

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**OPTIMIZACIÓN DE LAS LOSAS DE RELLENO
CEMENTADO DE LA U.P. ANDAYCHAGUA**

TESIS

Presentada por:

Bach. Jorge Antonio Huerta Huerta

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA - PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

OPTIMIZACIÓN DE LAS LOSAS DE RELLENO CEMENTADO DE LA U.P. ANDAYCHAGUA

Tesis sustentada y aprobada el 21 de septiembre de 2015, estando integrado el jurado calificador por:

PRESIDENTE


.....
Ing. José David Rodríguez Copare

1er. MIEMBRO
(SECRETARIO)


.....
Dr. Carlos Huisa Gcori

2do. MIEMBRO


.....
MSc. Salomón Medardo Ortiz Quintanilla

ASESOR


.....
Mgr. Zenón Valentín Sarmiento Mejía

DEDICATORIA

Tesis dedicada a mi madre que con sus palabras de aliento no me dejaban decaer para que siguiera adelante, siempre sea perseverante y cumpla con mis metas.

AGRADECIMIENTO

A mis docentes, que sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento.

Y es especial a mi esposa que siempre estuvo en los momentos difíciles, para darme esas palabras de motivación.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN	xiv
INTRODUCCIÓN	

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema	5
1.1.1. Antecedentes del problema	5
1.1.2. Problemática de la investigación	9
1.2. Formulación del problema	10
1.3. Justificación e importancia	11
1.4. Alcance y limitación	12
1.5. Objetivos	13
1.5.1. Objetivo general	13
1.5.2. Objetivo específico	13
1.6. Hipótesis de investigación	14
1.6.1. Hipótesis general	14
1.5.2. Hipótesis específico	14
1.7. Variables de estudio	15

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio	17
2.1.1. Características de los materiales de relleno cementado	19
2.1.2. Diseño de mezclas de relleno cementado	23
2.1.3. Preparación de relleno cementado	26
2.1.4. Circuito de relleno cementado	28
2.1.5. Enmallado de acero	34
2.1.6. Tabiques o encofrado	36
2.1.7. Losas de concreto	38
2.1.8. Ensayos de la resistencia a la compresión uniaxial	39
2.1.9. Consumo y costo unitario	42
2.1.10. Evaluación de las losas en condición actual	44
2.1.11. Esfuerzos de confinamiento y deformación	44
2.1.12. Evaluación analítica de losas	46
2.1.13. Análisis de costos actuales de relleno cementado	47
2.2. Bases Teóricas	55
2.2.1. Relleno en tajeos en minería subterránea	55
2.2.2. Usos del relleno	57
2.2.3. Tipos de relleno	60

2.2.4. Relleno de roca	62
2.2.4.1. Relleno de roca no cementado – URF	63
2.2.4.2. Relleno de roca cementado con lechada de cemento Portland – CRF	64
2.2.5. Propiedades del relleno	66
2.2.6. Parámetros que afectan la resistencia del relleno cementado	75
2.2.7. Definición de la losa	77
2.2.8. Cargas que actúan sobre materiales no consolidados	80
2.2.9. Presión máxima horizontal en las paredes del tajeo	84
2.2.10. Coeficiente de presión lateral del terreno	87
2.2.10.1. Categoría de la presión lateral del terreno	88
2.2.10.2. Cálculos de coeficiente lateral del terreno	93
2.2.11. Carga vertical máxima ejercida por el relleno en el piso de un tajeo	100
2.2.12. Carga vertical de material no consolidado como una función de la altura del material	102
2.2.13. Estabilidad de la losa de relleno cementado	106
2.2.14. Propiedades de la resistencia	113
2.2.15. Método gráfico de diseño empírico de estabilidad	114
2.3. Definición de términos	120

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3. Diseño metodológico de la investigación	122
3.1. Tipo y diseño de la investigación	122
3.2. Población y muestra	122
3.3. Operacionalización de variables	123
3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos	123
3.5. Procesamiento y análisis de datos	125

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados	127
4.1.1. Diseño estructural de la losa optimizada	128
4.1.2. Diseño de mezcla para losa optimizada	129
4.1.3. Estandarización del diseño de mezcla	134
4.1.4. Costo de relleno cementado optimizado	135
4.1.5. Implementación del tajeo piloto	138
4.1.6. Aplicar un diseño mejorado de mezclas para la construcción de losas de relleno cementado en	

los tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua	139
4.2. Discusión	141
4.3. Comparación de resultados con antecedentes	142
CONCLUSIONES	145
RECOMENDACIONES	146
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
ANEXO	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz de consistencia.	16
Tabla 2: Diseño de muestras típicos	25
Tabla 3: Propiedades físicas de los agregados para el diseño	25
Tabla 4: Diseño Ajustado por la Operación (Diseño 1)	32
Tabla 5: Volumen producido de relleno cementado (m ³)	42
Tabla 6: Costos del relleno cementado (US\$)	43
Tabla 7: Propiedades de resistencia del macizo rocoso y la losa de relleno cementado	45
Tabla 8: Estimación de esfuerzo de confinamiento sobre la losa	46
Tabla 9: Factores de seguridad de las losas en condición actual (sin refuerzo de acero)	47
Tabla 10: Parámetros constantes para el análisis de costos	48
Tabla 11: Diseño de mezcla con material de chancadora y de cantera	49
Tabla 12: Costo unitario de instalación y materiales de maderas y fierros	50
Tabla 13: Costo unitario de materiales e instalación de tubería	51
Tabla 14: Costo unitario de mantenimiento por m ³	52
Tabla 15: Costo total unitario del diseño 1 del RC	53

