de dosificación de la mezcla. Se debe tener en cuenta que se deben realizar pruebas para establecer la compatibilidad del acelerador con el cemento a utilizarse, también, para determinar la cantidad de acelerador que se necesitará. La dosis de acelerante varía generalmente entre el 3 % y el 8 % en peso del cemento. Los aceleradores se suministran normalmente en forma líquida aunque también están disponibles en forma de polvo. Se añaden al concreto en la tobera o en la manguera de distribución de concreto lanzado vía húmeda y se añaden en el recipiente o en la boquilla para concreto lanzado vía seca.

No se deben confundir los acelerantes del concreto lanzado con los acelerantes de hidratación de uso común para concreto normal. Las dos clases de acelerantes comprenden claramente distintos grupos de productos químicos con diferentes vías de reacción y diferentes efectos sobre la velocidad de fraguado, hidratación y sobre la durabilidad de la matriz del concreto y en algunas ocasiones sobre la corrosión del acero de refuerzo. A continuación, se muestra una lista de acelerantes disponibles para concreto normal (convencional) y para concreto lanzado (tabla V). Se debe tener en cuenta que tanto los acelerantes basados en aluminato de calcio y en sulfato de aluminio promueven la rápida formación de cristales de etringita como mecanismo de refuerzo en concreto lanzado a edades tempranas.

Este producto de hidratación puede comprometer la durabilidad de la matriz del concreto contra el ataque de los sulfatos y, por lo tanto, se debe utilizar la cantidad mínima de acelerante para adaptarse a las necesidades operacionales de la proyección.

Tabla V. **Acelerantes para uso de concreto convencional y concreto lanzado**

| Clase / categoría                     | Compuesto activo                                   | Características  |
|---------------------------------------|--|--|
| <b>Químicos para concreto normal</b>  |  |  |
| Cloruro de calcio                     | CaCl <sub>2</sub>                                  | Relativamente rápido, aumenta la exudación y retracción por secado, promueve la corrosión del acero.                 |
| Nitrato de calcio                     | CaNO <sub>3</sub>                                  | Seguro, pero relativamente lento, aumenta la retracción.   |
| Trietanolamina                        | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>3</sub>     | Seguro, pero relativamente lento, aumenta la retracción.   |
| <b>Químicos para concreto lanzado</b> |  |  |
| Hidróxidos                            | NaOH, KOH  | Altamente cáustico, dañino para los ojos.  |
| Carbonatos                            | NaCO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Altamente cáustico, dañino para los ojos.  |
| Aluminatos de sodio                   | NaAlO <sub>2</sub>                                 | Cáustico, promueve la rigidización mediante la formación de gel.   |
| Silicato de sodio                     | NaO + nSiO <sub>2</sub>                            | Altamente cáustico, dañino, promueve la rigidización a través de la formación de gel.                                |
| Aluminato de calcio                   | CaO – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | No cáustico, ligeramente alcalino y seguro, conocido como tipo 1 <i>alkali-free</i> , acelerante en base de polvo.   |
| Sulfato de aluminio                   | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>    | No cáustico, ligeramente ácido y seguro, conocido como tipo <i>alkali-free</i> , acelerante en base líquido o polvo. |

Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 37.

#### 1.2.3.4.4. Fibras de refuerzo

Son “filamentos alargados y esbeltos en forma de manojo, malla o hebra de material natural o manufacturado, que puede ser distribuido a través del concreto fresco”<sup>2</sup>.

La Norma ASTM C-1116 clasifica las fibras para concreto normal y uso en concreto lanzado de acuerdo al tipo de material (tabla VI).

<sup>2</sup> ASTM. Norma ASTM C-1116. p. 2.

Tabla VI. **Clasificación de los tipos de refuerzo**

| <b>Clasificación</b> | <b>Descripción</b>   |
|----------------------|--|
| Tipo I               | Fibras de acero (inoxidable, de aleación o al carbón).   |
| Tipo II              | Fibras de vidrio (pueden sufrir el ataque de los álcalis, a menos que sean especialmente producidas como resistentes a estos). |
| Tipo III             | Fibras sintéticas (polipropileno de homopolímero virgen, otros materiales deben poseer historial de durabilidad).              |

Fuente: ASTM. *Norma ASTM C-1116*. p. 2.

Cada tipo de fibra cuenta con ventajas y desventajas que, en general, no son del todo conocidas por el proyectista y en ocasiones provocan confusión a la hora de escoger el sistema más adecuado. Las fibras contribuyen a repartir y transmitir los esfuerzos provocados por las deformaciones cuando el concreto se agrieta. Las fibras pueden ser cortas (hasta 65 mm de largo) y delgadas (menos de 1 mm de diámetro), por lo general de gran capacidad a la tracción (figura 5).

Figura 5. **Fibras de acero**



Fuente: elaboración propia.

Estas pueden añadirse para mejorar la resistencia al impacto o controlar la retracción, pero su función principal es proporcionar capacidad de carga después de la fisuración del concreto lanzado. Generalmente, no aumentan resistencia a la tracción o a la flexión de la matriz cuando se utilizan dosificaciones normales. Dentro de los beneficios de las fibras en comparación con el uso del refuerzo de malla de acero se incluye una distribución más uniforme del refuerzo a lo largo del concreto lanzado, resulta más económico en términos generales, reduce el rebote y mejora la compactación.

El concreto lanzado con fibra también puede seguir el perfil irregular sobre la roca, lo cual le otorga más eficiencia que el refuerzo con malla; que evitan también la vibración de la malla que puede conducir a una pérdida de unión con el sustrato. Las características de las fibras que afectan el comportamiento del concreto lanzado son:

- Relación de aspecto (longitud total respecto al diámetro)
- Resistencia a la tracción
- Forma & dosis ( $\text{kg/m}^3$  de concreto lanzado)

Sin embargo, si el comportamiento posterior a la fisura del concreto es relevante, entonces, el criterio principal que se debe especificar es la tenacidad.

Las fibras en general se pueden clasificar como estructural (acero y macrofibras sintéticas) y no estructural (microfibras sintéticas). Generalmente las microfibras sintéticas son utilizadas solamente para controlar el agrietamiento por retracción plástica, también, son útiles para reducir el rebote. Además, contribuyen a la liberación de gases y a reducir el agrietamiento del concreto lanzado cuando este es sometido a cargas de fuego. La dosificación de las fibras

se encuentra generalmente en aproximadamente 1 a 2 kg/m<sup>3</sup> de concreto proyectado.

#### **1.2.3.4.5. Mallas o barras de refuerzo**

El refuerzo de acero se utiliza en situaciones donde se requiere que el concreto lanzado resista esfuerzos de tracción. Cuando se utilicen mallas electrosoldadas como refuerzo se deberá tener especial cuidado durante la proyección para evitar la creación de vacíos detrás de la malla que pueden provocar la corrosión de esta o reducción de la adherencia entre la malla y el concreto. Además en combinación con el concreto lanzado, las barras de anclaje suelen ser un tipo de sostenimiento; sin embargo, su utilización deja de ser atractiva cuando los trabajos de perforación para su instalación se dificultan y resultan problemáticos. El tamaño de malla recomendado para cualquier calibre de barra es un mínimo de 50 x 50 mm o 100 x 100 mm de espaciado de la cuadrícula o superior (figura 6).

**Figura 6. Malla de refuerzo**



Fuente: elaboración propia.

Debe tenerse presente que se obtiene una estructura más robusta cuando el acero de refuerzo está diseñado y colocado para causar la menor interferencia con la colocación del concreto. Se debe utilizar diámetros de barra reducidos para ayudar al encapsulamiento con el concreto, siendo normalmente 16 mm el diámetro máximo; cuando se requieran barras de mayor diámetro se debe tomar un cuidado especial en envolver la barra con el concreto.

El refuerzo debe ser apoyado y mantenerse alejado de la superficie a proyectar a una distancia mínima de 25 mm, pero siempre de acuerdo con los requisitos especificados en los planos de diseño. Para evitar la vibración de las barras de acero durante la proyección del concreto estas deben de ser amarradas rígidamente en su lugar. Si se logra un efectivo encapsulamiento de las barras, mallas u otros elementos que logran que el concreto embeba al refuerzo, los elementos del concreto lanzado pueden ser diseñados de acuerdo con las normas de diseño en concreto armado conocidas, como ACI 318.

#### **1.2.4. Propiedades**

Las propiedades del concreto lanzado se pueden especificar y medir utilizando los siguientes parámetros.

##### **1.2.4.1. Docilidad**

Es obtenido mediante el ensayo de asentamiento de cono y corresponde al descenso del concreto en estado plástico, el que se ha colocado en el cono de metal normalizado y después de que el cono ha sido llenado (sin compactar) y levantado verticalmente de acuerdo con las Norma ASTM C-143. La docilidad es una magnitud que en la práctica normal del concreto se utiliza como indicador aproximado de trabajabilidad. Para el concreto lanzado este parámetro no debe

utilizarse como un indicador de la capacidad de bombeo o la capacidad de proyección de una mezcla, ya que el asentamiento de una mezcla es principalmente un indicador de la regularidad y uniformidad en las proporciones de la mezcla entre lotes o despachos. La magnitud absoluta del asentamiento requerido para una mezcla de concreto lanzado no es un indicador confiable de la calidad general o la idoneidad de esa mezcla para ser proyectada.

El asentamiento de concreto lanzado en particular dependerá de las características del proyecto. En general, las mezclas de asentamiento más bajas (60 – 100 mm) son más adecuadas para aplicaciones en las que no se utilizan aditivos aceleradores de fraguado y las mezclas con asentamientos mayores (180 – 220 mm) son más adecuadas para aplicaciones en las que si se utiliza un acelerador de fraguado. Si se utilizan acelerantes el asentamiento debe de ser optimizado de acuerdo a las necesidades operacionales. La adición de fibras puede reducir el asentamiento. El asentamiento de una mezcla se verá afectada por la temperatura ambiente, el tiempo transcurrido desde el mezclado, la granulometría (especialmente el porcentaje de finos y limo presente en los materiales) y los aditivos incluidos.

#### **1.2.4.2. Resistencia a compresión**

Esta es la propiedad específica para el concreto lanzado simple. Su resistencia a la compresión es la resistencia a una fuerza aplicada axialmente. Esta propiedad en concreto endurecido es uno de los muchos indicadores de la calidad. Dicha resistencia puede utilizarse como una medida indirecta de otras propiedades mecánicas de la mezcla, ya que la resistencia a la compresión está indirectamente relacionada con otras propiedades como el nivel de compactación, tenacidad, permeabilidad y la durabilidad; por lo tanto, no debe ser tomada como una guía exclusiva de la calidad del concreto.

Es importante distinguir entre la resistencia a la compresión del concreto lanzado tal como se suministra antes de la proyección en comparación con su comportamiento ya colocado. La resistencia de una mezcla puede verse afectada por muchas variables durante el proceso de colocación como la temperatura, la adición de acelerantes, una proyección y compactación deficiente o el curado inadecuado. La resistencia a la compresión de un concreto lanzado debe estar diseñado basado en el comportamiento en obra de la mezcla ya proyectada y los testigos tomados *in situ* son la medida más apropiada de esta propiedad; sin embargo, estos requieren una preparación y posterior reparación de la misma, por lo que los testigos perforados desde un panel son un sustituto adecuado. La resistencia de concreto lanzado nunca debe ser determinada en moldes cilíndricos, ya que hay una excesiva recolección de rebote en los mismos.

La diferencia de resistencia entre el concreto suministrado y el concreto proyectado es un tema que debe ser considerado en el diseño; generalmente, se tolera una variación del 20 % entre un cilindro tomado de la mezcla de concreto suministrado y un testigo tomado de un panel de ensayo de concreto lanzado utilizando la misma mezcla. La diferencia en la resistencia a la compresión será menor cuando no se utilice acelerante. Dicha resistencia debe ser determinada por extracción de testigos a diferentes edades tomados desde un panel sobre el cual se ha proyectado el concreto.

La resistencia a la compresión de concreto lanzado endurecido es altamente dependiente de la relación a/c (tabla VII). Dicha relación por vía húmeda normalmente oscila entre 0,4 para la aplicación civil y subterránea hasta un 0,65 para piscinas. Valores en el orden de 0,35 se pueden conseguir mediante el uso de reductores de agua de alto rango. Para vía seca la relación se encuentra dentro del rango de 0,3 a 0,5, pero puede variar ampliamente debido a la incertidumbre en el control del agua por parte del pitonero.

Tabla VII. **Relación agua/cemento (a/c) frente a resistencia**

| <b>Resistencia a los 28 días<br/>(f'c en kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Relación agua/cemento<br/>(a/c)</b> |
|---|--|
| 250   | 0,45                                   |
| 300   | 0,43                                   |
| 350   | 0,41                                   |
| 400   | 0,38                                   |

Fuente: Dirección General de Servicios Técnicos. *Manual de diseño y construcción de túneles de carretera 2016*. p. 15.

Para concreto lanzado vía húmeda la resistencia a la compresión (sin acelerante) oscila entre 20 MPa y 70 MPa a los 28 días. A continuación, se muestran algunas resistencias típicas en diversas aplicaciones recomendadas por la American Shotcrete Association de Australia (tabla VIII).

Tabla VIII. **Resistencias típicas**

| <b>Aplicación</b>      | <b>Rango de resistencia (MPa)</b> |
|------------------------|-----------------------------------|
| Piscinas               | 25 – 30                           |
| Subterráneos y bodegas | 30 – 40                           |
| Revestimiento de túnel | 30 – 50                           |

Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 30.

### **1.2.4.3. Resistencia temprana**

El concreto lanzado para soporte de rocas o suelos especialmente en túneles debe alcanzar resistencia mínima a una edad temprana, a menudo dentro de las primeras horas después de la proyección. La resistencia temprana indica

tener una resistencia en un momento anterior a los 28 días especificados para concretos convencionales.

Los testigos y los cilindros no son adecuados para determinar la resistencia a una temprana edad; por esta razón, existen varios métodos indirectos que se han ideado con el fin de proporcionar la resistencia a edad temprana. Un ejemplo es el penetrómetro, el cual se utiliza empujando una sonda o aguja en una superficie de ensayo recién proyectada, pero no directamente en el sector que no cuenta con soporte. Debe tenerse el cuidado de calibrar las lecturas del penetrómetro con valores reales.

#### **1.2.4.4. Resistencia a la flexión**

El concreto lanzado está sometido a momentos flectores en la mayoría de sus aplicaciones, por ejemplo, en estabilizaciones de talud, recubrimiento de túneles o piscinas. Si el comportamiento a flexión es importante es más apropiado medir directamente dicha resistencia en lugar de estimar dicho valor basado en relaciones entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión.

La resistencia a la flexión de la matriz del concreto también se le conoce como módulo de ruptura y corresponde a la tracción teórica máxima que se alcanza en la fibra extrema en tracción de una viga de ensayo bajo carga puntual. Dicha tensión se determina considerando una distribución elástica de la tensión a través de la sección transversal de la viga. La resistencia a la flexión en concreto lanzado es por general alrededor de 7 % a 15 % de la resistencia a la compresión para la mezcla, tanto en vía húmeda como en seca y puede aumentar con la edad.

La resistencia a la flexión se mide típicamente usando una viga cargada en los tercios y se basa en la carga alcanzada para la formación de la primera fisura. La capacidad de carga más allá de la primera fisura se asocia con la contribución del refuerzo y puede medirse utilizando ensayos de tenacidad según Norma ASTM C-1550.

#### **1.2.4.5. Resistencia a la congelación y descongelación**

Esta resistencia en el concreto lanzado vía húmeda se garantiza mediante el arrastre de un sistema de vacío de aire adecuado; una mezcla con un sistema apropiado de vacío de aire debe tener un contenido de aire de 8 % a 12 %. Muchas de las aplicaciones del concreto lanzado vía seca se comportan bien cuando se someten a congelación y descongelación suaves, ya que este tipo de concreto lanzado tiene dificultad para arrastrar el aire y crear un sistema de vacío de aire adecuado.

#### **1.2.4.6. Tenacidad**

Es una medida de la resistencia después de la fisuración del concreto lanzado reforzado con fibra. Es una propiedad relevante cuando se espera que la estructura esté sometida a deformaciones o desplazamientos importantes después del agrietamiento. Se determina como el área bajo la curva carga/deflexión para una probeta. Dicha propiedad se ve afectada principalmente por el contenido y tipo de fibra; también, puede ser fuertemente influenciada por la resistencia y la calidad de la matriz del concreto. El método más utilizado para medir la tenacidad del concreto lanzado reforzado con fibras es por medio de un panel redondo como se describe en la Norma ASTM C-1550.

En aplicaciones de minería donde no solo se permiten deformaciones y anchos de fisuras importantes, sino que a veces es visto como un indicador de la conveniencia económica del sistema de soporte. Por el contrario, en aplicaciones de ingeniería civil, debido a la necesidad de mantener los anchos de fisura en un mínimo para asegurar la durabilidad, los valores de las tensiones de diseño se definen para los anchos de fisuración relativamente bajos de las pruebas de absorción en vigas. Los valores mínimos en aplicaciones de ingeniería y para aplicaciones de ingeniería civil (ambas recomendadas por la American Shotcrete Association y la Asociación de Shotcrete de Australia) se muestran a continuación (tabla IX y X, respectivamente).

Tabla IX. **Tenacidad recomendada en minería**

| Tipo de soporte                   | Absorción (medido en panel ASTM C 1550 con 40 mm de deflexión) |
|-----------------------------------|--|
| No estructural o baja deformación | 280 Joules   |
| Soporte moderado                  | 360 Joules   |
| Alto nivel de soporte             | 450 Joules   |

Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 31.

Tabla X. **Tenacidad recomendada en obras civiles**

| Deformación | Absorción  |
|-------------|--|
| Pequeña     | 3 MPa resistencia residual<br>(3 mm de deflexión medido en Norma Europea EN 14488-3) |
| Grande      | 400 Joules<br>(40 mm de deflexión medido en Norma ASTM C 1550)                       |

Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 31.

#### **1.2.4.7. Densidad (masa / unidad de volumen)**

Es un indicador de la calidad del concreto lanzado, su densidad normal suele estar entre 2 200 y 2 400 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, la densidad no es un buen indicador del nivel de compactación a menos que se disponga de datos para un diseño de la mezcla específico. La variación entre la densidad de concreto ya proyectado en comparación con la de probetas del mismo concreto, proporciona una indicación de la calidad de la proyección y debiera ser mayor a 98 %. El efecto de una compactación insuficiente del concreto lanzado puede ser una reducción significativa en la resistencia a la compresión y a la flexión (aproximadamente 4 % por cada 1 % de contenido de vacíos). Una compactación inadecuada se refleja en una baja densidad del concreto proyectado comparada con la del concreto medida en probetas.

#### **1.2.4.8. Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad ( $E_c$ ) a menudo llamada módulo de Young es una medida de la rigidez mecánica del concreto lanzado, el cual se sitúa generalmente entre 25 – 30 GPa a una edad de 1 año. El concreto lanzado con acelerante es generalmente menos rígido que el concreto, al cual no se le adiciona. El módulo de elasticidad se ve afectado por el tipo de agregado grueso utilizado en una mezcla, pero es difícil de controlar y, por lo tanto, rara vez se especifica en aplicaciones de concreto lanzado.

#### **1.2.4.9. Retracción por secado (contracción) y por flujo**

Ambas retracciones se originan en la misma fuente: la pasta de cemento hidratada; sus curvas deformación-tiempo son muy similares; los factores que

influyen en una también influyen en la otra y generalmente de la misma forma; su microdeformación es grande ( $400$  a  $1\ 000 \times 10^{-6}$ ) por lo cual no puede ser ignorada en el diseño estructural; y ambas pueden ser parcialmente reversibles. Tanto la deformación de retracción por secado como por el flujo en el concreto, se suponen estar relacionadas principalmente con la remoción de agua absorbida de la pasta de cemento hidratada. Su diferencia se encuentra en que en un caso la humedad relativa diferencial entre la del concreto y la del medio ambiente es la fuerza conductora, mientras que en el otro caso es un esfuerzo sostenido aplicado.