Tabla 16: Costo total unitario del diseño 3 del RC	54
Tabla 17: Costo total unitario por m ³ de relleno cementado de 16 MPa	55
Tabla 18: Caracterización numérica de materiales de mezcla	124
Tabla 19: Factores de seguridad de la losa de 6 metros de ancho de minado	128
Tabla 20: Aditivos de mezcla recomendados	130
Tabla 21: Diseños de mezclas de prueba con relave y agregado grueso	131
Tabla 22: Resistencia a la compresión calculada	132
Tabla 23: Diseños de mezcla optimizados	133
Tabla 24: Resistencia a la compresión proyectada	134
Tabla 25: Costo de materiales para relleno de 8 MPa	135
Tabla 26: Costo total unitario de relleno cementado de 8 MPa	136
Tabla 27: Costo de materiales para relleno de 4 MPa	137
Tabla 28: Costo total unitario de relleno cementado de 4 MPa	138
Tabla 29: Costos unitarios de relleno cementado	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Minado por debajo del relleno consolidado Pakalnis y otros	6
Figura 2: Minado bajo un consolidado previo. Caso (a)	7
Figura 3: Minado bajo un consolidado previo. Caso (b)	8
Figura 4: Malla de acero actual para refuerzo de la losa	35
Figura 5: Encofrado o tabique actual de las losas	37
Figura 6: Vistas longitudinal y transversal de la losa de relleno cementado	39
Figura 7: Resistencia del concreto a los 28 días, con muestras en superficie en el año 2013	40
Figura 8: Resistencia del concreto a los 28 días, con muestras en interior mina en el año 2013	41
Figura 9: Porcentaje de incidencia de las partidas en la producción de relleno cementado	43
Figura 10: Usos o finalidad del relleno	58
Figura 11: Envolvente de rotura de Mohr-Coulomb de un material de relleno cohesivo	71
Figura 12: Envolvente de rotura Mohr-Coulomb de un material de relleno no cohesivo	73
Figura 13: Ángulo de reposo ϕ^0 para el material de relleno no Cohesivo	74

Figura 14: Sección transversal de una losa “Sill mat pillar”	78
Figura 15: Ángulo natural de reposo del material (izquierda) y los componentes oblicuos, de esfuerzos normal y tangencial (a la derecha)	81
Figura 16: Esfuerzo vertical a aumentar la profundidad de un material confinado	83
Figura 17: La presión sobre una rebanada horizontal de espesor ∂z .	84
Figura 18: Relación de presión del terreno al movimiento de la pared	92
Figura 19: Comparación de coeficientes de presión en reposo y activo del terreno	93
Figura 20: Rebanada diferencial en un silo	104
Figura 21: Diagrama de esfuerzos de la losa de relleno cementado	107
Figura 22: Criterios de falla de la losa de relleno cementado	108
Figura 23: Gráfico de estabilidad de Mathews	116
Figura 24: Gráfica de estabilidad modificada	117
Figura 25: Gráfica de estabilidad modificada con soporte	118
Figura 26: Método de diseño por dilución ELOS	119

RESUMEN

La mina Andaychagua propiedad de Volcan Compañía Minera S.A.A., es una mina polimetálica que actualmente viene explotando la veta Andaychagua, mediante el método de explotación de corte y relleno descendente, con losas de relleno cementado que alcanzan una resistencia de 160 kg/cm^2 a los 28 días y refuerzo de acero en la zona inferior de la losa. El ancho de minado varía desde 4 a 15 m, la altura de corte de cada tajeo es de 4,5 m y el espesor de la losa de relleno cementado es de 3,5 m, la longitud de paneles de vaciado de la losa varía desde 12 a 15 m. El ciclo de minado se compone de: perforación, voladura, extracción, sostenimiento y termina con el relleno cementado en retirada el que podría demandar hasta 3 meses de tiempo, para un panel de minado de hasta 200 m.

En este contexto, se desarrolla un proyecto multidisciplinario que consiste en optimizar el diseño de las losas estructurales de relleno cementado, en cuya implementación estamos comprometidos, a fin de lograr una operación rentable, segura y sostenible a largo plazo.

INTRODUCCIÓN

El tema de la tesis se sustenta en la posibilidad de disminuir los altos costos de producción generados por los problemas en el sostenimiento de las labores mineras. Con el fin de lograr una operación rentable, segura y sostenible a largo plazo, se aplicarán los conocimientos de la mecánica de rocas, la geomecánica y la tecnología de concreto para optimizar el diseño y mezcla en la construcción de las losas utilizadas como relleno cementado, en la aplicación del método de explotación por corte y relleno descendente, en la veta Andaychagua.

Los parámetros del minado de la veta Andaychagua fueron establecidos mediante evaluaciones geomecánicas llevadas a cabo entre los años 1999 y 2001, cuando el minado se encontraba entre los Nvs. 770 y 800. En aquel entonces las condiciones geomecánicas de la masa rocosa eran más favorables por la mejor calidad de la roca (volcánicos andesíticos) y por la menor carga litostática.

Actualmente, el minado se realiza entre el Nivel 1000 y el Nivel 1170, estas son profundidades mayores que las nombradas en el párrafo previo, y toda la roca encajonante está conformada por fillitas de mala calidad. Las condiciones geomecánicas en general han cambiado desfavorablemente, lo cual amerita una revisión de los parámetros geomecánicos del minado; para el efecto, la empresa Volcan S.A.A. contrató la evaluación geomecánica, cuyos resultados se presentan en el Capítulo II.

Así mismo, el método de minado que actualmente se utiliza en Andaychagua es el corte y relleno descendente con losas de concreto. El minado se realiza debajo de la losa de concreto mediante “frontoneo”. En este caso los frentes tienen 4,5 m de altura, por el ancho correspondiente a toda la potencia del mineral, y 230 m de longitud de cada tajeo.

Por otro lado, la industria minera peruana para hacer frente a la competencia internacional tiene que buscar la reducción de sus costos en las operaciones de minado. Ante este incierto panorama, la optimización de las losas de relleno cementado se presenta como una alternativa, para continuar con la explotación por el método de corte y relleno descendente.

Para un tratamiento normalizado del tema, se considera pertinente presentar la información en el siguiente orden:

- El CAPÍTULO I, trata del planteamiento de problema, relativo a un mejoramiento del diseño de la mezcla de concreto utilizada en la construcción de las losas de relleno cementado.
- El CAPÍTULO II, trata de los antecedentes, generalidades de la zona de estudio y los fundamentos teóricos que dan sustento a: la determinación de la capacidad portante de la losa de relleno cementado y su análisis de estabilidad.
- El CAPÍTULO III, trata del marco metodológico en el que se realiza un inventario de la información y análisis de las condiciones actuales del proceso de relleno cementado en la U.P. Andaychagua, así como la estimación de los costos unitarios asociados.
- El CAPÍTULO IV, trata de los resultados de la investigación, en él se realiza el análisis para la determinación de los nuevos diseños de mezcla para losas con resistencias a la compresión uniaxial de 2, 4 y 8 MPa; así como los costos unitarios asociados a su implementación.

- En el CAPÍTULO V, trata del análisis y discusión de los resultados, en él se discuten la comparación de los resultados de la investigación aplicada.

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

El autor de la presente tesis, abriga la esperanza de que la información difundida, sea de utilidad para una mejor comprensión de los procesos aplicados en la construcción de las losas de relleno cementado, asociadas a específicos métodos de explotación subterránea.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

El uso de relleno en operaciones subterráneas, tanto en América del Norte como en América del Sur, se ha practicado desde el cambio de siglo. Souza et al. (2003), en el documento técnico “Economics and Perspectives of Underground Backfill Practices in Canadian Mines”, han resumido los avances en la técnica del relleno, con la introducción de rellenos hidráulicos en la década de 1950 a 1959 y la adición de cemento en la década de 1960 a 1969. La combinación de rellenos de roca cementada y en pasta han sido introducida en la décadas de los 80s y los 90s, respectivamente, como resultado de la aplicación de métodos de minado que requieren la extracción bajo un sostenimiento consolidado, compuesto de relleno en lugar de encapados de madera o cables.

El incremento del uso de rellenos consolidados a finales de la década del 90, presentados en condiciones de ingeniería con un alto grado de reproducibilidad en términos de resistencia y de comportamiento, ha permitido métodos con acceso humano al tajeo (tal como corte y relleno descendente), para ser implementado con mayores anchos de minado controlado, resultando una alternativa segura y económica al minado con corte y relleno convencional, (Mah, 1997).

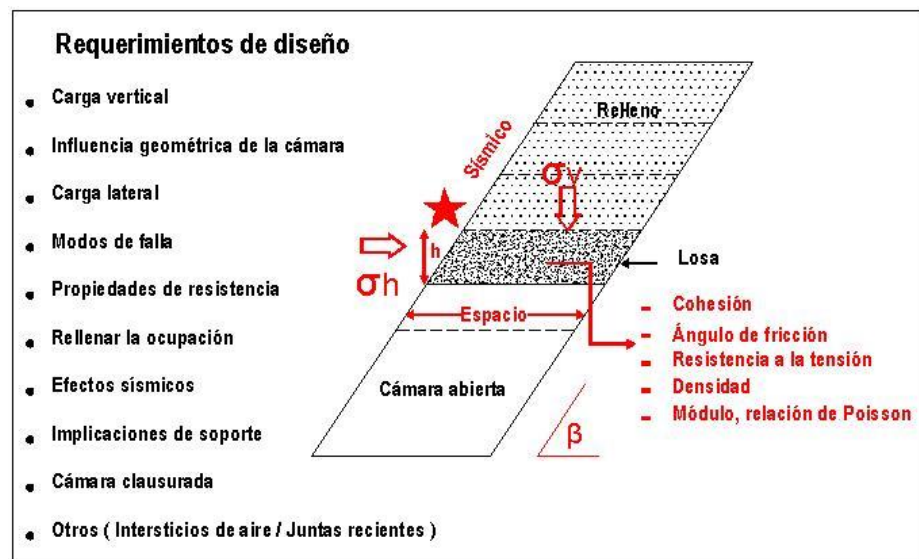


Figura 1. Minado por debajo de relleno consolidado Palkanis y otros (2005)
Fuente: Elaboración propia.

La colocación de relleno consolidado ya sea con roca cementada o con pasta, requiere de la comprensión de los factores generales que afectan el diseño. La Figura 1, resume gráficamente algunos de los parámetros que se están investigando en términos de su implicación en el desarrollo de un ancho de diseño que permita el acceso seguro de los trabajadores.