La retracción por secado es una medida de la reducción en su longitud, a lo largo de una dimensión lineal; está influenciada por el contenido de agua de la mezcla, el tipo y tamaño de los agregados y las proporciones de la mezcla. Las causas de la retracción por flujo son más complejas y se acepta en general que además de los movimientos de humedad. La retracción por secado se reduce en concreto lanzado con agregado grueso y aumenta en concreto lanzado sin agregado grueso o concreto lanzado con un rebote alto. El concreto lanzado que contiene humo de sílice tiene una tendencia a exhibir más contracción antes de la fijación que el concreto sin humo de sílice. Se deben implementar algunos procedimientos para prevenir el agrietamiento por retracción plástica. La alta retracción por secado experimentada por el concreto lanzado comparado con un concreto convencional de bajo asentamiento puede requerir de juntas de control más cercanas.

#### **1.2.4.10. Fluencia lenta (*creep*)**

Es la deformación en el tiempo de un material bajo carga, se expresa comúnmente como una proporción respecto a la deformación unitaria a corto plazo producto de la deformación elástica.

La fluencia lenta en flexión del concreto lanzado no está necesariamente relacionada con la fluencia del mismo material sometido a compresión, especialmente después que se ha producido la fisuración. Para mezclas de concreto lanzado con una relación a/c baja se puede esperar una deformación por fluencia lenta similar a la exhibida por concretos tradicionales de buena calidad; para relaciones de a/c altas la deformación por fluencia lenta bajo un determinado nivel de tensión también será mayor.

#### **1.2.4.11. Coeficiente de expansión térmica**

Es la magnitud en la que el concreto lanzado se expande o se contrae cuando la temperatura aumenta o disminuye, su valor generalmente se requiere para realizar cálculos de control de grietas en particular para aplicaciones a altas temperaturas (ej. revestimientos refractarios). Este coeficiente varía directamente con el coeficiente de expansión térmica del agregado grueso y depende del contenido de sílice (entre mayor sea el contenido de sílice mayor será el coeficiente de expansión térmica del agregado).

#### **1.2.4.12. Durabilidad**

Describe la capacidad del concreto lanzado para resistir las influencias agresivas dentro del entorno de servicio a que está expuesto. Entre dichas influencias se tiene: el clima, las temperaturas extremas, el agua de mar, el contacto con productos químicos o el impacto o abrasión.

El uso de altas dosis de acelerantes en el concreto lanzado puede ser perjudicial para su durabilidad pero a su vez puede ser beneficioso para reducir los efectos de los ciclos de congelación y descongelación. La resistencia del concreto lanzado vía seca frente al ciclo hielo/deshielo puede ser mayor que la

del concreto lanzado vía húmeda si se mantienen bajos los niveles de relación a/c. La incorporación de un agente incorporador de aire en el concreto lanzado vía húmeda puede reducir este comportamiento pero una gran cantidad del aire presente durante la mezcla se pierde en la proyección del concreto. Entre las consideraciones de durabilidad se tiene:

- Contenido de cloruro y sulfato: las principales preocupaciones debido a la presencia de cloruros son los efectos adversos sobre la corrosión de los refuerzos de acero y el aumento de la retracción por secado. Un nivel alto de sulfatos en el concreto lanzado puede provenir de la composición de los materiales componentes. Los efectos adversos más frecuentes por el alto contenido de sulfatos están en la solidez de la matriz del concreto, los tiempos de fraguado y en la resistencia a edades tardías.
- Permeabilidad: es una medida de la resistencia del concreto lanzado al paso de gases o líquidos, desafortunadamente es difícil de medir, por lo cual se utilizan parámetros como la profundidad de penetración de agua a través de una muestra de concreto después de un período dado de exposición para indicar la permeabilidad relativa.
- Absorción de agua: es una medida indirecta del volumen de vacíos en el material, pueden realizarse diversas pruebas en relación con el contenido de huecos en el concreto lanzado y si es posible también especificar los valores máximos. Estas pruebas se especifican para comprobar el grado de compactación del concreto lanzado *in situ* (por lo general, se realizan en testigos extraídos de paneles de prueba).
- Reactividad álcali-sílice (ASR): esta reacción ocurre normalmente entre los constituyentes de sílice reactiva dentro del agregado y los álcalis en el

cemento. Esta reacción se traduce en un gel de álcali-sílice que se forma ya sea en planos de debilidad o poros en el agregado o en la superficie de las partículas del agregado. La ASR puede afectar la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento hidratada circundante. El gel se embebe de agua y puede hincharse causando la expansión y la fracturación del agregado y posiblemente la fisuración del concreto.

- Unión al sustrato: la resistencia de la unión al sustrato depende de muchas variables, incluyendo el tipo y la condición del sustrato. La superficie a proyectar debe estar limpia sin residuos para maximizar el desarrollo de la adherencia (preparación por hidrolavado promueve una mayor capacidad de adherencia) en tanto que, en algunas aplicaciones el uso de agente promotor de adherencia también puede mejorar dicha capacidad. Se debe evitar la resistencia de adherencia mínima entre el concreto lanzado y un sustrato adyacente, debido al carácter indeterminado de la mayoría de los sustratos. Es más racional especificar un método de preparación de la superficie para que maximice el desarrollo de adherencia del concreto lanzado con el sustrato.

### **1.2.5. Usos generales**

El concreto lanzado juega hoy en día un papel esencial en la industria de la construcción civil y minera. Es un material versátil, que puede ser fácil y rápidamente aplicado transformándose en un medio rentable para la construcción. Posee una excelente adherencia a múltiples sustratos, incluyendo roca, concreto y acero. A medida que el concreto lanzado endurece y gana resistencia, deformaciones subsecuentes generan un aumento significativo de resistencia, ya que el concreto lanzado se vuelve también más rígido. Un

concreto lanzado correctamente diseñado y aplicado permanece en su lugar sin hundimiento inclusive en paredes verticales.

Los equipos remotos son utilizados generalmente en aplicaciones subterráneas, lo cual permite una operación segura manteniendo alejado al operador del sector sin fortificar. Estas ventajas han dado lugar a que el concreto lanzado sea utilizado en un sin número de aplicaciones, algunas de las cuales se describen a continuación, agrupadas en áreas generales de aplicación.

#### **1.2.5.1. Tunelería**

El concreto lanzado puede ser utilizado como revestimiento final o como soporte temporal. En revestimientos finales puede encontrarse en muchos proyectos, usado en combinación con pernos de anclaje, cables, concreto con fibras y marcos de acero. Los espesores pueden variar entre 50 mm hasta 500 mm, pueden ser aplicados en múltiples capas. Como soporte temporal es diseñado para proporcionar un soporte estructural temprano; puede ir seguido de una segunda capa que entrega el soporte permanente. La tecnología del concreto lanzado ha desarrollado y mejorado los sistemas de impermeabilización y se ha convertido en un importante método de soporte para la construcción subterránea. También, se puede aplicar como delgados revestimientos sin refuerzo para alisar la superficie del sustrato (roca) y, por lo tanto, reducir la resistencia al flujo de aire.

#### **1.2.5.2. Minería**

Las primeras aplicaciones mecanizadas de concreto lanzado en minería fueron efectuadas sobre malla y pernos instalados en áreas de suelos de mala calidad. Sin embargo, el concreto lanzado reforzado con fibra está reemplazando

progresivamente a la malla de acero como principal método de soporte de suelo en la minería, debido a las siguientes razones:

- El nivel del soporte de suelo utilizando fibra y el postapernado excede en muchos casos significativamente el nivel de soporte logrado con pernos y mallas.
- Se produce un incremento en la seguridad al no tener la exposición de personas en zonas no fortificadas.
- Se reduce significativamente la necesidad de rehabilitación del sistema de soporte de suelo.
- Aumento de la disponibilidad de equipos mecanizados para la proyección del concreto.
- El concreto lanzado es aplicado durante el ciclo de desarrollo, después de la voladura y antes de la instalación de los pernos de anclaje, de esta manera, el uso de la malla no se requiere. Esto resultó en que las planchuelas fueran instaladas en los pernos sobre las capas de concreto lanzado, proporcionan así una óptima adherencia entre el concreto y el sustrato. Otro desarrollo que ha mejorado el desempeño del concreto lanzado en el soporte al suelo y roca es el *hydro-scaling* que es un lavado con agua a alta presión mejorando la adherencia hasta en un 300 % en algunas aplicaciones.

El desempeño de las capas del concreto lanzado se puede mejorar con un aumento de los espesores de las capas aplicadas y/o con un incremento de la

dosis de fibra. En zonas sísmicamente activas en algunas minas se está instalando malla sobre la capa final proporcionando así un soporte adicional.

### **1.2.5.3. Edificación**

El concreto lanzado tiene una larga historia de aplicación en la construcción de edificios, por ejemplo, en muros estructurales en subterráneos. También, ha sido utilizado como una alternativa para construir y moldear paneles *tilt-up* y en silos; existe una vasta experiencia en estas aplicaciones en USA y Australia.

### **1.2.5.4. Excavaciones para subterráneos y estacionamientos**

El concreto lanzado juega un papel importante en el soporte de excavaciones o cuando se requieren cortes verticales. Junto con los pernos se logra avanzar con los muros a medida que avanza el proceso de excavación que deja un muro permanente que puede ser utilizado estructuralmente.

### **1.2.5.5. Reparación, restauración y reforzamiento**

El concreto lanzado es muy utilizado en la rehabilitación de estructuras dañadas. Típicas aplicaciones son la reparación de concreto deteriorado por la corrosión o el fuego. La reparación y restauración tienen lugar después que las zonas afectadas han sido debidamente identificadas y preparadas. Estructuras típicas que se reparan con el uso de concreto lanzado son: puentes, represas, torres, puertos, edificios y estructuras de acero.

Las estructuras de concreto pueden ser reforzadas con el concreto lanzado, por ejemplo, donde la construcción haya dejado nidos. Puede ser utilizado

también cuando un elemento estructural necesita aumentar su tamaño con el propósito de incrementar la capacidad de carga; entre estos elementos se tienen vigas, columnas, losas, muros de albañilería, tanques y tuberías.

#### **1.2.5.6. Relleno de hundimientos o superficies sobreexcavadas**

El concreto lanzado puede ser utilizado eficientemente para el relleno de áreas sobreexcavadas o hundimientos. A diferencia de los métodos tradicionales con un moldaje lateral, al utilizar concreto lanzado no se expone al personal a condiciones peligrosas, además, presenta ventajas logísticas de acceso y construcción.

#### **1.2.5.7. Canales, embalses y aliviaderos**

Los embalses y canales pueden ser construidos excavando hasta la forma requerida y luego proyectando concreto directamente sobre el suelo o roca expuesta. El concreto lanzado tiene la capacidad de ser colocado, compactado y afinado en un solo paso, si es necesario, en casos que se requiera un acceso rápido, variedad de formas o revestimientos muy gruesos.

#### **1.2.5.8. Piscinas y *skatepark***

Estas estructuras recreacionales son buenos ejemplos de la diversidad de formas que pueden construirse con concreto lanzado. Dichas estructuras son construidas excavando acorde a la forma requerida y reforzando según sea necesario con proyección de concreto. Las construcciones con este método son económicas, durables y resistentes.

#### **1.2.5.9. Protección contra el fuego**

El uso de concreto lanzado como material para la protección contra el fuego es común y puede ser una excelente solución especialmente en plantas químicas y refinerías.

Este proceso puede incluir el revestimiento de estructuras de acero o un incremento en los espesores del concreto de recubrimiento. Por otra parte, el concreto lanzado puede ser diseñado incorporando microfibras sintéticas para minimizar el desprendimiento de materias primas granulares bajo condiciones de calor extremo. Las altas temperaturas derriten estas microfibras permitiendo que el vapor de agua viaje a través de los vacíos que quedan y se disipe en la superficie, por ende, reduciendo la presión interna.

#### **1.2.5.10. Estabilización de taludes**

El concreto lanzado es ampliamente utilizado para la estabilización y protección en suelos y rocas. Debido a su alta resistencia al corte y buena adherencia a la roca, el concreto lanzado fortalece el sustrato, llenando vacíos y grietas y, por lo tanto, evita que la roca suelta se desprenda.

#### **1.2.5.11. Refractarios**

Se pueden revestir o reparar hornos de todo tipo con mezclas especiales con concreto lanzado que contienen materiales como cementos con alto contenido de aluminato y ladrillos refractarios triturados. Una de las principales ventajas del concreto lanzado refractario es que puede ser colocado rápidamente en altos volúmenes en áreas poco accesibles, por ejemplo, una chimenea elevada o zonas remotas de un horno.

## **1.2.6. Consideraciones de diseño**

El enfoque general del concreto lanzado es similar al del concreto convencional o estructural; se toman en consideración aspectos de estabilidad, resistencia, desempeño en condiciones de servicio, durabilidad, resistencia al fuego, impermeabilidad y otros requisitos de diseño.

### **1.2.6.1. Consideraciones de diseño para estructuras de concreto lanzado**

Un concreto lanzado durable es aquel que, sin deterioro, soporta las condiciones para las cuales fue diseñado durante su vida útil:

- Diseño por condiciones de estabilidad: se deben considerar todos los posibles movimientos de la estructura como un cuerpo rígido, incluyendo volcamiento (relevante para estructuras auto soportantes), levantamiento (también llamado flotación, es relevante para estructuras enterradas sujetas a una presión hidrostática por el exterior), pandeo y deslizamiento (importante principalmente para estructuras sometidas a una componente de carga horizontal). Algunas estructuras pueden estar sometidas a una combinación de los movimientos antes mencionados como es el caso de los muros de contención que están expuestas a volcamiento y deslizamiento.
- Diseño por condiciones de resistencia: el uso previsto determinará los requisitos de desempeño que el concreto lanzado debe alcanzar; esto puede variar entre un rol netamente estructural hasta aplicaciones no resistentes como un acabado arquitectónico. Las interacciones del concreto lanzado con las cargas y los materiales que soporta pueden ser

complejas y en muchos casos no es posible en la práctica moldearlas o analizarlas satisfactoriamente, por esto, se han desarrollado métodos analíticos para el diseño del concreto lanzado bajo condiciones de resistencia. Sin embargo, el objetivo general común es lograr una adecuada resistencia frente a las cargas que supere las solicitaciones impuestas con un margen de seguridad establecido. La estructura y sus componentes deben ser diseñados para tener una resistencia adecuada, las solicitaciones se determinan utilizando códigos o guías. Las mediciones de resistencia se obtienen a partir de ensayos: resistencia a la compresión, flexión, absorción de energía y resistencia residual.

- Diseño por condiciones de servicio: las condiciones de servicio describen la capacidad de una estructura para seguir siendo adecuada para una finalidad prevista durante toda su vida de diseño. En conjunto con las condiciones de resistencia, el concreto lanzado puede requerir satisfacer ciertas condiciones de servicio como los límites en las deflexiones y en el ancho de grietas (también denominado diseño por tensiones admisibles, son generalmente mucho más pequeños que los considerados para los métodos de diseño por resistencia). Otros criterios de servicios comúnmente aplicados a estructuras de concreto lanzado incluyen: estanqueidad, deformación por fluencia, apariencia, acabado superficial y resistencia a la abrasión.
- Diseño por resistencia al fuego: algunas aplicaciones del concreto lanzado pueden incluir requisitos establecidos en códigos de construcción de cada país o por el mandante para lograr una determinada resistencia al fuego durante un período mínimo de tiempo. Este requisito generalmente toma la forma de una limitación a la pérdida de resistencia, de capacidad de funcionamiento u operación a la transmisión de calor y/o humo.

- Diseño por condiciones de durabilidad: los requisitos de durabilidad para la matriz de concreto se satisfacen mediante el control del diseño de la mezcla a través de medidas como: limitar la máxima relación a/c, la mínima cantidad de cemento o la máxima permeabilidad aceptable. Los requisitos de durabilidad para el acero de refuerzo son normalmente satisfechos mediante la limitación del espesor de las fisuras en servicio a 0,3 mm y la garantía de que la matriz de concreto cumpla con los requisitos y las características especificadas para la categoría de exposición adecuada. Los espesores máximos aceptables de fisura para el concreto lanzado reforzado con fibra sintética pueden ser mucho más grandes que el usado para el refuerzo de acero.

#### **1.2.6.2. Consideraciones de diseño para el refuerzo de concreto lanzado**

Hay tres enfoques para considerar el refuerzo utilizado en el concreto lanzado estructural:

- Concreto lanzado sin refuerzo: en aplicaciones que implican solicitaciones exclusivamente de compresión, o sin cargas solicitantes significativas, puede ser apropiado evitar el uso de refuerzo. Tales sistemas estructurales manifestarán muy baja resistencia a la tracción y muy baja ductilidad, por lo cual se debe evitar el desarrollo de solicitaciones por tracción en la estructura.
- Concreto lanzado con refuerzo convencional: comprende elementos continuos como: barras de acero, mallas de barras, mallas de alambre electrosoldado, cables de postensado y otros materiales como barras o mallas de compuestos plásticos reforzados con fibra. Los pernos de

anclaje a menudo introducen una carga puntual elevada sobre el revestimiento de concreto, la que necesita ser anclada al revestimiento utilizando el refuerzo como parte del conjunto. Dichas fuerzas pueden ser distribuidas en el revestimiento más eficazmente si se coloca una placa de dimensiones adecuadas al perno o se utiliza una serie de barras de refuerzo inclinadas en el extremo del perno, la cual debe quedar encapsulada dentro del revestimiento de concreto lanzado reforzado con fibras. La placa debe ser externa a la capa estructural del concreto para que sea eficaz y puede ser cubierta posteriormente con concreto lanzado no estructural (figura 7).

Figura 7. **Perno de anclaje con placa**

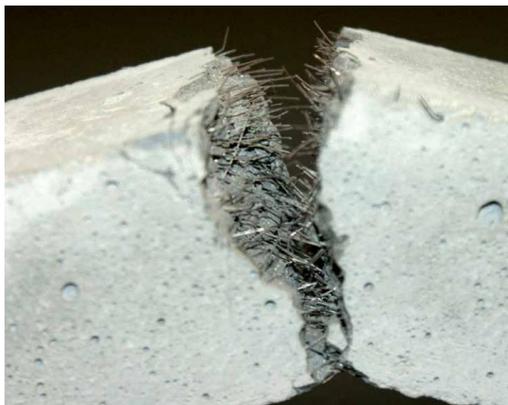


Fuente: elaboración propia.

- Concreto lanzado con fibra de refuerzo: comprende elementos discretos cortos, distribuidos uniformemente a través de la masa del concreto (figura 8). Pueden ser introducidas al concreto por razones distintas al refuerzo estructural como el control de rebote y de la fisuración por retracción plástica y para mejorar la resistencia al fuego. Un aspecto importante en las aplicaciones civiles es la combinación entre la proporción de fibra y el espesor del concreto como aplicación para alcanzar la absorción de

energía requerida. Las fibras de refuerzo proporcionan tenacidad (capacidad de carga después del agrietamiento) y no una mayor resistencia a la tracción o a la flexión del concreto no fisurado. En un diseño el sistema estructural con concreto lanzado se diseña de manera idealizada para no agrietarse, pero debido a su complejidad e incertidumbre inherente a algunos sistemas estructurales sigue existiendo la posibilidad de una subestimación de las solicitaciones; por lo que la tenacidad es crucial para mantener la seguridad y capacidad de servicio global del sistema.

Figura 8. **Distribución de fibra en la matriz de concreto lanzado**



Fuente: SIKA AG. *Concreto. Concreto reforzado con fibras*. p. 1.

Además de las consideraciones antes mencionadas en obras civiles subterráneas, se toman en cuenta las siguientes:

- Cargas aplicadas: es un factor determinante para el diseño del concreto lanzado; estas se determinan típicamente utilizando el método desarrollado por Terzaghi para el análisis de cuña o con programas computacionales especializados basados en un análisis de elementos

finitos. En suelos fracturados, las cargas se determinan a menudo utilizando formas y masas idealizadas de suelo inestable que actúan como una carga distribuida en el revestimiento.

- Diseño considerando parámetros geotécnicos: un consultor geotécnico o ingeniero especializado debe evaluar la influencia que puedan tener las tensiones medidas o previstas, la estructura, las discontinuidades y los posibles deslizamientos o deformaciones en el tiempo. El perfil de la excavación y su tamaño pueden afectar la especificación de concreto proyectado, en su resistencia y espesor.

El mayor desarrollo del hormigón proyectado se ha dado en la construcción de túneles, en donde es una herramienta vital para algunos métodos de construcción, donde se proyectan grandes superficies con espesores no muy importantes. Uno de los métodos empleados para la fabricación de túneles con hormigón proyectado es el de marcos reforzados con hormigón lanzado. Este es una práctica integral de soporte para terrenos blandos. Otro método empleado con el mismo principio, es el reforzamiento con armaduras, que consiste en la creación de un cerchado de acero que va recubierto con una capa de hormigón proyectado que evita el desprendimiento de pequeñas rocas y a su vez sella la cara del túnel. Entre los factores de diseño más importantes están:

- Parámetros geotécnicos
- Interacción con otros elementos de soporte del suelo
- Flujos de agua subterránea
- Requerimientos de terminación de las superficies
- Abrasión
- Temperatura y humedad
- Disponibilidad y despacho de materias primas

### **1.2.7. Consideraciones arquitectónicas y de ingeniería**

El concreto lanzado ofrece ventajas sobre el concreto convencional en muchos tipos de trabajos de construcción y reparación, debido principalmente a que necesita menos trabajo de encofrado y requiere una pequeña planta para mezclado y colocación en áreas más inaccesibles.

Es un concreto con agregado pequeño que forma una mezcla relativamente seca, la cual se consolida a través de la fuerza de impacto y se puede colocar tanto en superficies verticales como horizontales. Una propiedad importante del concreto lanzado es su facilidad para formar una excelente adherencia con varios materiales que forman así un material sólido y durable.

Si la superficie a la cual será proyectado el concreto está limpia pero áspera este tendrá una adherencia gracias al impacto que crea así una masa densa, cohesiva, la cual penetrará irregularmente en la interface con la superficie sobre la que se lanzó. El concreto lanzado se adhiere gracias a los efectos combinados de cohesión, succión e intrusión. La superficie a la cual será proyectado el concreto deberá ser humedecida antes de su aplicación, ya que después de ser lanzado se lleva a cabo una reacción química, la cual da como resultado el endurecimiento del cemento para unir entre sí las masas. A continuación, se muestran algunos materiales y sus respectivos aspectos a tener en cuenta cuando se coloca concreto lanzado sobre estos:

- Madera: la madera se debe cubrir con el papel empleado en la construcción para evitar adherencia sobre la madera.
- Acero galvanizado: el concreto lanzado no se adhiere al acero recubierto de zinc.

- Aluminio: hay inconveniente sobre la colocación sobre el aluminio, debido a la posible corrosión electrolítica.
- Tabiques o bloques porosos: se tiene una buena adherencia humedeciendo la base porosa; el concreto lanzado no se adhiere a materiales pulidos y densos.

### 1.2.8. Diseño de mezcla

El diseño de mezcla es la adecuada dosificación de cada material para cumplir con una finalidad específica; este debe adaptarse a las especificaciones de los agregados y del tipo de cemento para obtener los requisitos establecidos. Los parámetros para un diseño de mezcla de concreto lanzado se muestran a continuación (tabla XI).

Tabla XI. **Consideraciones generales de parámetros para el diseño de mezcla de concreto lanzado**

| <b>Materiales</b>                   | <b>Proporciones por masa</b>                               |
|-------------------------------------|--|
| Cemento Portland (Tipo I, II y III) | 16 % - 20 %  |
| Microsilíce                         | 1,3 % - 2,5 %  |
| Agregados (grava y arena)           | 75 % - 80 %  |
| Acelerante (opcional)               | Según se requiera  |
| Reductor de agua de alto rango      | Según se requiera para obtener una adecuada trabajabilidad |
| Inclisor de aire (opcional)         | Según se requiera  |
| Fibras sintéticas (opcional)        | 7 a 12 kg/m <sup>3</sup>                                   |
| Fibras metálicas (opcional)         | 35 a 60 kg/m <sup>3</sup>                                  |

Fuente: RYAN, T.F. *Concreto lanzado*. p. 21.

Las principales diferencias entre el concreto lanzado y el concreto convencional son la granulometría del árido, contenido de cemento, método de transporte, colocación y la selección de aditivos. El proceso de diseño de mezcla necesita considerar la proyección, resistencia y la compactación. Hay dos enfoques para las especificaciones del diseño de mezcla del concreto lanzado, las cuales se describen a continuación:

- Enfoque prescriptivo: se enfoca en detalles de cómo el concreto lanzado debe ser dosificado, producido y colocado; pero no incluyen la evaluación del producto final, lo cual desalienta la innovación para lograr el resultado deseado con mayor eficacia.
- Enfoque basado en el desempeño: se centra en producir *in situ* un concreto lanzado que tenga un nivel mínimo de desempeño que cumpla con los requisitos establecidos en el diseño. Esto a menudo incluye una evaluación crítica de todos los aspectos de la producción y la colocación que pueda ayudar en la erradicación de prácticas deficientes. Las especificaciones normalmente son adaptadas para el sitio y tipo de estructura para no tener un concreto lanzado de mayor costo.

La elección de las proporciones de los materiales en la mezcla para la proyección de concreto lanzado se basa, por lo general, en la resistencia especificada a la compresión, límites al asentamiento, densidad, resistencia a la flexión o tenacidad y la aplicación en terreno. La utilización de arenas gruesas resulta en más rebote. El tipo de cemento tiene una fuerte influencia en el desarrollo, tanto de la resistencia inicial como de la final, así como de las propiedades del concreto endurecido.

No es posible recomendar dosificaciones genéricas para el concreto lanzado, ya que esta varía dependiendo de las particulares características de cada proyecto, diseño, materiales y técnicas de proyección utilizadas. Para aplicaciones del concreto lanzado con proyección por encima de la cabeza del lanzador, las mezclas deben ser dosificadas ajustadas a la parte más fina de la curva granulométrica; la sección media de dicha curva se utiliza para aplicaciones verticales y el sector más grueso de esta se utiliza para aplicaciones horizontales con proyección hacia abajo.

#### **1.2.8.1. Diseño de mezclas para piscinas**

Se basa normalmente en cumplir con determinados grados de resistencia y en el resultado de mezclas de prueba de obras anteriores. El contenido de cemento en las mezclas base se encuentra entre un 16 % a un 24 %; 18 % a 25 % de árido grueso y un contenido de árido fino entre un 60 % y un 70 % del contenido total de áridos.

Hay normas y recomendaciones que establecen los requisitos de diseño estructural y construcción de piscinas construidas total o parcialmente con concreto lanzado. Las siguientes recomendaciones se basan en diseños de mezcla para piscinas en general y, por lo tanto, no deben de ser tomadas como criterios rígidos:

- Contenido mínimo de cemento: 350 kg/m<sup>3</sup>.
- Relación a/c máxima: 0,55.
- Tamaño máximo de árido: 10 mm.

- Granulometría: debe cumplir con una de las granulometrías recomendadas (tabla II). Si se encuentra fuera de estos rangos pueden ser utilizados si las pruebas previas a la construcción dan resultados satisfactorios.
- Resistencia mínima a la compresión = 25 MPa (28 días).
- La aptitud del concreto para alcanzar la resistencia a la compresión deseada a los 28 días debe ser verificada antes del suministro. Esto puede llevarse a cabo a partir de testigos tomados de paneles de prueba del concreto lanzado y curadas bajo condiciones estándares.

#### **1.2.8.2. Mezclas especiales**

El concreto lanzado puede requerir dependiendo de su utilización propiedades especiales, por ejemplo, cualidades de aislación, resistencia a los sulfatos, requerir de un tamaño especial de árido para lograr ciertas terminaciones, entre otras.

Un concreto lanzado liviano es aquel que se adapta mejor a las secciones delgadas o ligeramente reforzadas, hay que señalar que los agregados livianos en este tipo de concreto lanzado deben estar saturados y superficialmente secos antes de la mezcla; además, se le deben realizar ensayos para determinar características importantes: densidad y retracción. Otro tipo de concreto lanzado con una propiedad especial son los resistentes a la abrasión, los cuales se basan en áridos más densos o con un alto contenido de cemento por metro cúbico. La satisfactoria proyección de mezclas especiales puede requerir diferentes técnicas de colocación, métodos de instalación y equipos.

### **1.2.8.3. Solución de problemas en el diseño de mezclas**

La solución a los problemas más comunes que se encuentran en los proyectos de concreto lanzado se describe a continuación:

- Problemas de bombeo y bloqueos

El bombeo se define como la capacidad de un concreto de ser movilizado bajo presión, manteniendo al mismo tiempo sus propiedades iniciales. En relación a la estabilidad es la posibilidad de segregación, es decir, la separación de la pasta del agregado, lo que por general conduce a una obstrucción de la línea. Esto se produce cuando la presión aplicada al concreto empuja la pasta a través de la estructura del agregado, lo que conduce a una acumulación de partículas, bloqueando así la línea.

La segregación se asocia a menudo con mezclas con una mala granulometría y/o forma de las partículas del agregado a excesiva humedad en la mezcla.

El concreto lanzado no posee una cantidad suficiente de árido por encima de 4,75 mm como para producir un bloqueo, pero a pesar de esto, los bloqueos se componen habitualmente de partículas de agregado grueso más grandes que se han separado de las finas y se acumulan en un punto de la línea. Para prevenir este tipo de problema se debe perfeccionar la curva del árido combinado, produciendo una curva suave y continua de 4,75 mm hacia abajo, además de que el porcentaje del agregado grueso de 4,75 mm no debe ser superior a 500 kg/m<sup>3</sup>.

- Concreto lanzado que no se adhiere al sustrato

Es necesario que el concreto se adhiera sobre la superficie por un período de tiempo suficiente, mientras está en estado fresco hasta que endurezca y quede adherido de forma permanente. La cohesión de la mezcla del concreto puede ser un factor importante ante la incapacidad de adherencia del concreto lanzado con el sustrato. Dicha cohesión puede manifestarse de distintas maneras, pero se revela comúnmente por una separación de la mayor parte de la capa de revestimiento de un concreto que permanece unido al sustrato.

Una cohesión inadecuada, que conduce a desprendimientos puede ser causada por: diseño pobre de la mezcla, escasa cantidad de cemento, baja dosificación del acelerante, exceso de agua en el sustrato. Se debe tener presente que el concreto lanzado que se desprende con rocas adheridas probablemente indica la preparación inadecuada antes de la proyección y no necesariamente una mala adherencia. Un hidrolavado puede eliminar dichas partes sueltas o se puede utilizar una malla como refuerzo.

- Líneas de transporte vertical

Estas se utilizan en algunas minas subterráneas profundas proporcionando así una transferencia eficiente de concreto desde la superficie hasta los niveles más bajos de trabajo. Algunos aspectos claves para el diseño de esta línea son:

- El diámetro varía desde 150 hasta 225 mm (200 mm es considerado un valor normal).
- El tubo vertical debe estar conectado sin curvaturas o desviaciones, evitando así desgaste.

- El diseño de la batea de remezcla en la base de la línea de caída.

Hay dos tipos de líneas verticales: flujo con pistón y caída libre. En el flujo con pistón, la mezcla mantiene su cohesión y no segrega; esto es esencial cuando la descarga del concreto se realiza directamente a una estructura. En este tipo de línea se requieren diámetros de 150 mm y el control de asentamiento es esencial, el riesgo de bloqueo es relativamente alto con este tipo de línea vertical. En el método de línea vertical de caída libre, los materiales se segregan a medida que son transportados en el tubo, pero se remezcla en una batea al final de la caída.

Es esencial cebar la línea antes de su uso, ya que las paredes del tubo pueden retener una película de agua, la cual puede alterar radicalmente la relación a/c de la mezcla. El cebado de la línea se realiza con alrededor de 0,2 m<sup>3</sup> de concreto que se descarta posteriormente. El tubo debe de mantenerse libre de acumulaciones, fugas y desgastes.

### **1.2.9. Máquinas y equipo que se utiliza**

La maquinaria y equipo para el concreto lanzado depende de los siguientes factores: especificaciones del proyecto, tipo de aplicación, velocidad de proyección, tiempos disponibles, tipo de concreto lanzado, distancia de transporte, sistema de suministro y acceso al lugar de la proyección.

La tecnología ha avanzado hasta llegar a la proyección o lanzado vía control remoto, bombas dosificadoras de fraguado integradas, instalaciones de hidrolavado. La configuración del equipo debe ser la adecuada, ya que con esta se debe entregar en la boquilla un flujo continuo de material mezclado de manera uniforme y a una velocidad adecuada. El volumen de colocación del concreto

lanzado se muestra a continuación (tabla XII); es importante tener en cuenta siempre las especificaciones de funcionamiento del fabricante del equipo, debido a la gran variedad de equipos disponibles.

Tabla XII. **Volumen de colocación de concreto lanzado**

| <b>Volumen de colocación de concreto lanzado (m<sup>3</sup>/h)</b> |  |                                      |
|--|--|--------------------------------------|
| <b>Forma</b>   | <b>Concreto lanzado por vía húmeda</b> | <b>Concreto lanzado por vía seca</b> |
| Manual   | 3 - 10                                 | 1 - 5                                |
| Equipo robotizado  | 3 - 25                                 | 3 - 10                               |

Fuente: elaboración propia.

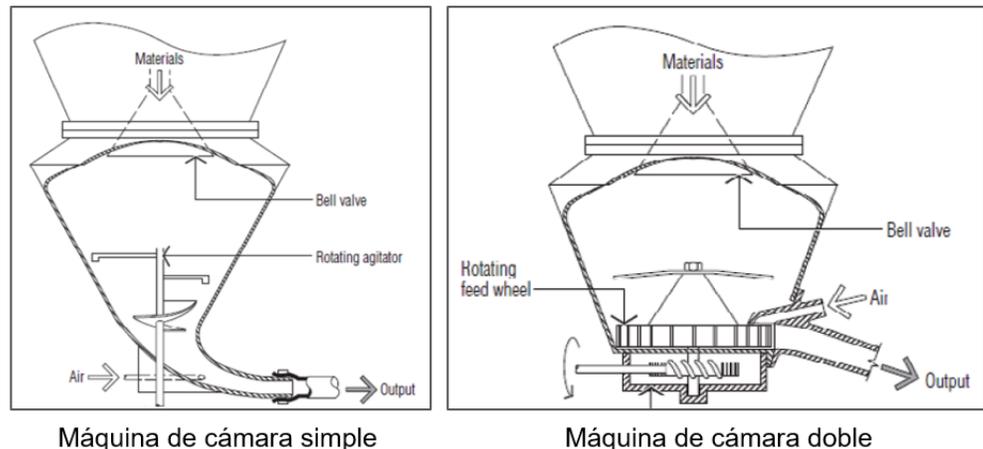
### **1.2.9.1. Equipo para concreto lanzado por vía seca**

La capacidad de estos equipos es en volúmenes de proyección pequeños, por lo que el reducido tamaño de estos equipos hace que sean versátiles en sus desplazamientos y ubicaciones. Estos equipos se pueden dividir en dos tipos: máquinas de cámara simple o doble y de alimentación continua generalmente llamadas máquinas rotatorias.

- Máquinas de cámara simple o doble

Las máquinas de cámara simple tienen un funcionamiento intermitente; operan colocando el material en su interior, la cual se cierra y se presuriza con aire, obteniendo así que el material se introduzca en el tubo o línea de descarga. Las máquinas de doble cámara tienen un funcionamiento más continuo mediante la utilización de la cámara superior como una compuerta de aire durante el ciclo de alimentación de material (figura 9).

Figura 9. **Máquina de plato rotatorio**



Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 51.

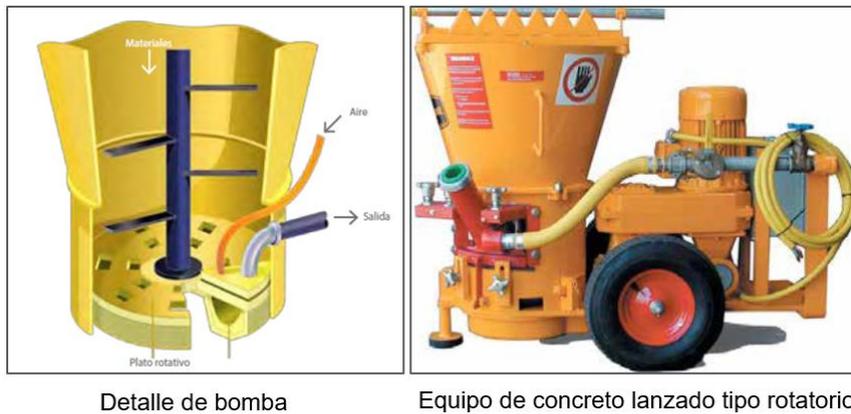
- **Máquinas rotatorias**

En este tipo de máquina, el material es alimentado por gravedad desde la tolva dentro de las cavidades del rotor en un área de su plano de rotación y se descarga hacia abajo desde dichas cavidades con la presión de aire en el punto opuesto en su rotación. Se introduce aire adicional en el cuello de la salida, que logran así un adecuado volumen y presión de suministro de material hacia la tubería de salida.

Algunas máquinas rotatorias se modifican para manejar tanto mezcla húmeda como en seco, para esto no se necesita ninguna conversión especial ni se usan accesorios adicionales.

En general, existen dos tipos de máquinas rotatorias: la de rotor o revolver (figura 10) que posee discos de sellado, en la parte superior e inferior del elemento giratorio.

Figura 10. **Máquina de plato rotatorio**



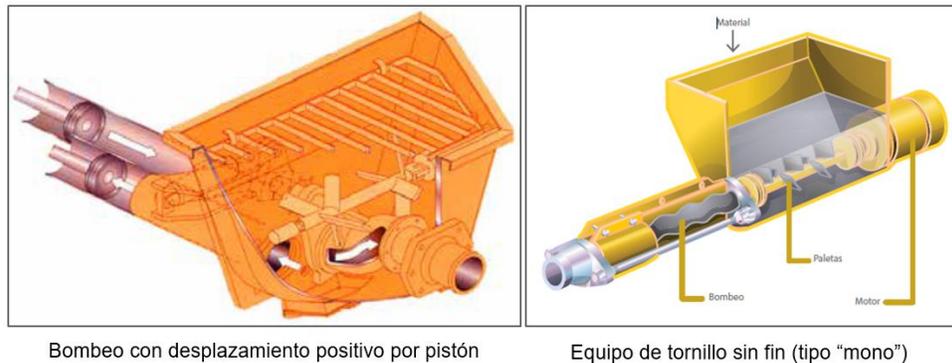
Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 52.

### 1.2.9.2. **Equipo para concreto lanzado por vía húmeda**

Los equipos de concreto lanzado por vía húmeda se pueden definir como un equipo de desplazamiento positivo o máquinas neumáticas.

Las máquinas de desplazamiento positivo pueden ser de pistones propulsados hidráulica o mecánicamente con una variedad de válvulas de ciclos y dispositivos reductores de movimiento de los líquidos o pueden ser bombas de compresión de tipo peristáltico mediante rodillos mecánicos para conducir el concreto a través de un tubo de impulsión (figura 11). Además, se utilizan bombas de tornillo sin fin, las cuales tienen cuchillas metálicas que obligan a la mezcla a salir a través de un tubo (principalmente, utilizadas para la aplicación de mezclas de estuco o yeso incorporado). Todas estas máquinas de desplazamiento positivo incorporan aire comprimido en la boquilla para aplicar el concreto neumáticamente.

Figura 11. **Detalles del equipo para concreto lanzado por vía húmeda**



Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 53.