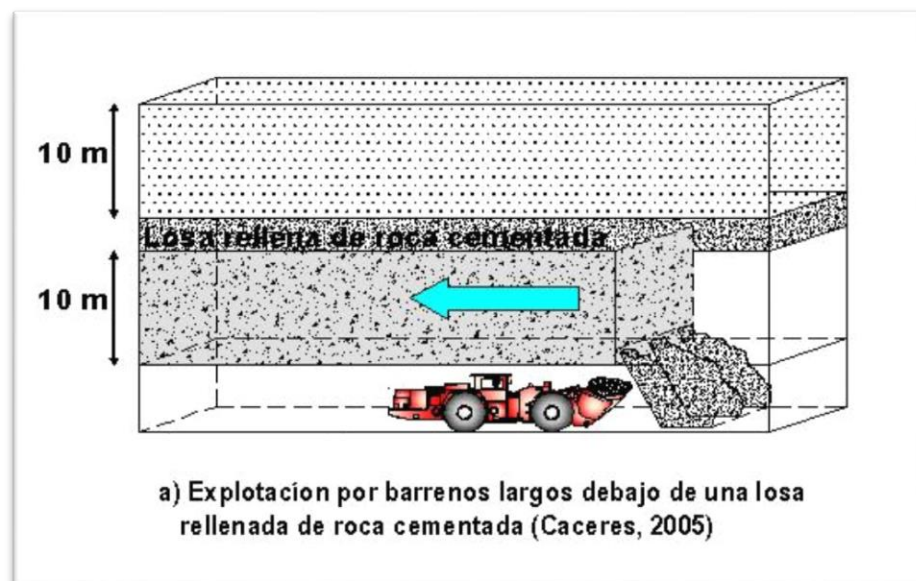


Figura 2. Minado bajo un consolidado previo. Caso (a).

Fuente: Cáceres, 2005

Una losa en este estudio se define como una capa consolidada de relleno previamente colocado inmediatamente

encima del tajeo de la mina que se está excavando. Este panel puede tener una gran altura vertical como en el caso de la minería masiva, como se muestra en la Figura 2, o por capas individuales, colocadas por el minado convencional o por corte y relleno descendente, como se muestra en la Figura 3.

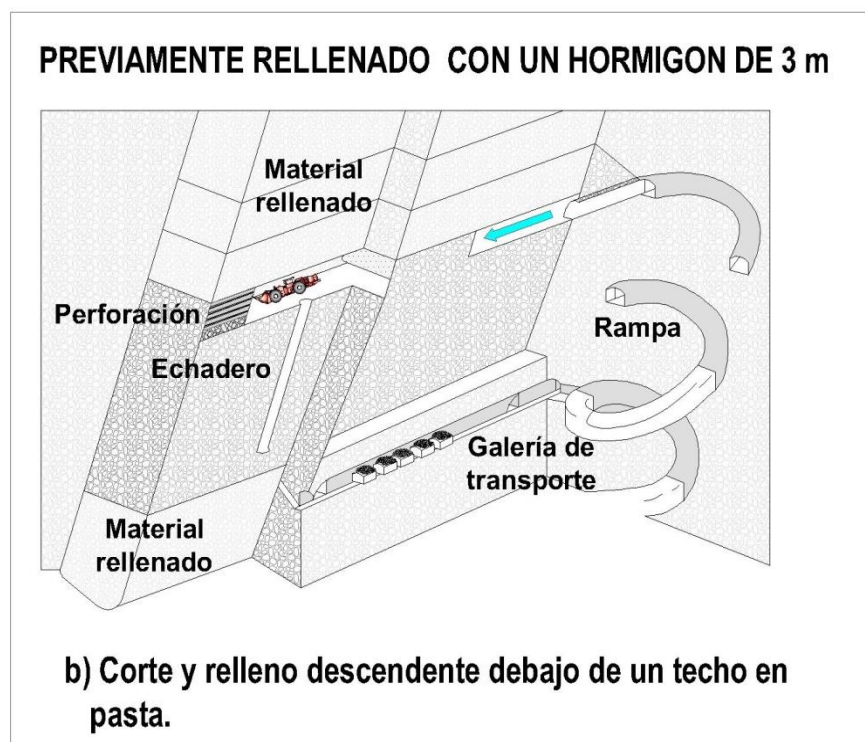


Figura 3. Minado bajo un consolidado previo. Caso (b).

Fuente: Cáceres, 2005

La principal diferencia es que en la Figura 2, Caso (a), se está operando en gran medida de forma remota con el corte

superior previamente relleno, mientras que en la Figura 3, Caso (b), el minado es aplicado por métodos con ingreso de mano de obra. Para ello es necesario que el factor de seguridad, para el acceso de la mano de obra, sea sustancialmente mayor que el enfoque sin ingreso de ella.

1.1.2. Problemática de la investigación

La mina Andaychagua propiedad de Volcan Compañía Minera S.A.A. (Volcan), es una mina polimetálica con leyes promedio de 4,97 % Zn, 0,98 % Pb, 0,11 % Cu y 5,04 oz Ag/t, que actualmente viene explotando la veta Andaychagua mediante el método de explotación de corte y relleno descendente, con losas de relleno cementado que alcanza una resistencia de 16 MPa (160 kg/cm²) a los 28 días y refuerzo de acero en la zona inferior de la losa. El ancho de minado varía desde 4 a 15 m, la altura de corte de cada tajeo es de 4,5 m y el espesor de la losa de relleno cementado es de 3,5 m, la longitud de paneles de vaciado de la losa varía desde 12 a 15 m. El ciclo de minado consiste en: la perforación, voladura, extracción y sostenimiento de acuerdo a las características del

cuerpo mineralizado; y el minado del tajeo termina con el relleno cementado en retirada, lo que podría demandar hasta 3 meses de tiempo para un panel de minado de hasta 200 m.