### 1.2.9.3. Equipos auxiliares

Son aquellos equipos, accesorios o mejoras adquiridas separadamente de una unidad principal de concreto lanzado, a continuación se describen algunos:

- Equipos de control remoto

Los equipos de concreto lanzado con mando a distancia se utilizan para mejorar la seguridad y la productividad de los operadores, debido a que:

- Mantienen al operador alejado de suelo sin soporte.
- Reducen al mínimo la exposición al rebote y polvo.
- Permiten el acceso a zonas difíciles.
- Menos exigentes físicamente que la proyección manual.
- Aumento en la productividad mediante un mayor rendimiento volumétrico.

El equipo de control remoto consiste en un brazo giratorio telescópico con una boquilla montada en este y la bomba de concreto montada en un vehículo móvil, mientras que el operador controla los movimientos de la bomba y del brazo con un control remoto (figura 12).

Figura 12. **Equipo controlado por vía remota**



Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 54.

- Bombas y sistemas de dosificación de acelerantes

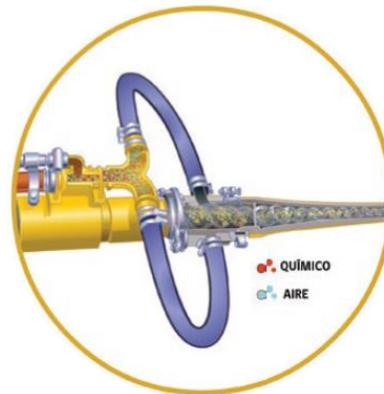
El tipo de bomba es importante debido a la necesidad de tener un volumen de alimentación regular y preciso. Típicamente, los dos tipos de bombas utilizadas para lograr esto, son bombas del tipo mono o bombas peristálticas. También, es importante la capacidad de la bomba, ya que puede ser necesaria una tasa de hasta el 10 % del contenido de cemento por metro cúbico.

- Boquillas

El diseño de una boquilla es importante, ya que afecta la compactación del concreto lanzado, el rebote durante la proyección y la consistencia de la mezcla (vía seca). En la mayoría de los casos la mezcla del acelerador se produce en la

boquilla de concreto lanzado (figura 13) y hace más relevante sus características y su mantenimiento o reemplazo en caso de desgaste.

Figura 13. **Detalle de la función de la boquilla e ingreso de los materiales del concreto lanzado**



Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 55.

En el concreto lanzado por vía seca, el anillo de agua y el montaje dentro de la boquilla es fundamental para asegurar la humectación completa de la mezcla.

- Línea de bombeo para traslado de material

Las líneas de entrega de material están disponibles en varios diámetros y materiales, los cuales deben adecuarse al proceso de concreto lanzado; además, se deben tener en consideración las propiedades de los materiales constituyentes, longitud de la línea de suministro, presiones de trabajo y la cantidad de concreto requerido. El diámetro interno debe ser por lo menos 4 veces el tamaño del agregado más grande en la mezcla.

Cuando el concreto lanzado es con fibras de acero, la longitud de dicha fibra debe ser preferentemente no mayor que el 70 % del diámetro interno; para las fibras sintéticas este requisito puede ser un poco más relajado siempre y cuando se realicen pruebas para asegurar que no se producirán bloqueos. La sección de la línea antes de la boquilla debe de ser flexible, tener un tubo resistente a la abrasión y a dobleces. La especificación de presión en la manguera siempre debe ser revisada y estar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de la bomba. Todas las conexiones o abrazaderas deben estar unidas correctamente y deben contar con medidas de seguridad adecuadas.

#### **1.2.10. Dosificación y mezclado**

El proceso de dosificación consiste en pesar o medir los materiales en masa o el volumen de acuerdo a lo especificado. El mezclado es el proceso de combinar los materiales componentes para que se distribuyan de manera uniforme, puede realizarse por varios métodos:

- Mezclado en planta: el mezclado se realiza en una planta de concreto, con sus requisitos técnicos de operación en orden y con un plan de revisión y calibración. Dicha planta debe estar instalada en ubicaciones de fácil acceso y logísticamente cercano a los puntos de distribución. Los componentes se mezclan completamente antes de la descarga en el equipo de transporte. Para concreto lanzado las plantas de eje vertical del tipo turbo mezclado, son las más recomendables.
- Mezclado por etapas: en este tipo de mezclado los componentes se mezclan parcialmente en una planta central y se realiza la transferencia a un mezclador móvil (por ejemplo: camión mixer) para la mezcla final antes de la descarga en el punto de colocación.

- Mezclado por equipo móvil: el mezclado en equipo móvil consiste en realizar todo el mezclado en un camión donde se cargan todos los componentes en una planta de dosificación centralizada. Este es el método es el sistema de mezclado más utilizado para la producción de concreto convencional o concreto lanzado.

La mayoría de los componentes para el concreto lanzado por vía seca se suelen mezclar previamente en una planta para luego ser almacenados en bolsas. El contenido de humedad de la mezcla antes de que se añada agua en la boquilla debe de estar entre un 2 % y un 5 % para minimizar la producción de polvo en la bomba (más de un 5 % puede causar obstrucciones en la línea).

#### **1.2.10.1. Consistencias de la mezcla**

El concreto lanzado requerido para la proyección depende del tipo de equipo de transporte, distancia de entrega y el procedimiento de aplicación. Para un contenido de cemento y una relación a/c dada, la consistencia o el flujo se puede ajustar con aditivos químicos añadidos en la planta de mezclado o en sitio.

- Fibras y aditivos: se debe consultar al fabricante o al distribuidor de las fibras para elegir los métodos recomendados de adición que pueden variar entre los tipos de fibras que existen. Se deben dosificar los aditivos de acuerdo con las recomendaciones específicas del fabricante y pruebas (dependiendo el tipo de cemento y proyecto). Normalmente, los aditivos se dosifican dentro de  $\pm 5$  %/ml con un equipo de dosificación automática.
- Temperatura de mezclado: el concreto lanzado es muy sensible a la temperatura ambiental durante el mezclado, el transporte y la proyección. Por lo tanto, algunas guías internacionales recomiendan no realizar el

mezclado si la temperatura de los materiales está por debajo de 5 °C o a más de 35 °C, a menos que se tomen debidas precauciones. La *Guía austriaca de hormigón proyectado* en relación a esto indica que el concreto fresco debe tener una temperatura de más de 15 °C. Si la temperatura de este se encuentra por encima de 25 °C, antes de la hidratación del cemento puede conducir a una rigidez excesiva de la mezcla fresca, lo que resulta en un comportamiento desfavorable. Las temperaturas menores de 13 °C reducen la resistencia temprana y más de 25 °C reduce el tiempo de trabajo.

### **1.2.11. Aplicación del concreto lanzado**

La aplicación del concreto lanzado se divide en dos métodos principales: manual y con equipos robotizados. El método manual es generalmente utilizado para aplicaciones en la construcción civil y reparación de concretos; mientras que el método con equipo robotizado se utiliza en aplicaciones de minería y construcción de túneles subterráneos y es ideal para aplicaciones en secciones de gran tamaño para taludes. En la construcción de carreteras y ferrocarriles es más común que se adopte el método manual por las restricciones de espacio. Es esencial el uso de operadores experimentados (de preferencia certificados) que hayan recibido una formación adecuada en la aplicación del concreto lanzado para garantizar la calidad de cualquier aplicación de este. Además, es esencial contar con un supervisor técnico o profesional competente y experimentado.

#### **1.2.11.1. Servicios**

Es esencial el uso de operadores experimentados y competentes para la aplicación del concreto lanzado para garantizar su calidad. Es fundamental considerar cuidadosamente los servicios a utilizar dependiendo del tipo de equipo

a utilizar antes del inicio de la proyección. Entre algunos servicios a tomar en cuenta a la hora de la aplicación del concreto lanzado se tienen:

- **Electricidad:** se debe proporcionar una fuente de alimentación eléctrica confiable con toma de tierra a todos los equipos que así lo requieran. Para otros equipos se debe tomar en consideración los ciclos de trabajo y el uso de fuentes eléctricas.
- **Agua:** la calidad del agua y su temperatura afectan el comportamiento del concreto lanzado. Debe ser potable y con una temperatura entre 18 °C a 25 °C. Se debe contar con un suministro de presión de agua adecuada y la disponibilidad suficiente para aplicaciones particulares como curado, limpieza o preparación del sustrato.
- **Iluminación:** es un servicio importante, ya que mejora la seguridad y ayuda en el frente de trabajo a los operadores de equipos de concreto lanzado a proyectar un producto de calidad con un espesor correcto y disminuye el rebote.
- **Ventilación:** toda área cerrada debe estar bien ventilada debido al polvo, humo y otros contaminantes en el aire, provocados por los equipos durante el proceso de aplicación del concreto lanzado. En la minería subterránea es esencial una ventilación de calidad para diluir y eliminar los humos de maquinaria, además del polvo y sustancias químicas en suspensión en la zona.
- **Aire comprimido:** este debe ser constante, limpio y seco con la presión y el volumen adecuado, ya que este depende de las especificaciones de cada equipo, el estado de los mismos, condiciones de operación en el

lugar, longitud y diámetro de la manguera. Se puede tomar como requisitos típicos: para concreto lanzado por vía húmeda el consumo es de aproximadamente 12 m<sup>3</sup>/min a una presión de aproximadamente de 6 a 7 Bar (88 – 102 PSI). Mientras que para concreto lanzado por vía seca el consumo es de aproximadamente 15 m<sup>3</sup>/min a una presión de aproximadamente entre 3 a 6 Bar (44 – 88 PSI).

### **1.2.11.2. Formación y entrenamiento**

La clave del éxito del concreto lanzado es la colocación de manera correcta, sea por cualquiera de los métodos antes mencionados o por cualquier tipo de concreto lanzado. Debe ser un operador entrenado quien dirija y controle la colocación del concreto bajo la supervisión de un profesional debidamente acreditado. En Oceanía y Europa existen cursos formales para la formación o capacitación de los operadores. Sin embargo, algunos contratistas de concreto lanzado desarrollaron sus propios programas (dados por operadores internos de gran experiencia) por los cuales certifican al personal. En América del Norte la certificación se basa en programas para concreto lanzado manual auspiciado por ACI y desarrollado por ASA, en el que están claramente establecidos los programas de estudios y el proceso de certificación.

### **1.2.11.3. Seguridad**

Como todas las actividades de construcción, la aplicación del concreto lanzado debe ser planificada y ejecutada con la debida atención, salud y seguridad de los operadores y el entorno para ello es necesario que las regulaciones específicas de seguridad y salud ocupacional se cumplan sin excepción alguna. A continuación, se muestran algunos tópicos que se deben revisar como mínimo:

- Competencia y formación de operadores y personal.
- Inducciones legales en temáticas de responsabilidad, seguridad y operación.
- Inducciones del sitio de trabajo, charlas y capacitaciones.
- Plan de seguridad que incluye mínimo: evaluación de riesgos, seguridad en el trabajo, análisis del medio ambiente, programa de limpieza, programa de manejo de residuos. Algunas recomendaciones mínimas de protección del personal se describen a continuación: se debe realizar una evaluación de riesgos para informar al personal los riesgos a los cuales están propensos. El personal que proyecte concreto lanzado (pitonero u operador, encargado de camión mixer, operador asistente, cuadrilla y supervisor) debe estar instruido y advertido del uso del EPP (equipo de protección personal) apropiado. La vestimenta y el equipo de protección personal debe mantenerse en buenas condiciones y ser de un material que lo proteja de la actividad que realiza. El EPP incluye: botas de seguridad, overol, guantes, lentes de seguridad, casco de seguridad, protector auditivo, lámpara y auto rescatador. El área de lanzado debe quedar protegida del rebote, polvo de cemento y de producto químico en suspensión; por todo, se requiere el uso permanente de máscaras aprobadas contra el polvo, respiradores y protección para ojos y oídos. Las fichas de seguridad del material para todos los materiales en uso deben estar disponibles en el proyecto y el personal implicado debe estar familiarizado con su ubicación y contenido, en especial, con los riesgos y las recomendaciones sobre vestimenta protectora. Se debe disponer de equipo de primeros auxilios apropiado y de agua fresca en las proximidades de la operación de lanzado. El pitonero u operador debe

tener un mucho cuidado al operar en la zona de rebote y debe utilizar el equipo de seguridad apropiado y debe dejar de proyectar inmediatamente si alguien ingresa a la zona de exclusión.

#### **1.2.11.4. Concreto lanzado por el método manual**

Este tipo de concreto lanzado es aquel en el cual el pitonero tiene contacto con la manguera y la boquilla con lo cual el dispone la forma de la aplicación para lo cual tiene que tener en cuenta lo siguiente:

- Sustrato y preparación de la superficie

La preparación de la superficie requerida depende de la condición y naturaleza del sustrato contra el cual se va a proyectar (colocar) el concreto. En todos los casos en los cuales existan flujos o ingresos de agua que puedan interferir con la proyección, previo a su colocación dichos flujos deben ser sellados o el agua debe ser desviada hacia lugares desde donde pueda ser evacuada. En los trabajos subterráneos se utiliza a menudo una preinyección en varios estratos mediante lechadas de cemento o químicos para prevenir el ingreso de agua. Lo importante es que todo sustrato o superficie se encuentre limpia, libre de polvo, aceite, agua excesiva y otros contaminantes que afecten la adherencia del concreto.

- Moldajes

Los moldajes no rígidos se utilizan cuando la apariencia de la parte posterior de un elemento donde se desea proyectar no sea importante, por ejemplo: malla fina de metal expandido o tejida, la cual debe fijarse sólidamente a un marco de respaldo y estar tensa para minimizar la vibración que evita así el escurrimiento

del concreto y logra así una buena compactación. Los moldajes rígidos deben ser recubiertos por un agente desmoldante con el propósito de evitar la absorción de humedad y adherencia del concreto lanzado. Estos moldajes deben ser debidamente apoyados para evitar vibraciones excesivas y la deflexión de las placas.

- Otras superficies
  - Superficies de tierra: la gama de aplicaciones para cubrir superficies de suelo son amplias e incluyen piscinas, estabilización y protección de taludes, revestimiento de canales, entre otras. Es esencial, una adecuada compactación y preparación de la tierra para prevenir erosiones durante la aplicación. La superficie se corta al nivel que se desea para proporcionar un apoyo adecuado y para garantizar el espesor de diseño. Se recomienda especial cuidado en la proyección de una capa rápida para evitar deslizamientos del concreto sobre la superficie.
  - Superficies de roca: el sustrato debe estar libre de rocas sueltas, polvo y películas superficiales. Esto se logra mediante el uso de una combinación de un chorro de agua y aire comprimido; también, se puede considerar el uso de un chorro de arena húmeda.
  - Superficies de acero: antes de la proyección se debe eliminar todo rastro de oxidación, aceites, pinturas y otro contaminante, para ello es recomendable un chorro de arena y otros métodos apropiados.
  - Superficies de concreto lanzado o concreto convencional: toda superficie suelta, agrietada o deteriorada debe ser retirada hasta

llegar al concreto sano. Se debe utilizar un chorro de agua u otros medios mecánicos para eliminar cualquier concreto contaminado. Cuando la armadura se encuentra expuesta, esta debe estar libre de óxido u otras materias perjudiciales que pudieran afectar la durabilidad y la adherencia. Si es requerido se puede aplicar una lechada o puente de adherencia a la superficie. Cuando la superficie a la cual será proyectado el concreto es lisa, esta debe ser erosionada y/o picada.

- Temperatura en el punto de aplicación

El concreto lanzado no puede ser aplicado si la temperatura en el momento de la colocación es inferior a 5 °C o más de 35 °C, a menos que se hayan tomado las precauciones adecuadas. Si es necesario proyectar concreto fuera de este rango se aconseja buscar a un especialista en tecnología del concreto lanzado que realice las recomendaciones para el caso, obteniendo así buenos resultados.

- Condiciones de viento o corrientes de aire

El viento puede afectar la proyección del concreto, si se requiere alcanzar la faena en estas condiciones (con viento) es necesario colocar una pantalla cortaviento que proteja la boquilla, el chorro y la superficie a proyectar y que impida que el material escape fuera de la dirección deseada.

Las condiciones de viento o corrientes de aire promueven la formación de grietas en el concreto fresco por secado rápido; en lo posible, se deben utilizar tanto las pantallas cortaviento como también retardadores de evaporación para protección del concreto.

- Condiciones de lluvia

A menos que exista una protección adecuada, el concreto lanzado no debe ser aplicado durante una lluvia o cuando el pronóstico de esta sea inminente. La lluvia puede comprometer su apariencia y reducir la resistencia final de la superficie y, por ende, su durabilidad.

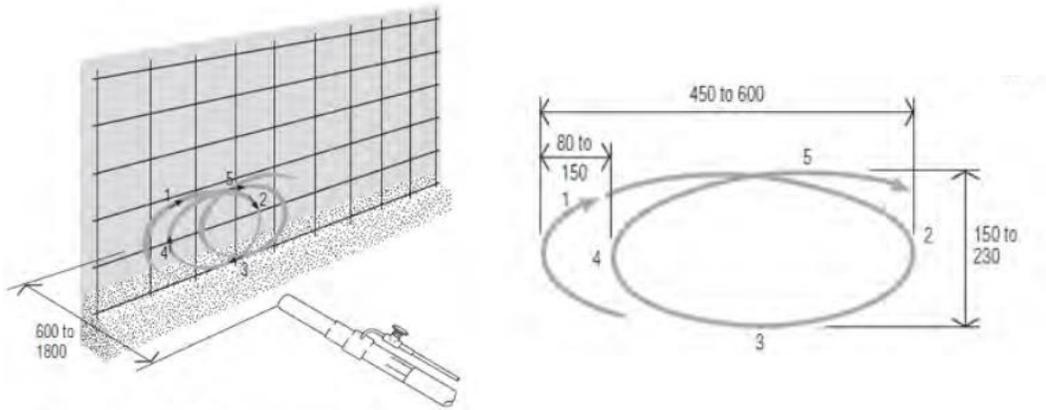
- Puesta en marcha

Cuando el equipo de proyección del concreto lanzado se encuentra establecido en el área de trabajo, es necesario revisar las conexiones de las tuberías de transporte, conexión de mangueras de aire y evaluar que la presión de aire sea la correcta. Las tuberías flexibles se deben encontrar limpias y deben ser conectadas con el menor número posible de curvas y sin dobleces o torceduras; además, el reductor debe estar ubicado lo más cerca posible del punto de descarga de la bomba. A la mezcla fresca se le debe verificar el tiempo de mezclado y el asentamiento antes de descargarla a la bomba. En mezclas que contengan acelerante, no se debe proyectar el concreto hasta que este exhiba el comportamiento de fraguado adecuado para el proyecto.

- Técnica de concreto lanzado por el método manual

La distancia de la boquilla a la superficie receptora debe estar entre 0,6 m a 1,0 m con el fin de lograr el mayor grado de compactación y el menor rebote. La distancia óptima está influenciada por el tamaño del agregado, la curva granulométrica, el acabado superficial, la presión de aire y la velocidad del material transportado. La boquilla debe ser dirigida perpendicularmente al sustrato en todo momento y su manipulación durante la proyección debe ser con un movimiento de forma circular a ovalada (figura 14).

Figura 14. **Aplicación correcta del concreto lanzado**



Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 65.

El pitonero debe primero rellenar todos los desniveles y quiebres que existan, zonas de debilidades (fisuras, fallas y partes blandas), dicho proceso se limita normalmente a superficies de roca o suelo. La proyección debe comenzar desde las secciones inferiores y moverse metódicamente hacia arriba (figura 15).

Figura 15. **Proceso de aplicación de concreto lanzado**

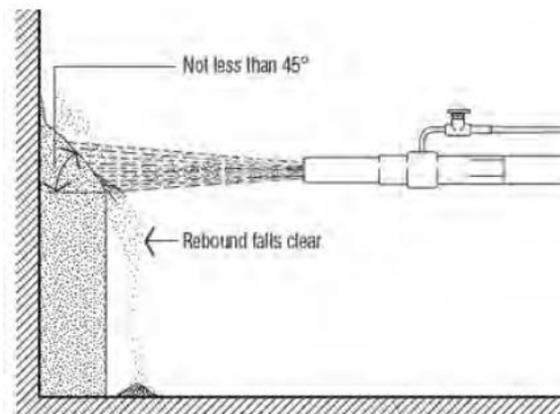


Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 65.

La dosis de uso del acelerante puede incrementarse marginalmente cuando la colocación pasa desde la base hasta la pared y luego al techo. En algunos casos es prudente realizar capas delgadas en vez de realizar todo el espesor.

Cuando se aplican capas con un espesor muy grande es importante que la superficie superior mantenga una inclinación de aproximadamente 45° (figura 16), para evitar que el rebote contamine el concreto colocado y la proyección debe ser realizada proyectando el sustrato a 90°. Es importante que no se produzcan deslizamientos del concreto proyectado y se debe tener cuidado de no incorporar en la pared el rebote acumulado en la base. El concreto lanzado debe surgir en un flujo ininterrumpido y constante.

Figura 16. **Inclinación de la cuña no menor a 45°**



Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 66.

- Encapsulamiento del refuerzo

Cualquier refuerzo que requiera quedar encapsulado por el concreto debe ser adecuadamente amarrado y posicionado antes de la proyección. Las mallas

o las barras de armadura deben ser diseñadas y detalladas para facilitar el encapsulamiento y minimizar el rebote. Cuando se proyecta sobre las barras de refuerzo, la boquilla debe mantenerse más cerca y moverse en diferentes ángulos para permitir un mejor encapsulado y para eliminar el rebote. Este procedimiento hace que el concreto lanzado se deposite detrás de la barra y reduce la acumulación en la cara frontal.

- Control del nivel y alineamiento de la proyección

Se requiere de una forma efectiva y comprobada para controlar el nivel y alineamiento de la proyección para lograr el espesor y perfil del concreto lanzado terminado. Esto se puede lograr mediante el uso de alambres de guías, tiras de guía, calibres de profundidad, sondas de profundidad, moldes convencionales o guías laser.

- Rebote

Es aquel concreto que no se adhiere a la superficie que está siendo proyectada y que salta de la superficie de la superficie de concreto ya colocada. Dicho material no se debe volver a utilizar en el equipo de concreto lanzado ni en otros lugares de la obra.

Cuando el flujo se dirige contra la superficie rígida la cantidad de rebote puede ser más alta de lo normal. Una vez que se haya formado una capa sobre la superficie, la cantidad de rebote generalmente disminuye. Por lo tanto las secciones con mayor espesor tienen un menor rebote general que las de menor espesor, la verificación de rebote para los requisitos de calidad y desempeño se detallan en la tabla XIII.

Tabla XIII. **Porcentajes de rebote**

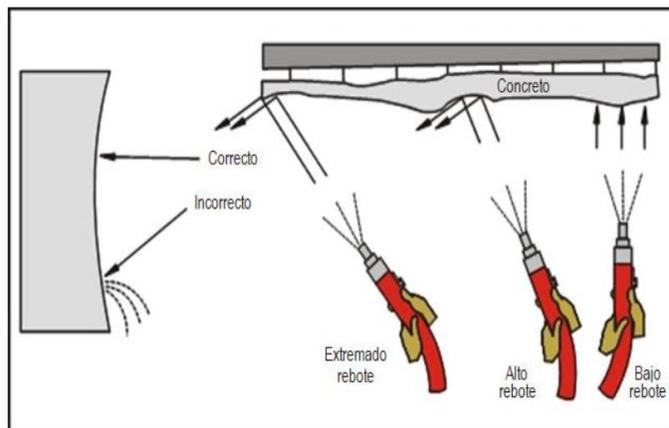
| Superficie                       | % Rebote admisible            |                                 |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|                                  | Concreto lanzado por vía seca | Concreto lanzado por vía húmeda |
| Piso o losas                     | 5 - 15                        | 0 - 5                           |
| Muros verticales o con pendiente | 15 - 30                       | 5 - 10                          |
| Trabajo en plafones              | 25 - 50                       | 10 - 20                         |

Fuente: GEDEON, Gilbert. *Introduction to shotcrete. Applications.* p. 37.

El porcentaje de rebote depende de varios factores:

- Experiencia del pitonero y su habilidad para el manejo de la boquilla. La distancia entre la boquilla y el sustrato tienen una gran influencia en el rebote así como el ángulo de aplicación (figura 17).

Figura 17. **Ángulo de boquilla y su efecto sobre el rebote**



Fuente: CALLUPE, Jesús. *Shotcrete. Sostenimiento pasivo.* p. 36.

- Eficiencia del equipo de proyección incluyendo la presión de aire suministrado.
  - Diseño de mezcla que incluye la granulometría de los agregados. El rebote aumenta significativamente cuando el tamaño máximo del árido es superior a 14 mm.
  - Trabajabilidad del concreto.
  - La selección de los materiales finos complementarios incorporados en el diseño de la mezcla.
  - Profundidad de concreto ya proyectado en el sustrato.
- Terminaciones

El acabado natural del concreto lanzado es una textura superficial irregular, que es adecuado para muchas aplicaciones. En aplicaciones donde se requiere de una terminación con mejor alineamiento, apariencia o suavidad, se debe colocar un espesor ligeramente superior al indicado para luego enrasar y recortar el exceso de material para dejar a nivel de la guía maestra (denominado acabado con regla) aunque la superficie seguirá exhibiendo la marca de los áridos arrastrados durante el enrasado.

Se puede enrasar con una llana de acero o de madera que ofrecen un acabado más liso; además, es posible pasar una esponja para mejorar la terminación sobre la superficie ofreciendo un acabado final de alta calidad. En general, en el método de concreto lanzado manual, un asistente va detrás del pitonero con una regla para cortar y después alisar con una llana. La llana no se

debe pasar demasiado fuerte, ya que esto altera el concreto y destruye su compactación original. Es posible lograr formas arquitectónicas y decorativas únicas de alta calidad como piedras, bloques de arenisca y paredes de roca.

- Curado

Se aplican las mismas consideraciones que el concreto convencional. Por sus características, el concreto lanzado necesita un curado más efectivo para que desarrolle toda su resistencia potencial y durabilidad. Esto es esencial en secciones delgadas, superficies texturadas y relaciones a/c más bajas. Toda superficie de concreto lanzado debe ser curada por uno o más de los métodos siguientes:

- Curado húmedo: se puede realizar utilizando arpillera lona u otro material adecuado manteniéndolos continuamente húmedos. Este tipo de curado debe aplicarse a las superficies inmediatamente después de la finalización de la aplicación y las operaciones de acabado. El tiempo de curado es de 3 a 7 días continuos.
- Compuestos de curado de membrana líquida: pueden ser utilizadas en concreto lanzado; sin embargo, si dicha membrana deteriora la adherencia entre capas no se debe utilizar este tipo de curado cuando se trata de proyectos que se construirán en capas sucesivas.
- Agentes de curado interno: están disponibles y se han utilizado con éxito. Es posible realizar pruebas preliminares respecto a su efectividad, las que pueden quedar definidas en la especificación

y/o en el suministro de concreto o como parte de la oferta del contratista.

- Curado natural: puede ser considerado si y solo si las condiciones atmosféricas que rodean al concreto lanzado son adecuadas, por ejemplo cuando la humedad relativa es  $\geq 85 \%$ .

#### **1.2.11.5. Concreto lanzado por el método robotizado (mecanizado)**

Este método se utiliza ampliamente en la minería (cielo abierto y subterráneo) y en las actividades de construcción de túneles civiles y en estabilización de taludes. Este método se utiliza con mayor frecuencia con el tipo de concreto lanzado por vía húmeda; permite la aplicación de un mayor volumen de concreto y tiene la ventaja de que el operador guía un brazo que tiene montada una boquilla, permitiéndole así llegar a zonas que de otra forma serían inaccesibles.

Además de facilitar la aplicación en puntos inaccesibles y mantener al operador relativamente a salvo de áreas peligrosas (desprendimientos, polvo, rebote), estos equipos permiten mantener controlados factores muy importantes para la calidad resultante del concreto, como el ángulo y distancia uniforme de la boquilla de proyección respecto del sustrato y eventualmente el espesor de capa proyectada. Considerando que tanto el factor humano como el diseño del brazo robotizado inciden directamente en la calidad del concreto, los equipos robotizados contemplan en su diseño el principio del paralelogramo que permite, con la menor cantidad de movimientos o comandos dependientes del operador, mantener el ángulo y la distancia de proyección.

- Inspección de riesgos antes de la proyección

Antes de acercarse a cualquier área donde proyectará concreto lanzado, el equipo debe estacionarse en una posición segura y se debe realizar a pie una inspección del área de trabajo. Se debe evaluar el riesgo de caída de rocas y se debe seleccionar una posición segura para instalar la plataforma.

En un ambiente subterráneo también se debe evaluar la ventilación para eliminar el polvo y los humos que se generarán durante la proyección; si existieran explosivos sin detonar, filtraciones de agua y cualquier signo de desplazamiento del terreno, además de esperar la autorización de las personas expertas después de la evacuación de gases producto de la voladura.

La iluminación adecuada es crítica para asegurar que los riesgos antes mencionados puedan ser identificados. Se debe restringir a través del uso de la señalización y barricadas el acceso a la zona de trabajo de personal y equipos no relacionados con el proceso de concreto lanzado (figura 18).

Figura 18. **Señalización de prevención**



Fuente: elaboración propia.

- Tratamiento de retrasos (demoras)

En obras subterráneas o minería, en general, es usual que se produzca retrasos en la proyección de concreto. En estos casos se debe tener cuidado para evitar la hidratación del concreto. Se debe aplicar un estabilizador en las dosis recomendadas y evitar mezclar de manera continua. Cualquier incorporación de aditivo o agua deberá anotarse en los registros de suministro de concreto.

La adición de agua debe evitarse debido a los efectos perjudiciales sobre la resistencia. Cuando la carga es capaz de ser proyectada de nuevo; el camión mixer debe hacer girar el tambor por un tiempo suficiente antes de la descarga para garantizar que la carga se ha vuelto a mezclar adecuadamente. La trabajabilidad de una mezcla de concreto lanzado depende fuertemente de la cantidad de agua libre. Se ha demostrado gracias a ensayos estandarizados de laboratorio que esta puede cambiar drásticamente con pequeñas variaciones en la dosis de agua inicial. Sin embargo, mayores cantidades de agua demandan mayores cantidades de cemento y retardan el fraguado de la mezcla.

Las soluciones recomendadas son:

- Conocer con anticipación la trabajabilidad requerida y la duración del ciclo de lanzado del concreto.
- Proteger la mezcla de la alta temperatura, viento, radiación y evaporación.
- Evaluar el uso de controladores de fraguado.

- Preparación del sustrato

El concreto lanzado, también, se utiliza frecuentemente en minería en el desarrollo de túneles a través de bancos de relleno, el cual puede ser considerado como un suelo consolidado desde el punto de vista material. Para una buena adherencia del concreto lanzado al sustrato, todo material como polvo y roca suelta se debe retirar antes de la aplicación del concreto. La superficie o sustrato debe estar húmeda para evitar que el área de proyección absorba el agua del concreto. La superficie debe limpiarse inmediatamente antes de la proyección para evitar que el polvo de la superficie impida la adherencia del concreto al sustrato. Hay que tener en cuenta que la entrada de agua en exceso es un problema para la proyección de concreto y deben tomarse las medidas necesarias para reducir o desviar el flujo (instalación de drenajes). La remoción de rocas sueltas se logra a través de un proceso conocido como:

*Scaling*: hay varios tipos de *scaling*, aunque los más comunes son el método mecánico, ya sea utilizando un equipo especial o un taladro y el método *hydroscaling* o chorro de agua a alta presión (figura 19). El *scaling* puede ser inapropiado en algunas situaciones en las que existen rocas muy débiles, en estos casos, el sustrato se prepara habitualmente lavando ligeramente la superficie con agua. El *hydroscaling* mejora la resistencia de la adherencia, además de la eliminación de suelo suelto. Este método utiliza un chorro de agua a alta presión (3 000 psi a 6 000 psi) para eliminar las piedras sueltas y el polvo de la superficie. Cuando se utilice esta técnica habiendo proyectado el concreto, es recomendable una distancia de aproximadamente 1,5 m desde el concreto ya aplicado para asegurar una buena adherencia en la superposición del concreto.

Si se ven grandes bloques inestables, puede representar un peligro para el brazo del robot durante la proyección. Ante dicha circunstancia es necesario un *scaling* mecánico; terminado este proceso, siempre se recomienda la aplicación de un chorro de agua para eliminar el polvo y las rocas menores sueltas. No se requiere necesariamente de *scaling* cuando el concreto lanzado va directo al suelo, debido a que las pequeñas fisuras y grietas en el suelo se llenarán de concreto, estabilizando así el terreno suelto.

Figura 19. **Tipos de scaling**



Fuente: GARCÍA GUZMÁN, Sergio. *Shotcrete. Guía chilena del hormigón proyectado*. p. 77

- Procedimiento de la proyección

Antes de cualquier proyección, el equipo debe ser cuidadosamente recubierto con una capa de desmoldante para ayudar con la limpieza de la máquina después de la proyección. La boquilla debe ser revisada después de cada proyección para verificar su limpieza y desgaste. Tanto la boquilla como el cuerpo difusor del acelerante y aire son factores que pueden afectar la velocidad

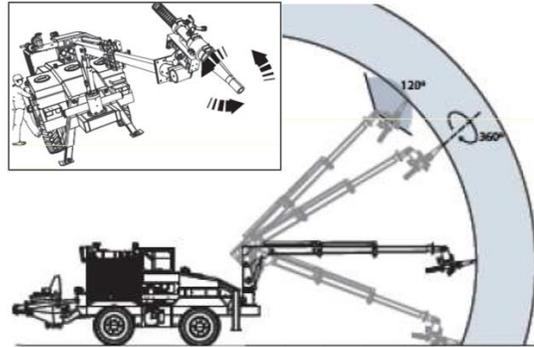
del concreto lanzado a través de la boquilla y, por lo tanto, la compactación que se logra. Las líneas del acelerante también deben ser revisadas; esto se realiza cerrando la válvula de aire de la boquilla, apuntando hacia el suelo y poco a poco encender el suministro de aire para verificar que no haya fugas y la presión se encuentre correcta antes de activar el paso del acelerante. Así mismo, debe asegurarse que la dosis coincide con las recomendaciones del fabricante para el contenido de cemento de la mezcla a proyectar.

La bomba de concreto y toda la línea se deben lubricar con algún tipo de lechada o similar, esto puede ser innecesario si las líneas están todavía húmedas tras la limpieza de una carga reciente. El asentamiento generalmente es evaluado visualmente por un operador con experiencia o alternativamente se puede realizar el ensayo de asentamiento. También, se puede comprobar que la mezcla no evidencia formación de colas de fibra u otros que puedan afectar el bombeo.

El operador debe estar en una posición donde disponga de buena visibilidad al punto de proyección. Cuando se opera en un extremo del túnel, el operador tendrá que estar a un costado del equipo para proyectar la primera mitad y luego requerirá caminar alrededor de la máquina y del camión para tomar una segunda posición en la que el área que se va a proyectar en el otro lado del túnel sea visible.

La técnica de proyección adecuada (figura 20) minimiza el rebote y maximiza la compactación, esto se obtiene, cuando la boquilla se mantiene a una distancia de 1 a 2 m de la superficie que se está proyectando. También, es importante el correcto ángulo de la boquilla que en lo posible debe ser perpendicular a la superficie.

Figura 20. **Técnica de proyección por el metodo robotizado**



Fuente: UNICON (Unión de Concreteras). *Shotcrete vía húmeda. Su importancia como elemento de sostenimiento de minería.* p. 46.

El operador debe proyectar primero en todas las fisuras y fallas para asegurarse de que están llenas de concreto. Luego se deben proyectar todos los ángulos escondidos y posibles zonas de acumulación de rebote. Por último, se puede proyectar sobre el sustrato la primera capa de concreto. El operador debe comenzar en el punto más bajo y trabajar hacia adelante en un patrón oscilatorio horizontal aplicando así una capa uniforme de concreto sobre la superficie.

La proyección se aplica generalmente en capas de 25 mm para evitar el desprendimiento de material. Se debe esperar al menos 10 minutos entre capas para asegurar que el concreto fragüe y permita una mejor adherencia. Es importante controlar el espesor para asegurar que se está logrando no solo el espesor sino también que la aplicación es uniforme y que el concreto lanzado no se desperdicia debido a un espesor excesivo.

Los métodos para dicho control incluyen el uso de sondas de metal, montadas en el extremo de la pluma para comprobar la profundidad del concreto

lanzado húmedo y también se pueden utilizar puntas como indicadores de profundidad antes de que comience la proyección.

Otros métodos de medición del espesor después de la proyección son: el método más común en uso es la perforación y medición de agujeros con una sonda o varilla de acero liso, aunque el pequeño número de perforaciones combinadas con el hecho que solo proporciona datos puntuales de un área en particular sugieren que es un método de valor cuestionable; además, hay una amplia evidencia de que los agujeros perforados se transforman en puntos de inicio para la fisuración del concreto.

Se pueden obtener datos más representativos mediante el escaneo tridimensional con equipos láser del área que está siendo proyectada, y más recientemente, a través de la fotometría. Se realiza un escaneo justo después del *scaling* y otro después de la proyección y ambas mediciones se comparan con lo que se obtiene un mapa de espesor.

Si se requiere el acceso a la zona para continuar con el avance, es normal que la proyección sea comprobada a través de paneles de ensayo para habilitar el reingreso. Dicho panel se debe marcar con la fecha y hora de proyección y con un penetrómetro comprobar del desarrollo de resistencia sin tener que entrar en la zona de concreto fresco. En toda zona recién proyectada se debe indicar que existe riesgo por concreto lanzado en estado fresco o húmedo.

- Curado

El concreto lanzado aplicado en obras subterráneas en entornos mineros en general no se cura, ya que es difícil de realizar debido a lo caliente que se puede encontrar la roca, las fuertes corrientes de aire y a la falta de acceso a los

túneles. Estas condiciones agravan el problema de fisuración por retracción del concreto. Hay agentes de curado internos disponibles y se estima que pueden mejorar las propiedades mecánicas del concreto en un 20 % con aumentos de costos de un 2 % a un 5 %. Actualmente, no se utilizan en ningún tipo de obra, pero representan un área potencial de mejora.

### **1.3. Metodología**

La realización de los ensayos de núcleos de concreto lanzado consta de dos procesos básicos: el muestreo del concreto por medio de paneles conformados por la producción, curado y traslado de los paneles hacia el laboratorio; y los ensayos de los núcleos extraídos de dichos paneles.

#### **1.3.1. Muestreo COGUANOR NTG 41013 h1 (ASTM C 1385/C1385M-10)**

Las muestras representativas de los materiales a ser aplicados vía concreto lanzado pueden ser tomados desde mezcladoras estacionarias, equipo de mezcla volumétrico hasta entrega en bolsa y a granel. Las muestras deben ser compuestas a menos que se exceptúen los procedimientos principales de los ensayos.

El tamaño de una muestra individual (12 kg) o compuesta (35 kg) debe ser tomada en el momento que el material está siendo ingresado a la máquina lanzadora. No se deben obtener muestras que componen la muestra compuesta del primer o del último 15 % de la descarga. Tanto el muestreo para el método de concreto lanzado por vía seca como el concreto lanzado por vía húmeda tienen un procedimiento similar, aunque este último tiene limitaciones.

El muestreo en material preempacado en bolsas es aleatoriamente para un lote (900 kg – 1 300 kg) y el muestreo de material preempacado a granel se realiza en el momento en que el material está siendo entregado a la máquina lanzadora.

### **1.3.2. Preparación y ensayo de especímenes de paneles de muestras de concreto lanzado COGUANOR NTG 41013 h2 (ASTM C 1140/C1140M-11)**

Los especímenes pueden ser utilizados para estudios preconstructivos: calificar equipo, personal; control de calidad; ensayos o como medida de precaución en caso surjan inconvenientes. Para la preparación y ensayo de los especímenes se debe seguir lo siguiente:

#### **1.3.2.1. Paneles de prueba**

Los paneles de ensayo que deben cumplir con las disposiciones de la Norma COGUANOR NTG 41013 h2, pueden ser de madera o de metal; debe tener un ancho y largo mínimo (24 pulg) y una profundidad de 3 ½ pulg con bordes cuadrados o inclinados. Si es de madera deberá tener un respaldo de *plywood* de al menos ¾ pulg de espesor y si es de metal deberá ser elaborada con un espesor de 3/16 pulg.