El problema consiste en optimizar el diseño de las losas estructurales de relleno cementado en Andaychagua, con el fin de lograr una operación rentable, segura y sostenible a largo plazo; la misma que será elaborada sobre la base de la información existente y manteniendo el método de explotación por corte y relleno descendente.

1.2. Formulación del problema

Problema general:

¿Es adecuado el diseño de las mezclas para las losas de relleno cementado en los tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua?

Problema específico:

¿Se puede mejorar el diseño de las mezclas para la elaboración de losas de relleno cementado?

¿Se puede reducir los costos unitarios de las losas de relleno cementado?

¿Se puede optimizar el ciclo de minado aplicando la variante de paneleo al método de corte relleno descendente?

1.3. Justificación e importancia

En tiempos en que los precios de los metales están en descenso, las empresas se obligan a evaluar sus operaciones, mediante innovaciones tecnológicas y así bajar los costos; dichas innovaciones suponen la constitución de equipos de trabajo multidisciplinarios para realizar estudios que permitan sostener la competitividad en la industria.

Por lo que, la optimización del diseño de las losas estructurales de relleno cementado en Andaychagua, entre otras actividades, pretende lograr una operación rentable, segura y sostenible a largo plazo. El logro de este propósito debe significar un aporte a la tecnología nacional susceptible de ser replicada en similares operaciones y yacimientos de minerales.

1.4. Alcance y limitación

La coyuntura actual del mercado de los metales, pasa por un ciclo recesivo, obligando a las empresas a buscar todas las oportunidades para obtener ahorros o disminución de costos operacionales.

Por lo que, una mejora en el diseño de las mezclas para la elaboración de losas de relleno cementado en los tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua, debe consistir en ahorros significativos, permitiendo la sostenibilidad operacional en época de crisis.

Los resultados de la investigación podrían replicarse en otras empresas con características similares.

La limitación más importante es que, para el tratamiento de este tipo de problemas, se requiere de trabajo en equipo (empresa + empresas especializadas), la contratación de consultores y laboratorios especializados; así como, la implementación de equipos para las evaluaciones geomecánicas 'in-situ'.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar el diseño de las mezclas para las losas de relleno cementado en los tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua, para su optimización.

1.5.2. Objetivo específico

Al reducir el relave y aumentar piedra 67 aumentamos la resistencia.

Determinar el diseño de mezcla utilizando menor cantidad de cemento y material de cantera.

Reducir el tiempo de ciclo de minado que puede disminuir a la mitad de lo actual.

1.6. Hipótesis de investigación

1.6.1. Hipótesis general:

El mejoramiento del diseño de las mezclas para las losas cementadas en los tajeos, optimizará la aplicación del corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua.

1.6.2. Hipótesis específica:

Se modifica el diseño de la mezcla (reducción de cemento y aumento de material producido por el chancado de desmonte proveniente de interior mina) para la construcción de las losas cementadas.

Reducir los costos unitarios de las losas del corte relleno descendente

Optimizar el ciclo en los tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua.

1.7 Variables de estudio

Variable Independiente.

- Diseño de losa.

Variable Dependiente

- Costo de relleno cementado.

Indicadores

- Resistencia a la compresión.
- Costo unitario del metro cúbico de relleno cementado.

Tabla 1.
Matriz de consistencia

OPTIMIZACION DE LAS LOSAS DE RELLENO CEMENTADO DE LA U.P. ANDAYCHAGUA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES
<p>PROBLEMA GENERAL: ¿Es adecuado el diseño de las mezclas para las losas de relleno cementado en los tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua?</p> <p>PROBLEMA ESPECÍFICO: ¿Se puede mejorar el diseño de las mezclas para la elaboración de losas de relleno cementado? ¿Se puede reducir los costos unitarios de las losas de relleno cementado? ¿Se puede optimizar el ciclo de minado aplicando la variante de paneleo al método de corte relleno descendente?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL: Evaluar el diseño de las mezclas de las losas de relleno cementado en los tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua para su optimización.</p> <p>OBJETIVO ESPECÍFICO: Al reducir el relave y aumentar piedra 67 aumentamos la resistencia. Determinar el diseño mejorado de mezclas, utilizando menor cantidad de cemento y material de cantera. Reducir el tiempo de ciclo de minado que puede disminuir a la mitad de lo actual.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL: El mejoramiento del diseño de las mezclas de las losas cementadas en los tajeos, optimizará la aplicación del corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICA: Se modifica el diseño de la mezcla (reducción de cemento y aumento de material producido por el chancado de desmonte proveniente de interior mina) para la construcción de las losas cementadas. Reducir los costos unitarios de las losas del corte relleno descendente Optimizar el ciclo en los tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua.</p>	<p>VARIABLES ASOCIADAS Variable Independiente. Diseño de losa.</p> <p>Variable Dependiente Costo de relleno cementado.</p> <p>Indicadores Resistencia a la compresión. Costo RC/m³.</p>
MÉTODO Y DISEÑO	POBLACIÓN Y MUESTRA	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	
<p>MÉTODO Descriptivo analítico</p> <p>NIVEL Descriptiva</p>	<p>POBLACIÓN Tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua</p> <p>MUESTRA Tajeo piloto.</p>	<p>TÉCNICAS Diseño de muestras de prueba. Muestreo y ensayos de laboratorio</p> <p>TRATAMIENTO ESTADÍSTICO Diagramas estereográficos y de estabilidad Representación de isovalores</p>	<p>INSTRUMENTO Ensayos de laboratorio. Equipo topográfico. Fichas técnicas. Fotografías.</p>

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

El estudio presentado por Albarracín (2014), “comprende básicamente los parámetros a considerar para aplicar el relleno hidráulico cementado, de acuerdo a las características geológicas del macizo rocoso del yacimiento, evaluando el proceso de relleno de los tajeos y la función de soporte que cumple el relleno hidráulico cementado en cuestión de la estabilidad del macizo rocoso”

En su tesis Toledo (2006) “propone cambiar radicalmente los sistemas y métodos de minado, preparando tajeos con puentes y pilares reemplazados con concreto armado o relave cementado previamente, a fin de recuperar totalmente el mineral contenido en estos. De esta manera, se podrá garantizar la retención total del relave fluido, decantarlo, filtrar el agua, controlar el drenaje para

recircular en circuito cerrado con la concentradora, después de la masiva extracción de todo el mineral fragmentado contenido de cada tajeo.

Mientras que Cáceres (2005), indica que pilares losa se emplean en la mina Musselwhite, para permitir múltiples horizontes mineros con relleno no consolidado, colocado inmediatamente encima de la losa de intervención. Estas losas pueden estar compuestas de minerales sin explotar cuando la economía es tal que no está permitida su extracción o, alternativamente, se sustituye por una losa cementada construida para permitir el minado por debajo de ella. Por lo que su propuesta se enfoca en la definición de los efectos del minado adyacente al relleno.

Hay la necesidad de un diagnóstico o estudio de línea de base, que refleje la situación problemática actual, que sirva como un componente de comparación con el nuevo escenario producto de los cambios consecuentes del presente estudio. Para el efecto, se revisa la información de la base de datos del Laboratorio de Geomecánica de la U.P. Andaychagua, relacionada con: Los tipos de materiales usados en la elaboración de las mezclas con los

procesos de preparación de las mismas, la comparación de las resistencias alcanzadas por las muestras de probetas de concreto obtenidas en planta y en el tajeo en proceso de rellenado, los consumos y costos unitarios asociados a la actividad. Dichos elementos son tratados en toda su extensión en los siguientes párrafos.

2.1.1. Características de los materiales del relleno cementado

Para la elaboración del relleno cementado se utilizan agregados provenientes del desmonte de mina (tras un proceso previo de chancado primario) y en su carencia o déficit utilizar agregados de préstamo, también se emplea agua y aditivos (ver análisis granulométrico en Anexo 1).

La planta de relleno cuenta con una chancadora de QUIJADA GRIMER de una capacidad de 30 t/hora, que es en donde se trata al desmonte de mina, para que posteriormente pase a una zaranda vibratoria, que es donde se separa la piedra de 1,91 cm (3/4")

denominada piedra 67 y la piedra de 1,27 cm (1/2") denominada piedra 89 o confitillo (según la norma ASTM C33), seguidamente son transportados mediante fajas y almacenados en los silos de 204 m³ y 127 m³ respectivamente, las piedras superiores a 1,91 cm (3/4") pasan a la chancadora cónica TELESMITH para luego recircular hacia la zaranda vibratoria hasta cumplir con los tamaños de fragmentación requerida. Cabe indicar que durante el proceso de zarandeo se riega con agua para el control de la polución, el cual a su vez lava parcialmente los finos del agregado.

Arena "Ricaldi" o confitillo, es un agregado con tamaño máximo de fragmentación de 1,27 cm (1/2") el cual es proveniente de la cantera "Pachachaca" que está ubicado en la comunidad de Pachachaca, distrito la Oroya, Provincia Yauli.

La piedra "Ricaldi" es un agregado de 1,91 cm (3/4") sub-redondeada proveniente de la Cantera "Ricaldi" ubicada a las orillas del Rio Mantaro en el

centro poblado menor de Huari, distrito la Oroya, Provincia Yauli.

Los agregados de canteras de préstamo son transportados a obra mediante volquetes y almacenados al pie de la planta de relleno en depósitos sin techar, que en la temporada de lluvias quedan expuestos e incrementándose su humedad.

El relave grueso corresponde al material con 80 % a 95 % mayor a 0,074 mm de diámetro de partícula, tras un proceso de cicloneo es separado de la porción fina, por un nido de hidrociclones ubicado en los alrededores de la planta de relleno.

El relave es transportado desde la planta de procesos metalúrgicos mediante una tubería conectada hacia la zona de hidrociclones, el relave grueso es descargado en una plataforma y transportado mediante un cargador frontal, hacia un depósito ubicado al pie de la planta de relleno cementado, dicho depósito no se

encuentra techado, por lo que el relave queda expuesto a la lluvia, nieve y/o granizo que altera constantemente su humedad.

El agua es proveniente de la canalización de una laguna relativamente alejada de las operaciones, y que en promedio se caracteriza por los siguientes parámetros:

- PH = 8,10
- Potencial = -89,8 mv
- Conductividad = 271 US\$/cm²
- Salinidad = 0,1 %
- TDS = 130,9 mg/l
- Temperatura = 283,45 °K

Se están utilizando dos aditivos que son transportados de la fábrica a la planta de relleno:

- EUCO 537; Aditivo superplastificante que se usa 1 % en peso del cemento.