#### **1.3.2.2. Materiales**

Tanto la mezcla para el método de concreto lanzado vía seca como para el vía húmeda debe ser del mismo material y proporción especificada para el uso en la estructura. La única diferencia entre los materiales para cada método es

que la mezcla por vía húmeda deberá pasar con anterioridad por distintos ensayos: contenido de aire, peso unitario, asentamiento y tiempo de flujo.

### **1.3.2.3. Procedimiento**

Es recomendable realizar un panel de ensayo por cada diseño de mezcla, por operador, diario o por cada 38 m<sup>3</sup>, según Norma NTG 41013 h2; se debe especificar el aditivo a utilizar y su dosificación. Si hay barras de refuerzo deben ser incluidas pero estas serán solo para estudios de encapsulamiento, técnica de aplicación y calificación de personal. Antes de la proyección se debe humedecer o aplicarle un desmoldante al panel.

### **1.3.2.4. Curado**

Los paneles después de la proyección deben ser cubiertos y envuelto con un material o membrana que cumpla con la especificación ASTM C-171 o puede ser almacenada en un cuarto húmedo que cumpla con la Norma NTG 41059 (ASTM C-511).

### **1.3.2.5. Obtención y ensayo de especímenes**

Se extraen (bajo norma) núcleos, vigas o cubos, dependiendo del ensayo que se desee realizar. Los especímenes deben ser extraídos a partir de 1 pulg más el espesor del panel de los bordes del panel como se establece en la Norma NTG-41013 h2. Es recomendable que las superficies planas sean aserradas y que los especímenes después de ser extraídos del panel sean protegidos de daños debido a temperaturas extremas, vibraciones, agitaciones o golpes durante el proceso de hidratación.

### **1.3.3. Obtención de núcleos perforados COGUANOR NTG 41013 h2 (ASTM C1604/C1604M-05)**

Este método provee procedimientos estandarizados para la obtención de núcleos para determinar la resistencia a la compresión y a la tracción del concreto lanzado. La obtención de dichos núcleos puede requerir ciertas combinaciones de equipos, entre estos se tienen: taladro de núcleos, sierra (cortadora de disco) y piedra de esmeril (pulidora).

Las muestras de concreto lanzado que contengan malla de alambre de acero, barras o fibras de refuerzo no deben ser utilizadas para ensayos de resistencia a la compresión o a la tracción.

#### **1.3.3.1. Núcleos para resistencia a la compresión**

El diámetro de estos debe ser de al menos 75 mm (3,0 pulg), diámetros menores a este solo se permitirán si lo indica el especificador de ensayos de proyecto. La longitud (cabeceada o pulida) debe ser nominalmente dos veces el diámetro. Si la relación longitud/diámetro (L/D) del núcleo excede 2,1 se debe de reducir la longitud del núcleo de manera que la relación del espécimen cabeceado o pulido sea entre 1,9 y 2,1. Si dicha relación es 1,75 o menor, el esfuerzo a compresión se debe multiplicar por un factor de esbeltez.

Los núcleos después de la extracción deben de ser limpiados superficialmente y cuando se muestren secas (en no más de 1 hora) colocar los núcleos en bolsas plásticas o recipientes no absorbentes. Si se utiliza agua durante el aserrado o pulido del núcleo, se debe realizar a más tardar 2 días después de la extracción del mismo.

### **1.3.3.2. Núcleos para resistencia a la tracción**

Las dimensiones de estos núcleos deben cumplir con las mismas especificaciones que los utilizados para muestreo de concreto fresco con la variante que los extremos de estos no deben ser cabeceados. Las superficies de soporte deben ser rectas y libres de cualquier saliente o depresión más alta o profunda a 0,2 mm; si esto no se cumple se debe pulir o cabecear (yeso de cemento de alta resistencia) el espécimen hasta cumplir con los requerimientos.

### **1.3.4. Ensayos**

Estos se han desarrollado con el fin de determinar las propiedades del concreto lanzado en estado fresco (asentamiento, fluidez, contenido de aire y otras propiedades) y endurecido (resistencia a la compresión, flexión y a la tracción). Es importante que el laboratorio encargado de realizar dichos ensayos se encuentre acreditado y que sus técnicos estén capacitados por su confiabilidad.

#### **1.3.4.1. Asentamiento COGUANOR NTG 41052 (ASTM C143-08)**

Una de las propiedades importantes del concreto fresco es la manejabilidad, la cual se define como el grado de facilidad o dificultad con que el concreto puede ser mezclado, manejado, colocado, transportado y terminado sin que se pierda su homogeneidad. La manejabilidad no puede ser medida directamente por lo cual existe este ensayo el cual comprende la determinación de la docilidad o asentamiento del concreto lanzado, la cual es una medida de la consistencia del concreto fresco, que se refiere al grado de fluidez de la mezcla e indica que tan seco o fluido se encuentra el concreto.

#### **1.3.4.2. Fluidez (Norma ASTM C939)**

Esta una medida de la habilidad de los rellenos fluidos para desplazarse a través de aparatos cónicos de fluido estándar. El tiempo de fluidez se basa en la medición por la cual el material pasa por el cono de Marsh. Es un ensayo sencillo que determina el tiempo en que una mezcla fluye por la parte superior del cono, manteniendo cerrado el orificio de salida; posteriormente, se abre dicho orificio y a partir de ese momento se contabiliza el tiempo que tarda en fluir la mezcla que se mide en una probeta graduada.

También, se puede obtener con el ensayo de asentamiento pero en lugar de medir el hundimiento o desplazamiento vertical, se mide la propagación media del concreto, ya sea con el cono en su posición recta normal o invertida, de una sola vez sin apisonamiento o vibración. Se levanta el molde y se deja al concreto fluir. Posteriormente que el concreto termine su extensión se miden dos diámetros de la masa de concreto en direcciones ortogonales, obteniendo así el flujo de asentamiento conforme a la Norma ASTM C1611.

#### **1.3.4.3. Contenido de aire**

La resistencia a la compresión es afectada cuando el contenido de aire es alto; también, es necesario en casos de tener un clima con condiciones severas de temperatura muy baja, ya que el aire incorporado en ciertas cantidades favorece la resistencia a las bajas temperaturas, sobre todo en casos en que el agua atrapada internamente aumenta su volumen cuando entra en congelamiento. Para obtener el contenido de aire del concreto lanzado se tiene el siguiente ensayo:

- COGUANOR NTG 41017 h7 (Norma ASTM C231): este método permite la determinación del contenido de aire en el concreto fresco mediante el método de presión. Este ensayo es particularmente importante, ya que los aditivos incorporadores de aire pueden mejorar o facilitar el bombeo de las mezclas, además de especificarse cuando el concreto queda expuesto a zonas de ciclos de hielo y deshielo.

#### **1.3.4.4. Resistencia a la compresión COGUANOR NTG 41017 h1 (ASTM C39/C39M)**

La resistencia a la compresión que tendrá el concreto es importante conocerla debido a que esto determinará si este se encuentra dentro de los parámetros requeridos en obra. La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen (generalmente cilindros con las siguientes dimensiones: 15 cm de diámetro y 30 cm de altura) a carga axial. Generalmente, se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) a una edad de 28 días, que es cuando alcanza la máxima resistencia; se le conoce con el símbolo  $f'_c$ . Para la obtención de una carga axial pura los especímenes se deberán nivelar las dos caras ya sea por discos de neopreno o por medio de azufre. El esfuerzo que soportan los cilindros no dependen solamente del material de fabricación, depende de la proporción de la mezcla, temperatura, dimensiones, humedad, curado y edad.

#### **1.3.4.5. Resistencia a la tracción COGUANOR NTG 41017 h15 (ASTM C496/C496M)**

El ensayo consiste en aplicar una fuerza de compresión diametral a lo largo de la longitud del espécimen cilíndrico de concreto. Esta carga induce esfuerzos de tracción sobre el plano que contiene la carga aplicada y esfuerzos de

compresión relativamente altos en el área inmediatamente alrededor de la carga aplicada. Ocurre más bien la falla por tracción, en vez de la falla por compresión ya que las áreas de aplicación de carga están en un estado de compresión triaxial, permitiendo de ese modo soportar esfuerzos de compresión mucho más altos que los que estarían indicados por un resultado de ensayo de resistencia a la compresión uniaxial.

#### **1.4. ACI 506 y la evaluación del grado de testigos**

El Código ACI 506.2-95 (*Especificaciones para shotcrete*) contiene y describe las exigencias de construcción para la aplicación de concreto lanzado como la lista de requisitos para este, aseguramiento de calidad, características (*in situ*), proyección y acabado. Tanto el método por vía seca como por vía húmeda son especificadas; además, son proporcionados los estándares mínimos para pruebas y materiales.

##### **1.4.1. Aseguramiento de calidad**

La preparación de los paneles de ensayo en la etapa de preconstrucción para ser evaluados por el ingeniero antes de la colocación del concreto lanzado debe estar de acuerdo a la Norma COGUANOR NTG 41013 h2 (ASTM C-1140). Los paneles se deben producir para cada mezcla propuesta, en cada sentido de proyección u orientación y con cada operador. En el desarrollo de las pruebas se debe considerar siempre dos tipos de paneles (sin refuerzo y con refuerzo). La evaluación de los testigos con refuerzo se clasifica por grado del concreto, se lleva a cabo por inspección visual de las muestras reforzadas y se evalúa según los grados básicos establecidos en el Código ACI 506.2.

A menos que se especifique lo contrario, solo al operador con un panel con testigos evaluados con un grado menor o igual a 2,5 según la evaluación de grados básicos (tabla XIV), se le permitirá proyectar concreto en el trabajo solicitado. Cuando se rechaza el panel de prueba de precalificación puede solicitarse una segunda. Cabe mencionar que dicha evaluación al operador puede ser omitida si este es certificado por ejemplo por el ACI 506.3R (*Guide to certification of shotcrete nozzleman*).

Tabla XIV. **Clasificación del grado de testigos de concreto lanzado**

| Grados de los núcleos de testigos |   | Descripción  |
|-----------------------------------|---|--|
| Grado 1                           |   | Las muestras son sólidas, no hay láminas, zonas arenosas o huecos, puede presentar pequeños huecos de aire no mayores a 1/8 pulgada y de longitud máxima a 1/4 pulgada, detrás de los refuerzos de acero no pueden haber bolsas de arena o huecos.                                   |
| Grado 2                           |  | Las muestras no tendrán más de 2 láminas o zonas de arena con dimensiones que excedan 1/8 pulgadas de espesor y 1 pulgada de largo. La altura, anchura y profundidad de los huecos no debe superar las 3/8 pulgadas, áreas porosas detrás del acero no deben superar la 1/2 pulgada. |
| Grado 3                           |  | Las muestras no tendrán más de 2 láminas o zonas de arena con dimensiones que excedan 3/16 pulgadas de espesor y 1-1/4 pulgada de largo. Las bolsas de arena o vacíos, no deben exceder las 5/8 pulgadas de espesor y 1-1/4 pulgadas de ancho.                                       |
| Grado 4                           |  | Es similar al de grado 3 pero puede tener una falla con una dimensión máxima de 1 pulgada perpendicular a la cara del núcleo, con un ancho máximo de 1-1/2 pulgadas. Contiene vacíos que debido al excesivo rocío de hormigón que pueden alcanzar una profundidad de 1/8 pulgadas.   |
| Grado 5                           |  | Si no cumple las condiciones del núcleo 4 y es de peor calidad se clasificará como de grado 5.   |
| Determinación del grado           |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para determinar el grado deberá ser por lo menos de 3 muestras.</li> <li>• La clasificación media de 2,5 o menos es aceptable, a menos que se especifique lo contrario, individualmente no pueden ser mayores que 3.</li> </ul>             |

Fuente: elaboración propia.

## **2. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **2.1. Elaboración del concreto**

El concreto lanzado elaborado fue del tipo vía húmeda; se inicia cargando los agregados en las tolva de la planta central, los cuales son transportados en una banda a la mezcladora (tipo turbo mezclado) en donde serán mezclados en volumen con el cemento, el cual es obtenido del área de descarga de cemento a granel. Luego de que la mezcla sea homogénea, se agregan volumétricamente el agua y los aditivos químicos que se deseen agregar y finalmente se mezcla por última vez.

Por último, la mezcla es entregada en camiones mixer (de acuerdo con los requisitos de la Norma ASTM C-94), los cuales deben transportar el concreto hacia el lugar de proyección. El concreto lanzado, que incluya fibras, debe agregarse en cualquier secuencia que permita la mezcla y dispersión uniforme. Todo el concreto deberá ser proyectado dentro de las 2 horas después de ser agregada el agua a la mezcla, a menos que se utilicen retardantes de fraguado aprobados para extender la vida de trabajo del concreto lanzado.

#### **2.1.1. Equipo de trabajo**

La elaboración del concreto lanzado se realizó en una planta central (figura 21), aquí se realiza la dosificación de los materiales para la mezcla mediante un programa computarizado. La planta central se encuentra ubicada a 1 km de la entrada al túnel subterráneo para no tener retrasos en la entrega de la mezcla. Dicha planta central se encuentra conformada por:

- Tolvas para agregados y descarga de cemento a granel
- Banda transportadora de agregados a mezcladora
- Mezcladora tipo turbomezclado
- Descarga de mezcladora a camión mixer

Figura 21. **Planta central concreto lanzado**



Fuente: elaboración propia.

## **2.2. Proceso de fabricación**

La elección del proceso más adecuado a utilizar dependerá en definitiva del tipo de aplicación particular de que se trate; en este caso, es el tipo de concreto lanzado húmedo; dicho proceso contempla:

### **2.2.1. Proporción de los materiales**

La proporción teórica en peso utilizada en la elaboración del concreto lanzado por vía húmeda fue la siguiente: 1 : 3 : 1,13 : 0,46. Dicha proporción es la misma para las mezclas muestreadas; solamente la utilización de refuerzo de fibras de acero en unos moldes de muestreo.

El método utilizado para el diseño de las proporciones es un sistema computarizado, al cual solo se le debe indicar la cantidad de metros cúbicos que se desean proyectar y por resultado da las cantidades necesarias de agregados (arena triturada y piedrín 3/8" en kg), cemento (tipo I en kg) y agua (litros).

### **2.2.2. Mezclado**

El mezclado de los agregados (arena triturada y piedrín 3/8") y del cemento se realiza en una mezcladora central tipo turbomezcladora, la cual consta de una cuba fija y en el interior de la misma gira un rotor con unos brazos suspendidos y terminados en unas paletas, de forma que hay una gran velocidad periférica constante (3 a 4 m/s). Luego de que se obtiene una mezcla uniforme, se agrega el agua y si se utilizan también las fibras de refuerzo (fibras metálicas con una longitud de 60 mm con extremos conformados y un diámetro de 0,75 mm). Por último, después de tener una mezcla homogénea, se procede a enviar el concreto a camiones mixer para su traslado.

### 2.2.3. Lanzado

Se inicia con una inspección del equipo antes de ser trasladado al lugar de trabajo, ubicándolo en un lugar seguro para realizar una inspección del frente a proyectar. Luego se realiza un lavado de techos y hastiales desde 12 metros atrás del frente para eliminar el polvo y hacer caer las rocas que estén sueltas del sustrato (figura 22).

Figura 22. Inspección



Fuente: elaboración propia.

Se realiza otra inspección luego del lavado como la ventilación, servicios, fortificación, posible presencia de tiros quedados (explosivos no detonados), orden y limpieza. Se delimita el área de trabajo con letreros de seguridad o cinta reflectiva. Se procede a instalar el equipo de lanzado en el área de trabajo. El concreto es trasladado al área de proyección por medio de camiones mixer, el cual deberá de ser colocado de retroceso de tal manera que la canaleta quede a nivel de la tolva del lanzador de concreto para descargar.

Antes de iniciar el lanzado, el operador tiene la obligación de colocarse todo el EPP. Con el telemando se dará inicio a la proyección del concreto empezando desde abajo hacia arriba, cajas laterales hacia la caja techo; esto se realizará las veces necesarias hasta cumplir con la recomendación geomecánica (figura 23). Culminado el lanzado de la primera capa se colocarán calibradores de 2" en los hastiales y techo para control de espesor.

Figura 23. **Proyección concreto**



Fuente: elaboración propia.

Una vez culminado el lanzado de concreto, se debe recoger toda la herramienta y el equipo utilizado; se apagará el sistema eléctrico de la lanzadora y se procede a realizar el lavado del equipo en un área designada.

#### **2.2.4. Muestreo**

El muestreo se realizó conforme a la Norma COGUANOR NTG 41013 h3, la cual indica que deben ser conforme a los paneles de ensayo que deben cumplir con las disposiciones de la Norma COGUANOR NTG 41013 h2.

Primero, los paneles fueron engrasados y luego se colocaron con un ángulo (entre 40° a 45°) para la proyección de concreto (figura 24). La boquilla de la máquina lanzadora se colocó a 90° de los paneles y a una distancia de 1,5 metros. La proyección se realizó primero en los bordes de los paneles hacia la parte central, realizando así una proyección de una sola capa.

Figura 24. **Muestreo en paneles**



Fuente: elaboración propia

### **2.2.5. Curado**

Posteriormente de haber realizado la proyección sobre los paneles de prueba, se espera un tiempo prudente para sacarlos del área de lanzado y realizar el proceso de curado. El curado se basó en cubrir los paneles en una membrana (la cual cumple con la especificación de la Norma ASTM C-171) en un área donde la temperatura ambiente no afectará al proceso.

El tiempo varía dependiendo de las condiciones del lugar y de los materiales, por lo tanto, es mejor que este proceso dure hasta el final de los respectivos ensayos de los especímenes.

### 2.2.6. Desencofrado

Los paneles para la obtención de especímenes luego de haber pasado por el proceso de curado deben ser desencofrados; dicho proceso se realiza después de 24 horas de haber sido proyectados.

El desencofrado (figura 25) se realizó con un martillo de goma con el cual se golpean levemente los costados y el fondo del panel (teniendo siempre el cuidado de no lastimar en ningún momento el concreto) con el fin de despegar el panel de concreto. Por último, con mucho cuidado, se inclina el molde (continuar golpeando el molde) y se empieza a desprender y deslizar el panel de concreto gracias a la inclinación en los bordes del molde y al desencofrante colocado antes de la proyección, obteniendo así el panel de concreto lanzado. Luego de ser desencofrados los paneles, se procede a cubrir con las membranas para que continúen el proceso de curado.

Figura 25. **Desencofrado**



Fuente: elaboración propia.

### 2.2.7. Extracción de núcleos

Los núcleos cilíndricos deben ser extraídos de los paneles de concreto lanzado por medio de un taladro, el cual por medio de brocas con la orilla de diamante, unidos al tambor central en el área disponible para su obtención de acuerdo al requerimiento de la Norma COGUANOR 41013 h2 (ASTM C-1140). Se debe aplicar agua al tambor para enfriar, también, para tener los cortes enjuagados durante la operación.

El taladro debe ser colocado en una base rígida para no perder la verticalidad y debe ser capaz de ser operado en cualquier orientación normal al panel de muestreo. No debe tener vibraciones, ya que el núcleo puede tener una mala verticalidad; debe tener un torque suficiente y una velocidad constantes para mantener un ritmo constante de penetración (figura 26).

Figura 26. Extracción de núcleos



Fuente: elaboración propia.

Las brocas para la extracción de núcleos cilíndricos tienen un diámetro de 4,5 cm y la altura es la establecida en las dimensiones de los panes de prueba, siempre teniendo en cuenta que debe cumplir con la relación de esbeltez.

### **2.3. Ensayos de laboratorio**

El objetivo de los ensayos consiste en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de su uso. Se deben realizar los ensayos pertinentes a cada uno de los materiales a utilizar para la elaboración de concreto lanzado, para garantizar la buena calidad en su uso y aplicación en este tipo de concreto, más a los materiales pétreos, ya que estos constituyen aproximadamente el 75 % del volumen total del concreto.

Con el propósito de garantizar la calidad del concreto lanzado se realizaron los ensayos a concreto fresco y endurecido utilizando los procedimientos y especificaciones establecidas en las normas COGUANOR NTG y ASTM, en la Sección de Agregados, Concretos y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

#### **2.3.1. Concreto fresco**

Los diversos métodos empleados para analizar el concreto fresco no son distintos a los que se utilizan para analizar el concreto convencional. Durante el período cuando el concreto se comporta como un líquido se lo denomina en estado fresco. Dicho lapso dura entre 1 y 3 horas. Para lograr obtener resultados exactos, primero se debe realizar una buena dosificación de materiales. En estos tipos de ensayos se obtienen muestras representativas del concreto fresco para

verificar el cumplimiento de las especificaciones del concreto. Los ensayos son los siguientes:

### 2.3.1.1. Asentamiento

Las muestras representativas tanto de concreto lanzado sin refuerzo como con refuerzo para dicho ensayo se obtuvieron del camión mixer el cual traslada la mezcla desde la planta mezcladora hacia el punto de proyección.

Finalmente, se realiza el ensayo colocando el molde troncocónico sobre una superficie horizontal; luego, se procedió a llenar por completo el molde (sin apisonar); por último, se enrasa la parte superior y se levanta el molde y se mide la distancia o diferencia vertical entre la parte superior del cono y el centro desplazado de la superficie superior de la muestra (figura 27).

Figura 27. **Ensayo de asentamiento**



Fuente: elaboración propia.

### 2.3.1.2. Fluidez

Este ensayo se realizó al mismo tiempo que el de asentamiento, ya que es el mismo procedimiento de este; solamente que en este ensayo se toman dos diámetros perpendiculares al finalizar el descenso de la muestra de concreto (figura 28).

También, se valoró cualitativamente la mezcla en términos visuales, la segregación o la presencia de áridos gruesos acumulados irregularmente sobre la mezcla según Norma COGUANOR NTG 41017 H22 (ASTM C1611).

Figura 28. **Ensayo de fluidez**



Fuente: elaboración propia.

### 2.3.2. Concreto endurecido

El concreto endurecido corresponde a aquella etapa en la cual el concreto comienza a hidratarse y a endurecer.

Las características tanto físicas como químicas mostradas por el concreto endurecido son el resultado de un acucioso control de calidad, iniciado desde los ensayos a los componentes del concreto lanzado según las normas correspondientes hasta los ensayos de concreto endurecido.

### 2.3.2.1. Contenido de aire

Este ensayo no se realizó bajo normas, ya que fue de forma experimental de forma similar a como se realiza el porcentaje de absorción (figura 29). Dicho ensayo se realiza sumergiendo el núcleo cilíndrico en agua limpia durante 24; horas, al finalizar el tiempo, se retira del agua limpiando superficialmente el agua y se toma la masa húmeda. Luego de tomar la masa húmeda, se pone a secar el núcleo en un horno a peso constante. Por último, por medio de una fórmula matemática se conoce el porcentaje de absorción.

Figura 29. **Ensayo porcentaje de absorción**



**Espécimen en  
estado seco**



**Espécimen en estado  
seco-saturado**

Fuente: elaboración propia.

Otro ensayo experimental para conocer el contenido de aire del concreto endurecido es colocar un volumen conocido de agua en un probeta graduada y colocando dentro de esta el núcleo cilíndrico para observar el desplazamiento de volumen de agua (figura 30). Con este ensayo también se puede conocer la densidad del concreto dividiendo la masa del núcleo cilíndrico entre el desplazamiento de volumen de agua.

Figura 30. **Ensayo experimental**



Fuente: elaboración propia.

### **2.3.2.2. Longitud de núcleos**

Este ensayo se realizó siguiendo el método de ensayo en la obtención de núcleos perforados integrados en la Norma COGUANOR NTG 41013 h3 (ASTM C-1604), en donde determina que los núcleos cilíndricos perforados de concreto lanzado deben cumplir con la relación L/D.

Los núcleos luego de ser extraídos se miden para observar si cumplen con la relación L/D marcándolos para luego ser cortados y cabeceados, verificando que cumplan con la relación aceptable y con lo cual no sea menor a 1,75 (figura 31).

Figura 31. **Núcleo cabeceado con azufre**



Fuente: elaboración propia.

### **2.3.2.3. Resistencia a la compresión**

Los núcleos extraídos se ensayaron de acuerdo con la Norma COGUANOR NTG 41017 h1 (ASTM C-39); dichos núcleos debieron ser cabeceados por el método de azufre para tener los extremos planos y perpendiculares al eje longitudinal (garantizando así que la carga se aplique de forma axial al núcleo); además, deben de cumplir con la relación L/D para ser ensayados.

Las edades a las cuales los núcleos fueron ensayados son: 21 y 28 días, ensayando por edad 10 núcleos; tomando como aceptable el ensayo cuando el

esfuerzo a compresión de estos estuviese dentro del  $\pm 10\%$  del promedio de estos (figura 32). En los ensayos de resistencia a la compresión, la velocidad de aplicación de la carga debe estar entre los límites estipulados y debe continuar aplicándose hasta cuando se tenga certeza de que se ha alcanzado la capacidad máxima y el indicador de carga señale que está disminuyendo de manera constante.

Figura 32. **Ensayo de compresión**



Fuente: elaboración propia.

#### **2.3.2.4. Resistencia a la tracción**

En este ensayo se realizó de acuerdo con la Norma COGUANOR NTG 41017 h15 (ASTM C-496), el cual consiste en someter a rotura por tracción indirecta al núcleo mediante compresión diametral, dicho ensayo permite determinar el valor de tracción indirecta. Las edades a las cuales los núcleos

fueron ensayados son: 21 y 28 días, ensayando por edad 4 núcleos; se tomó como aceptable el ensayo cuando el esfuerzo de tracción de estos estuviese dentro del  $\pm 10\%$  del promedio de estos (figura 33).

Este ensayo se realizó en el mismo equipo utilizado para los ensayos de resistencia a compresión, solamente que el núcleo se colocó en posición horizontal sometiéndola así a compresión sobre sus dos generatrices opuestas, lo cual generó tracción en el plano vertical sobre el que se ejerce la presión y produjo la rotura de la probeta, por tracción, en ese plano.

Figura 33. **Ensayo de tracción**



Fuente: elaboración propia.

### **3. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los resultados de los distintos ensayos se describen en este capítulo, se resumen e interpretan cada uno. Los informes de las pruebas realizadas se incluyen en anexos. Los procedimientos de cada uno de los ensayos fueron descritos anteriormente.

#### **3.1. Resumen de resultados**

Los aspectos a tratar en este apartado son los que están relacionados con el análisis de los resultados obtenidos de los distintos ensayos del concreto fresco y endurecido.

##### **3.1.1. Concreto fresco**

Los ensayos sobre concreto fresco son parámetros para determinar si el concreto llegado de planta está en condiciones para su aplicación.

Un concreto de calidad uniforme y satisfactoria requiere que los materiales se mezclen hasta que tenga una apariencia homogénea; por lo tanto, la trabajabilidad de una mezcla puede definirse como la facilidad que presenta para esta ser mezclada, transportada y colocada. Un componente muy importante de la trabajabilidad es la consistencia o fluidez de la mezcla que abarca los grados desde la más seca hasta la más fluida.

Los resultados de los distintos ensayos realizados al concreto fresco se muestran a continuación en la tabla XV.

Tabla XV. **Resultados ensayos concreto fresco**

| Concreto lanzado | Asentamiento (cm) ASTM C-143 | Flujo de asentamiento (cm) ASTM C 1611 | Contenido de aire método experimental (%) | Absorción (%) | Clasificación de estabilidad (ASTM C1611) |
|------------------|------------------------------|--|---|---------------|---|
| Sin fibra        | 21,30                        | 45,85                                  | 1,59                                      | 10,91         | 0   |
| Con fibra        | 19,60                        | 33,02                                  | 3,88                                      | 13,46         | 1   |

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. **Concreto endurecido**

Las características físicas mostradas por el concreto endurecido son el resultado de un acucioso control de calidad, iniciado desde las pruebas a los componentes según las normas correspondientes hasta la rotura de los especímenes extraídos de un panel. El curado, extracción y ensayo de los especímenes fueron de la misma manera; a efecto de que esto no fuera variable, las probetas para los ensayos se ensayaron a 21 y 28 días.

El ensayo de calidad al concreto es el ensayo de resistencia a la compresión, debido a que el concreto es un material frágil, este tiene una resistencia mayor a cargas que inducen los esfuerzos de compresión. El ensayo de tracción indirecta muestra el comportamiento en servicio de las estructuras de concreto conforme al análisis de estados de fisuración.

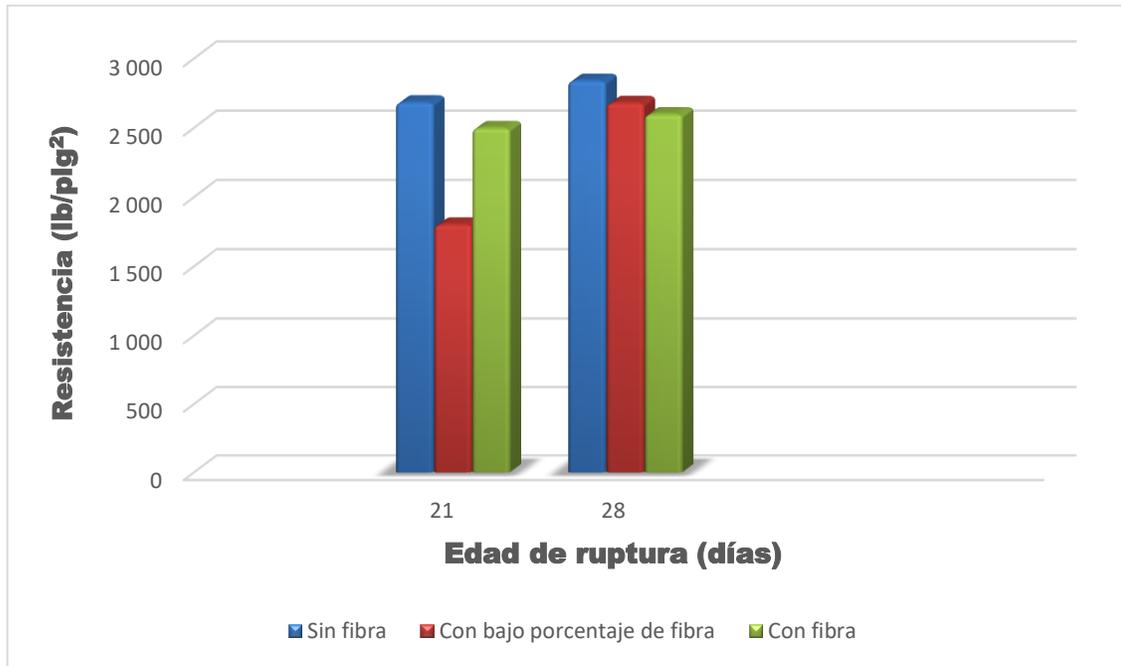
En las tablas XVI y XVII se presentan respectivamente los resultados relativos a las resistencias a la compresión y tracción indirecta en las edades antes mencionadas del concreto lanzado. Asimismo, en las figuras 34 y 35 se visualiza la evolución de dichas resistencias promedio.

Tabla XVI. Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas

| Concreto lanzado             | Edad de ruptura (días) | Carga última (lb) | Resistencia (lb/plg <sup>2</sup> ) | Resistencia de diseño (lb/plg <sup>2</sup> ) | Variación |              |                       |
|------------------------------|------------------------|-------------------|------------------------------------|--|-----------|--------------|-----------------------|
|                              |                        |                   |                                    |  | Absoluta  | Relativa (%) | Relativa Promedio (%) |
| Sin fibra                    | 21                     | 6 700             | 2 730                              | 3 600  | - 870     | -24,17       | -25,50                |
|                              |                        | 6 300             | 2 570                              |  | -1 030    | -28,61       |                       |
|                              |                        | 6 500             | 2 640                              |  | - 960     | -26,67       |                       |
|                              |                        | 6 600             | 2 700                              |  | - 900     | -25,00       |                       |
|                              |                        | 6 800             | 2 770                              |  | - 830     | -23,06       |                       |
|                              | 28                     | 6 900             | 2 790                              | -1 210                                       | -30,25    |              |                       |
|                              |                        | 7 100             | 2 890                              | -1 110                                       | -27,75    |              |                       |
|                              |                        | 6 700             | 2 730                              | -1 270                                       | -31,75    |              |                       |
|                              |                        | 7 100             | 2 890                              | -1 110                                       | -27,75    |              |                       |
|                              |                        | 7 100             | 2 890                              | -1 110                                       | -27,75    |              |                       |
| Con bajo porcentaje de fibra | 21                     | 4 000             | 1 650                              | -1 950                                       | -54,17    | -50,00       |                       |
|                              |                        | 4 700             | 1 930                              | -1 670                                       | -46,39    |              |                       |
|                              |                        | 4 600             | 1 870                              | -1 730                                       | -48,06    |              |                       |
|                              |                        | 4 200             | 1 710                              | -1 890                                       | -52,50    |              |                       |
|                              |                        | 4 500             | 1 840                              | -1 760                                       | -48,89    |              |                       |
|                              | 28                     | 6 600             | 2 680                              | -1 320                                       | -33,00    |              |                       |
|                              |                        | 6 700             | 2 730                              | -1 270                                       | -31,75    |              |                       |
|                              |                        | 6 300             | 2 570                              | -1 430                                       | -35,75    |              |                       |
|                              |                        | 6 500             | 2 640                              | -1 360                                       | -34,00    |              |                       |
|                              |                        | 6 800             | 2 770                              | -1 230                                       | -30,75    |              |                       |
| Con fibra                    | 21                     | 3 900             | 1 550                              | -2 050                                       | -56,94    | -30,64       |                       |
|                              |                        | 5 400             | 2 160                              | -1 440                                       | -40,00    |              |                       |
|                              |                        | 6 900             | 2 770                              | - 830  | -23,06    |              |                       |
|                              |                        | 7 600             | 3 055                              | - 545  | -15,14    |              |                       |
|                              |                        | 7 300             | 2 950                              | - 650  | -18,06    |              |                       |
|                              | 28                     | 5 100             | 2 090                              | -1 910                                       | -47,75    |              |                       |
|                              |                        | 7 100             | 2 950                              | -1 050                                       | -26,25    |              |                       |
|                              |                        | 7 000             | 2 890                              | -1 110                                       | -27,75    |              |                       |
|                              |                        | 5 400             | 2 210                              | -1 790                                       | -44,75    |              |                       |
|                              |                        | 6 900             | 2 840                              | -1 160                                       | -29,00    |              |                       |

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Evolución resistencia a compresión



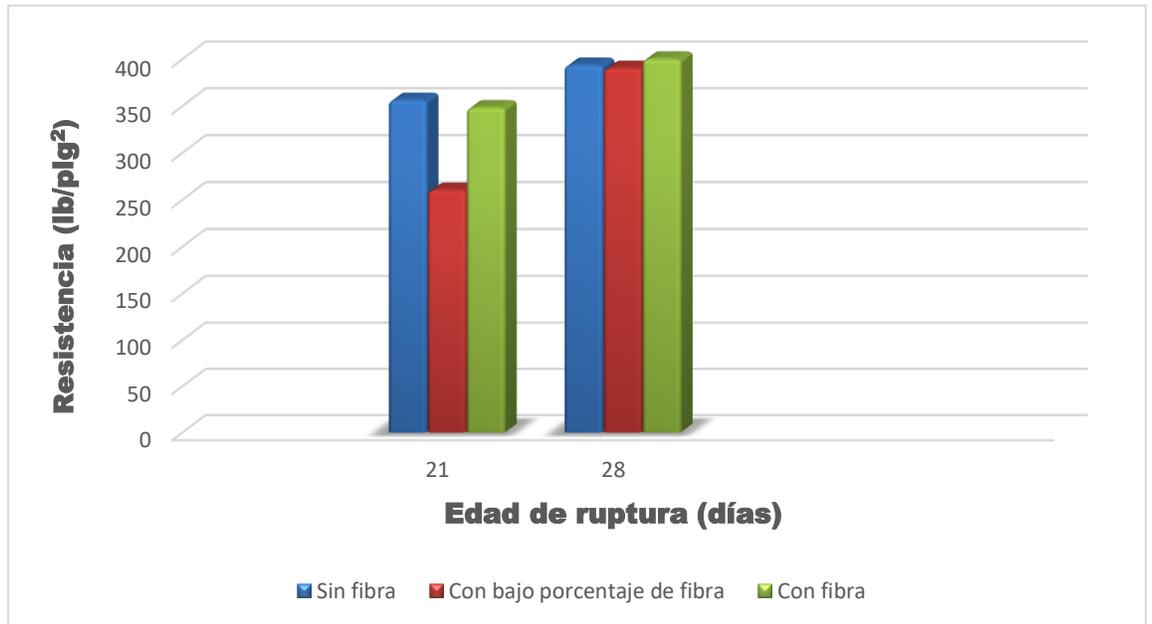
Fuente: elaboración propia

Tabla XVII. Resistencia a tracción indirecta de muestras cilíndricas

| Concreto lanzado             | Edad de ruptura (días) | Carga última (lb) | Resistencia (lb/plg²) | 10 % f'c (lb/plg²) | Variación relativa (%) Resistencia – 10 % f'c |
|------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---|
| Sin fibra                    | 21                     | 3 500             | 360                   | 268,2              | + 34,2  |
|                              | 28                     | 3 600             | 390                   | 283,8              | + 37,4  |
| Con bajo porcentaje de fibra | 21                     | 2 700             | 260                   | 180                | + 44,4  |
|                              | 28                     | 3 800             | 390                   | 267,8              | + 45,6  |
| Con fibra                    | 21                     | 3 400             | 380                   | 249,7              | + 52,2  |
|                              | 28                     | 4 300             | 400                   | 259,6              | + 54,1  |

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Evolución de resistencia a tracción indirecta



Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Interpretación de resultados

En función de los resultados de los ensayos realizados a las muestras cilíndricas ensayadas a los 21 y 28 días de edad, se establece lo siguiente:

#### 3.2.1. Concreto fresco

El asentamiento del concreto lanzado sin fibra muestra una disminución considerable, ya que este es un concreto muy fluido y con una alta relación a/c, el asentamiento se reduce debido a la incorporación de fibras; sin embargo, no es tan considerable tal diferencia comparado sin la incorporación de estas.

El flujo de asentamiento del concreto lanzado sin fibra y con fibra presentó una capacidad de fluir libre, menor a las clasificaciones del concreto autocompactante, ya que este necesita de la fuerza de lanzado para su compactación; además, se puede indicar que el concreto lanzado sin fibra posee una mayor fluidez en el sistema de lanzado, pues el flujo de asentamiento es mayor que el del concreto que posee fibras.

La estabilidad del concreto lanzado para resistir a la segregación de la pasta de los agregados se pudo establecer mediante una clasificación visual de estabilidad (ASTM C 1611) a la mezcla luego de que esta finalizara su fluidez del ensayo de asentamiento; el concreto lanzado con fibra posee una clasificación 0 (altamente estable) y el concreto lanzado con fibra una clasificación 1 (estable); en general, es deseable una clasificación de 0 a 1 requiriendo algunas aplicaciones una clasificación 0, ya que la estabilidad del concreto es fundamental para un proyecto exitoso.

El contenido de aire para la mezcla sin fibra fue de 1,59 % y para las mezclas con fibra fue de 3,88 %, en promedio. Los valores se consideran como normales para ambas mezclas, lo que puede indicar que no hay efecto significativo por la adición de la fibra, aunque depende del porcentaje que se adicione y del tamaño del agregado grueso a utilizar.

### **3.2.2. Concreto endurecido**

Bajo compresión uniaxial, el modo de falla de los especímenes cilíndricos presentan una fisuración típica, caracterizada por la formación de grietas paralelas a la dirección de la carga. Como se observa, a medida que se incrementa el contenido de la fibra, la presencia de estas permite que en la falla,

el cilindro no se destruya completamente, como es el caso de la mezcla sin fibra, donde el espécimen se destruye.