- EUCO WO; Aditivo inhibidor de agua y se usa 0,1 % en peso del cemento.

2.1.2. Diseño de mezclas de relleno cementado

En la preparación del relleno cementado en la planta automatizada se utiliza como patrón tres diseños, los cuales se analizan en el software de computadora que controla la dosificación de los materiales, cabe indicar que la planta de relleno tiene la opción de operar en modo manual o semi-automatizada, que le permite al operador variar los pesos de los agregados según la humedad del día de los agregados, teniendo como base los siguientes diseños:

- El Diseño 1, considera la utilización de los agregados producidos en la planta de relleno mediante el chancado y zarandeo del desmonte de mina, por lo que los agregados contemplados son la piedra 67 (3/4") y el confitillo 89 (1/2").

- El Diseño 2, considera la utilización de la piedra 67 (3/4") producidos en planta y material de préstamo en cuanto al confitillo "Ricaldi" 1,27 cm (1/2").
- El Diseño 3, considera que no se cuenta con material producido en planta, por lo que se tiene que utilizar los agregados de material de préstamo como son el confitillo "Ricaldi" 1,27 cm (1/2") y la piedra "Ricaldi" 1,91 cm (3/4").
- Es importante señalar que antes de iniciar con la colocación del relleno cementado se coloca 02 tandas de mortero y 03 tandas de soft, con la finalidad de lubricar la tubería de conducción, los mismos que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2**Diseño de muestras típicas**

Material	Diseño 1 (kg)	Diseño 2 (kg)	Diseño 3 (kg)	SOFT	Mortero
Piedra 67	560	700			
Piedra Ricaldi			850		
Confitillo 89	620			540	
Confitillo Ricaldi		600	445		
Relave	625	570	590	1032	1643
Cemento	300	300	300	300	300
Agua	220	210	210	300	450
Euco 537	3	3	3		
Euco WO	0,3	0,3	0,3		

Fuente: A. Vivar (2014).

Las propiedades físicas de los agregados utilizados para el diseño se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3**Propiedades físicas de los agregados para el diseño**

Propiedades	Relave	Conf. Uso 89	Piedra	Confitillo Ricaldi	Piedra
			Uso 67		Ricaldi
P. específico	2,8	2,65	2,65	2,64	2,65
Absorción.	3,7	1,45	2	2	1,62
Conten. Humedad.	10%	9,00%	2,70%	7%	2,50%

Fuente: A. Vivar (2014).

2.1.3. Preparación del relleno cementado

La preparación del relleno cementado se realiza en la planta acondicionada para tal objetivo, el cual consta de una chancadora de quijada grimer 30 t/hora, y una zaranda vibratoria gravier 30 tn/hora donde se produce el agregado de procedencia de desmonte de mina, los mismos que son almacenados en sus respectivos depósitos, luego los agregados son alimentados a una tolva stacker de 4 m³, desde donde son transportados hacia la tolva de cuatro compartimientos de 4 m³ c/u ubicado en la parte superior de la balanza, donde los agregados son colocados según su naturaleza o el tamaño de fragmentación de las partículas, para su respectivo pesado y dosificación el cual es controlado desde la sala de mando, seguidamente los agregados pasan al mezclador conjuntamente con el agua con aditivos y el cemento, que fueron pesados previamente con balanzas ubicadas en sus respectivos depósitos y que también son operados y controlados desde la sala de

mando. Finalmente el relleno cementado pasa al agitador remix desde donde se inicia el bombeo hacia interior mina.

En cuanto al transporte de los agregados a la tolva stacker, se realiza mediante fajas, en el caso de la piedra 67 y la piedra 89 (producidos en planta) y en cuanto al relave y agregados de préstamo, como el confitillo ricaldi 1,27 cm (1/2") y piedra ricaldi 1,91 cm (3/4"), se realiza con un cargador frontal.

La sala de mando cuenta con un software donde se selecciona el diseño patrón a utilizar en función a la procedencia de los agregados a emplear, según esto se controla la dosificación de los agregados de manera automatizada; sin embargo, la planta tiene la opción de operar en modo manual, donde depende de la observación del operador para seguir agregando material a la balanza, esta última opción es utilizado principalmente por el operador para controlar el peso del relave debido a que en varias oportunidades se ha

presentado problemas de adherencia del relave en la tolva y no baja totalmente a la balanza, también utiliza la opción manual cuando se requiere realizar algún otro reajuste de peso de cualquier agregado.

Uno de los problemas frecuentes con el sistema de pesado automático, es que por la alta humedad de los materiales finos (relave) este suele pegarse a la tolva y no descargar hacia la mezcladora, este defecto hace que requiera ayuda manual para la descarga. Asimismo, a esto podría tener influencia la exposición de los materiales a la lluvia al no contar con techo los almacenes.