Los resultados de compresión de la mezcla sin fibra se encuentran dentro del rango del  $\pm 10$  % promedio de los 10 especímenes cilíndricos ensayados; por lo cual se puede indicar que el ensayo fue satisfactorio; mientras que en la mezcla con fibra existe una variabilidad de la resistencia a la compresión a medida que se incrementa la adición de fibra en la mezcla (figura 34); esto puede estar asociado a que las fibras generan una baja adherencia fisicoquímica con la pasta de cemento que afectan negativamente su dispersión en la matriz.

La resistencia nominal de diseño de la mezcla fue de 4 000 lb/plg<sup>2</sup>. Dicha resistencia al ser comparada con la resistencia de los especímenes cilíndricos ensayados en laboratorio tiene una diferencia relativa de -29,05 % (mezcla sin fibra a los 28 días). El valor promedio de la resistencia a la compresión de la mezcla de concreto lanzado húmedo sin refuerzo de fibra fue de 2 339 lb/plg<sup>2</sup>, lo que es igual a un 58,48 % de la resistencia de diseño de la mezcla. Tal diferencia se debe principalmente a la forma de muestrear el concreto lanzado como concreto convencional; además, puede deberse a muchos factores:

- No se tiene un buen manejo de la relación a/c, debido a que los materiales constituyentes no se mantienen resguardados de la intemperie; además, no se tiene un control de la cantidad de agua a adicionarse en la mezcla.
- Se deben realizar todos los ensayos pertinentes a los materiales constituyentes para conocer la calidad de los mismos antes de realizar el diseño de mezcla.
- La velocidad de la proyección no es la idónea.

- Cantidad de químicos que se agregan a la mezcla.

Bajo tracción indirecta los especímenes cilíndricos de referencia presentan una falla típica que se caracteriza por la rotura repentina del cilindro, que se considera como falla frágil; mientras que los especímenes de concreto con fibra presentan una falla dúctil típica.

La resistencia a la tracción indirecta de los ensayos efectuados no puede ser comparada respecto de la tracción indirecta de diseño ya que no se conoce dicho valor de diseño; pero gracias a que el concreto es un material que presenta una resistencia a la tracción baja por el orden del 10 % del  $f'c$ , se observa que dicha resistencia es superior para todas las mezclas (sin fibra, con bajo porcentaje de fibra y con fibra); pero debido a la adición de fibra dicha resistencia va en aumento hasta en un 54,1 % por arriba de la resistencia ya que la fibra tiene la propiedad de mejorar la tenacidad y la tracción.

Como se observa en la figura 35, la resistencia a la tracción indirecta determinada mediante la prueba de compresión diametral, no se observa diferencia entre los valores encontrados para las mezclas sin fibra y con fibra exceptuando los de bajo porcentaje de fibra.

Gracias a la variabilidad de los resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta de concreto lanzado con fibra, descritos en las tablas XVI y XVII respectivamente, se puede indicar que la Norma COGUANOR NTG 41017 h2 se encuentra en lo correcto al indicar que no se deben realizar dichos ensayos, tanto al concreto lanzado con adición de fibra de cualquier tipo como las muestras que contengan mallas de alambre de acero y barras de refuerzo. La incorporación de superplastificantes favorece y mejora la dispersión de la fibra en la matriz, que como resultado un leve incremento de la resistencia.

## CONCLUSIONES

1. El procedimiento de muestreo indicado en la Norma COGUANOR NTG 41013 h2 es ambigua, ya que no se encuentra detalladamente el procedimiento de muestreo a proyección de concreto sobre los paneles de prueba, por ejemplo, indicando la distancia de la boquilla sobre el panel, ángulo de inclinación del panel, forma de proyección sobre el panel, forma de enrasado y el tiempo para mover el panel luego de su proyección.
2. Los procedimientos para muestreo de los materiales constituyentes del concreto lanzado se encuentran adaptadas al medio; se puede así realizárseles los distintos ensayos para determinar el cumplimiento de las especificaciones de las normas.
3. Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión (a los 28 días) de los especímenes cilíndricos de concreto lanzado por vía húmeda sin fibra y con bajo porcentaje de fibra presentaron resultados satisfactorios, estos son  $f'c = 199,54 \text{ kg/cm}^2$  (2 917 PSI) y  $f'c = 188,29 \text{ kg/cm}^2$  (2 678 PSI), respectivamente; no así para los que tenían fibra en un porcentaje más alto pues estos tenían una variación muy alta en sus resultados debido a que las fibras trabajan a tensión y no a compresión.
4. La resistencia a la tracción (a los 28 días) de especímenes cilíndricos obtenida para la mezcla de concreto lanzado por vía húmeda obtuvo resultados satisfactorios para cada tipo de concreto lanzado (sin fibra, con bajo porcentaje de fibra y con fibra) respecto a que el concreto presenta una resistencia a la tracción baja por el orden del 10 % del  $f'c$ . Gracias a

los resultados obtenidos, a que la fibra trabaja a tensión y a que este ensayo es denominado también como tensión indirecta, se puede indicar que la fibra en la mezcla proporciona una mejor adherencia y, por lo tanto, mejores resultados.

5. El diseño de los paneles de prueba con formaletas de madera y bordes inclinados utilizados para muestreo de concreto lanzado descritos en la Norma COGUANOR NTG 41013 h2 son perfectos, ya que resisten la proyección, se acomodan al trabajo y además los bordes inclinados ayudan a desencofrar; pero su transporte luego de su proyección es complicado debido tanto a su peso como también a que no poseen agarraderas.
6. El uso de fibras en el concreto lanzado es de gran ayuda, ya que mejora la propiedad de tenacidad y tracción, este último determinado gracias a los resultados obtenidos en los ensayos de tracción indirecta, debido a que las fibras generan una mayor adherencia; pero no así la propiedad de compresión, ya que gracias a los resultados obtenidos en los ensayos se demuestra por qué el ensayo no es factible para dicho tipo de concreto lanzado, ya que los resultados con bajo porcentaje de fibra, aunque si se encuentran dentro del rango de aceptación, son menores a los que no poseen fibra y los que tienen un mayor porcentaje de fibras son muy dispersos debido a que las fibras no se distribuyen uniformemente en la mezcla; no se puede así determinar de manera exacta la resistencia a la compresión.

## RECOMENDACIONES

1. Considerar agregar a la norma guatemalteca un procedimiento de muestreo en el panel más detallado, por ejemplo, indicando la distancia de la boquilla con el panel, ángulo de inclinación del panel y forma de proyección sobre el panel; esto para que el muestreo sea estándar y obtener en los ensayos de los especímenes de estos paneles resultados exactos.
2. Tener en cuenta que el ángulo del panel a la hora de la proyección debe ser lo más vertical posible, ya que si tiene un ángulo menor a  $60^\circ$  el rebote caerá sobre el panel, lo cual no es bueno, pues el rebote es un material no deseado que crearía vacíos que disminuyen la adherencia y afectaría ya sea la extracción de los especímenes o en los resultados de los distintos ensayos que se le realicen a estos.
3. La proyección sobre el panel no debe realizarse en el área de trabajo (subterráneo o en superficie) esto para reducir la vulnerabilidad y el riesgo; por lo tanto, es favorable realizarla en un área segura siendo esta un laboratorio o en una zona externa al laboratorio, acondicionada para este fin disponiendo de espacio suficiente para colocar el equipo de proyección. Gracias a que es en un área cercana al laboratorio se reduce la manipulación del panel a la hora de su transporte al área de curado para evitar así vibraciones que afecten los resultados de los distintos ensayos a los especímenes.

4. Tener en cuenta que el concreto lanzado reforzado con fibra metálica es un tipo de concreto lanzado en auge en la minería de Guatemala, con lo cual es importante regular una norma guatemalteca COGUANOR NTG en la cual se indiquen los estándares con los cuales se encontrarán regidos, como el ensayo de tenacidad o panel redondo (ASTM C-1550).
5. La proyección del concreto debe surgir en un flujo ininterrumpido y constante ya que si no se crearán capas, las cuales afectan algunas propiedades del concreto: adherencia, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, durabilidad, entre otras; también, a la hora de la extracción de los especímenes, ya que se pueden quebrar por las distintas capas.
6. Tener en cuenta que los paneles de prueba (de madera) indicados en la Norma COGUANOR NTG 41013 h2 deben ser utilizados 3 veces máximo para no obtener paneles en mal estado ya que los paneles se fracturan por la velocidad de proyección del concreto lanzado; además, a esto se le podría agregar un tipo de agarre a los costados para la mejor manipulación de traslado de este.
7. La calidad del concreto lanzado depende en gran medida de la calidad de los materiales componentes, la dosificación de la mezcla, el lugar de lanzado, las condiciones de trabajo y el equipo empleado para lanzar. Por esta razón, es indispensable realizar ensayos de funcionamiento de los equipos y de los materiales a utilizar en el proceso; esto se puede realizar mediante mezclas de prueba.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ABRIL FLORES, Esaud. *Concreto lanzado. Shotcrete*. Perú: Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Alas Peruanas, 2009. 38 p.
2. ALVARADO VELÁSQUEZ, Boanerges Mauricio; ARTEAGA MENA, Henry Ruben; COREAS, Lorenzo Antonio. *Aplicaciones del concreto lanzado en estabilización de taludes anclados y revestimiento de elementos estructurales*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2004. 308 p.
3. American Society for Testing and Materials. *Norma ASTM C 939. Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (flow cone method)*. EE.UU: ASTM, 2002. 3 p.
4. CAVALARO, Sergio Enrique; RUEDA, Ángel; PÉREZ, Jorge. *Caracterización a cortante de hormigón proyectado*. Tesis de Máster, Ingeniería Estructural y de la Construcción. Escola Técnica Superior d' Enginyeria de Camins, Canals i Ports, Barcelona, España, 2013. 128 p.
5. CLAUSSEN, Hartmut. *Concreto lanzado en túneles para metros*. Chile/Alemania: Reunión del concreto, 2010. 70 p.

6. Comisión Guatemalteca de Normas. *Norma NTG 41013 h1. Práctica estándar para el muestreo de materiales para concreto lanzado (shotcrete)*. Guatemala: COGUANOR, 2015. 6 p.
7. \_\_\_\_\_. *Norma NTG 41013 h2. Práctica estándar para la preparación y ensayo de paneles de concreto lanzado*. Guatemala: COGUANOR, 2015. 10 p.
8. \_\_\_\_\_. *Norma NTG 41013 h3. Método de ensayo. Obtención y ensayo de núcleos perforados de concreto lanzado*. Guatemala: COGUANOR, 2015. 10 p.
9. \_\_\_\_\_. *Norma NTG 41052. Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico*. Guatemala: COGUANOR, 2010. 9 p.
10. \_\_\_\_\_. *Norma NTG 41017 h1. Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Guatemala: COGUANOR, 2017. 15 p.
11. \_\_\_\_\_. *Norma NTG 41017 h 15. Método de ensayo. Determinación de la resistencia a tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto*. Guatemala: COGUANOR, 2011. 9 p.
12. \_\_\_\_\_. *Norma NTG 41017 h 22. Método de ensayo. Determinación del flujo de asentamiento del concreto autoconsolidante*. Guatemala: COGUANOR, 2013. 15 p.

13. Compañía Minera Altamina, S.A. *Túnel para transporte de mineral grueso*. Perú: Mina Altamina, 2013. 25 p.
14. COOPER, Tony. *Shotcrete: an overview*. Australia: Australian Shotcrete Society, 2013. 33 p.
15. DÍAZ LAZAROVICH, Jorge. *Shotcrete vía húmeda: su importancia como elemento de sostenimiento en minería*. Perú: Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, 2014. 68 p.
16. Dirección General de Servicios Técnicos. *Manual de diseño y construcción de túneles de carretera*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016. 58 p.
17. Expertos en Construcción Especializada y Sistemas de Hormigón. *Programa de certificación para técnicos gunitadores*. EE.UU: EFNARC, 2015. 157 p.
18. FLORES CORNEJO, Bécquer Antonio. *Hormigón autocompactante*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, 2015. 155 p.
19. GARCIA GUZMAN, Sergio. *Shotcrete. guía chilena del hormigón proyectado*. Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2014. 119 p.
20. GEDEON, Gilbert. *Introduction to shotcrete applications*. EE.UU: U.S Army Corps of Engineers, 1993. 41 p.

21. HÖFLER, Jürgen; SCHLUMPF, Jürg. *Concreto proyectado en la construcción de túneles. Introducción a la tecnología básica del concreto proyectado*. Colombia: SIKA (Expertos en Concreto Proyectado), 2004. 71 p.
22. KUMAR MEHTA, P.; J.M. MONTEIRO, Paulo. *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. México: Prentice-Hall, 1998. 390 p.
23. ORELLANA ARIAS, Natalia Isabel; BURGOS MOREIRA, Jimmy Rolando. *Caracterización de un diseño de hormigón con fibras de acero para tuberías de sistemas sanitarios (21 pulgadas)*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Escuela Superior Politécnica del Litoral del Ecuador, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, 2009. 144 p.
24. VÉLIZ ARÉVALO, Carolina Dianeth. *Estabilización de taludes con pantallas de concreto lanzado con malla electro soldada y anclajes de concreto reforzado*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 112 p.

# ANEXOS

## Anexo 1. Informe de resistencia a tracción indirecta



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**No. 12539**

**INFORME DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO.  
NORMA NTG 41017 - H15 (ASTM C- 496)**

O.T. No. 36942 INFORME SACM - 445

**HOJA 1/1**

**INTERESADO:** Miguel Andrés Muñoz Calí, Carné 2010 - 20312

**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Validación del método de muestreo y ensayo de Norma COGUANOR NTG 41013 H1 y H3 (Concreto Lanzado)".

**DIRECCION:** Ciudad de Guatemala.

**EMISIÓN DE INFORME:** 6 de noviembre de 2017

**I.- RESULTADOS**

| TESTIGO | PESO<br>g | DIÁMETRO<br>cm | ALTUR<br>A<br>cm | CARGA<br>lb. | REPRESENTATIVO DE TESTIGO  | RESISTENCIA<br>Mpa | RESISTENCIA<br>lb/plg <sup>2</sup> |
|---------|-----------|----------------|------------------|--------------|----------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 1       | 340,00    | 4,505          | 9,340            | 3 200        | Concreto lanzado sin fibra | 2,20               | 320                                |
| 2       | 335,00    | 4,510          | 9,435            | 3 200        | Concreto lanzado sin fibra | 2,10               | 300                                |
| 3       | 330,00    | 4,490          | 9,430            | 3 400        | Concreto lanzado sin fibra | 2,30               | 330                                |
| 4       | 300,00    | 4,500          | 8,700            | 3 600        | Concreto lanzado sin fibra | 2,60               | 380                                |
| 5       | 315,00    | 4,500          | 9,090            | 4 000        | Concreto lanzado sin fibra | 2,80               | 410                                |
| 6       | 295,00    | 4,500          | 8,600            | 3 700        | Concreto lanzado sin fibra | 2,70               | 390                                |
| 7       | 285,00    | 4,500          | 8,055            | 3 000        | Concreto lanzado con fibra | 2,30               | 330                                |
| 8       | 295,00    | 4,505          | 8,485            | 3 600        | Concreto lanzado con fibra | 2,70               | 390                                |
| 9       | 295,00    | 4,455          | 8,055            | 3 600        | Concreto lanzado con fibra | 2,80               | 410                                |
| 10      | 280,00    | 4,495          | 8,485            | 3 300        | Concreto lanzado con fibra | 2,40               | 350                                |

a) Norma aplicada ASTM C-42.  
b) Testigos cabeceado según Norma NTG - 41064 (ASTM C-617)  
c) Núcleos extraídos el: Testigos 1 - 3; 27 de enero de 2017, Testigos 4 - 6; 03 de febrero de 2017, Testigos 7 - 8, 24 de enero de 2017 y Testigos 9 -10, 31 de enero de 2017.  
d) Núcleos ensayados el: Testigos 1 - 3; 01 de febrero de 2017, Testigos 4 - 6; 07 de febrero de 2017, Testigos 7 - 8, 27 de enero de 2017 y Testigos 9 -10, 03 de febrero de 2017.  
e) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura de carga: 60 000 libras.

El presente informe únicamente es para las muestras identificadas en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,



Inga Dilma Yanez Mejicanos, Jc  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros



Vo. Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñones de la Cruz  
Director CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Fecha: 06 de noviembre de 2017.

## Anexo 2. Informe de resistencia a compresión



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

**INFORME DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE NÚCLEO DE CONCRETO**    **No. 12538**  
**NORMA NTG 41049 (ASTM C- 42)**  
 INFORME SACM - 444

O.T. No. 36942

**HOJA 1/1**

**INTERESADO:** Miguel Andrés Muñoz Calí, Carné 2010 - 20312

**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Validación del método de muestreo y ensayo de Norma COGUANOR NTG 41013 H1 y H3 (Concreto Lanzado)".

**DIRECCION:** Ciudad de Guatemala.

**EMISIÓN DE INFORME:** 6 de noviembre de 2017

---

**I.- RESULTADOS**

| TESTIGO | PESO<br>g | DIÁMETRO<br>cm | ALTURA<br>cm | ALTURA<br>NIVELADA<br>cm | CARGA<br>lb. | ÁREA<br>cm <sup>2</sup> | FACTOR DE<br>CORRECCIÓN | RESISTENCIA<br>Mpa | RESISTENCIA<br>lb/plg <sup>2</sup> |
|---------|-----------|----------------|--------------|--------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 1       | 325,00    | 4,505          | 9,215        | 9,470                    | 6 900        | 15,940                  | 1,0000                  | 19,30              | 2 800                              |
| 2       | 315,00    | 4,510          | 9,050        | 9,430                    | 6 800        | 15,975                  | 1,0000                  | 18,90              | 2 740                              |
| 3       | 305,00    | 4,485          | 8,720        | 9,090                    | 7 000        | 15,798                  | 1,0000                  | 19,70              | 2 860                              |
| 4       | 315,00    | 4,505          | 9,055        | 9,420                    | 6 800        | 15,940                  | 1,0000                  | 19,00              | 2 760                              |
| 5       | 290,00    | 4,490          | 8,275        | 8,610                    | 7 000        | 15,834                  | 1,0000                  | 19,70              | 2 860                              |
| 6       | 270,00    | 4,490          | 7,740        | 8,650                    | 7 300        | 15,834                  | 1,0000                  | 20,50              | 2 980                              |
| 7       | 310,00    | 4,485          | 8,825        | 9,260                    | 7 600        | 15,798                  | 1,0000                  | 21,40              | 3 110                              |
| 8       | 305,00    | 4,495          | 8,765        | 9,270                    | 7 200        | 15,869                  | 1,0000                  | 20,20              | 2 930                              |
| 9       | 300,00    | 4,500          | 8,570        | 8,910                    | 7 200        | 15,904                  | 1,0000                  | 20,10              | 2 920                              |
| 10      | 315,00    | 4,495          | 8,930        | 9,310                    | 7 500        | 15,869                  | 1,0000                  | 21,00              | 3 050                              |

a) Norma aplicada ASTM C-42.  
 b) Testigos cabeceado según Norma NTG - 41064 (ASTM C-617)  
 c) Núcleos extraídos el: Testigos 1 - 5; 27 de enero de 2017 y Testigos 6 - 10; 03 de febrero de 2017.  
 d) Núcleos ensayados el: Testigos 1 - 5; 01 de febrero de 2017 y Testigos 6 - 10; 07 de febrero de 2017  
 e) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura de carga: 60 000 libras.  
 f) Representativo de testigo: Concreto lanzado sin fibra

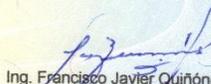
El presente informe únicamente es para las muestras identificadas en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,



Inga Dilma Yanet Mejicanos, Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo. Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz  
Director CII/USAC



SECCION DE AGREGADOS,  
CONCRETOS Y MORTEROS  
CII / USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Fecha: 06 de noviembre de 2017.