2.1.4. Circuito del relleno cementado

En cuanto al transporte del relleno cementado se dispone de dos (02) bombas SCHWING BP 3500 HDR, con el cual se realiza el bombeo desde la planta hacia interior mina a una distancia promedio entre 1 a 1,5 km, por una tubería de acero de diámetro 12,7 cm (5"). El

ascenso se inicia por la chimenea y luego presenta cruce por las labores por medio de codos y uniones, por lo que las principales restricciones durante el proceso de transporte es al atrapamiento u obstrucción del relleno en su recorrido, en el pasado se han presentado problemas de este tipo por lo cual han tenido que paralizar el bombeo hasta reparar o reemplazar el tramo de tubería que se encontraba obstruida; y en algunos casos con el relleno fraguado en su interior, otra de las preocupaciones del transporte es la presión de operación de la bomba, el cual se ha observado que funciona normalmente hasta 140 bar con un máximo de 160 bar, en caso que sobrepase este valor se inician los problemas por paralización de las bombas.

Debido a lo indicado anteriormente los encargados de la planta de relleno cementado han realizado ligeras variaciones a los diseños de mezclas típicos, donde han reducido el peso de agregado de piedra de 1,91 cm (3/4") en el orden de 150 kg a 250 kg, y lo han remplazado en equivalente en peso por relave

y confitillo (piedra de 1,27 cm o 1/2”), así mismo han observado que con un “slump” comprendida entre 19,685 cm (7 3/4”) y 20,32 cm (8”) pueden controlar la presión de operación de la bomba, el cual a su vez define el flujo de bombeo que está comprendido entre 18 a 25 m³/hora.

Así mismo, como la planta produce por tanda 1,25 m³ de relleno cementado, el diseño original que es para 1 m³ ha sido recalculado para este nuevo volumen, teniendo en consideración previamente la reducción y reemplazo de la cantidad de piedra de 1,91 cm (3/4”), así como también las consideraciones de sus propiedades físicas como absorción y humedad de los agregados.

Por otro lado los análisis granulométricos, ensayos de humedad y propiedades físicas de los agregados se realizan con una frecuencia de 01 vez a la semana y colocan relleno en el orden de 400 m³/día, por lo que no se cuenta con los valores diarios de

humedad, absorción y otros para la preparación del relleno cementado de cada losa.

Las lluvias también afectan a la humedad de los agregados que están almacenados en los depósitos sin techar, por esta razón durante la operación regulan la cantidad de agua en función al slump de 19,685 cm (7 3/4") y 20,32 cm (8").

En consecuencia el diseño de mezcla original ha sufrido modificaciones primero por reducción de peso de piedra 1,91 cm (3/4"), luego el recalcu lo por el volumen de la tanda a 1,25 m³ y finalmente variación del peso durante la operación para controlar la humedad de los agregados, mediante la medición del slump, con el cual se evita problemas de la presión de operación de la bomba.

Tabla 4
Diseño Ajustado por la Operación (Diseño 1)

MATERIALES	PESO DISEÑO	VARIACION DEL PESO BOMBEO (kg)	PESO DEL DISEÑO RECALCULADO (Kg)	PESO RECALCULADO (1,25 m³) EN PLANTA DE PRODUCCION	VARIACION DEL PESO POR OPERACIÓN
PIEDRA	560	-150	410	517	+/- 4
CONFITILLO	620	50	670	895	+/-
RELAVE	625	100	725	1006	+/-
CEMENTO	300	0	300	375	+/- 1
AGUA	220	0	220	108	+/- 1
EUCO 537	3	0	3	3,75	-
EUCO WO	0,3	0	0,3	0,38	-

Fuente: Laboratorio de relleno cementado Andaychagua.

A continuación en la Tabla 4, se muestran los diseños recalculados utilizados en la planta para la producción del relleno cementado, considerando la utilización de los agregados producidos en la planta de relleno mediante el chancado y zarandeo del desmonte de mina, por lo que los agregados contemplados son la piedra 67 (3/4") y el confitillo 89 (1/2"), los pesos recalculados para 1,25 m³ se ingresan al software los cuales se reajustan durante la operación según la humedad de los materiales.

Con referencia a la colocación del relleno luego de verificar que se encuentra conforme el armado del acero de la losa con su respectivo encofrado se procede con el bombeo desde la planta hacia la losa de turno, el cual actualmente tiene un recorrido comprendido entre 1 a 1,5 km de longitud de tubería de fierro de diámetro 12,7 cm (5"), con un flujo comprendido entre 18 a 25 m³/hora el cual es enviado normalmente con un slump comprendido entre 19,685 cm (7 3/4") y 20,32 cm (8").

La colocación se realiza mediante la tubería de descarga de diámetro 12,7 cm (5"), el cual está ubicada entre 3,50 m a 3,80 m de altura respecto del nivel inferior de la losa, por lo que el relleno cae desde altura de 3,8 m en la primera etapa del vaciado y va formando un cono durante el proceso de colocación, el bombeo se inicia con 02 tandas de mortero y luego 03 tandas de soft (relave, cemento y agua) con la finalidad de lubricar la tubería, posteriormente se coloca el relleno cementado y cuando falta 1 hora aproximadamente

para culminar con el relleno (18 a 25 m³) se envía entre 15 a 18 tandas de soft de 1,25 m³ c/u con la finalidad de que este material por su alta trabajabilidad se deslice por la parte superior de la losa y la nivele de forma tal que se elimine el cono conformado durante el vaciado, lográndose parcialmente este objetivo.

Para el proceso de colocación se dispone de 01 cuadrilla de inspectores en interior mina quienes mantienen comunicación telefónica con el personal que opera en planta y permanentemente están informando el comportamiento del relleno cementado en referencia a su trabajabilidad, con el cual el operador de la sala de mando realiza los ajustes pertinentes a la dosificación de los agregados.

2.1.5. Enmallado de acero

Previamente al llenado de la losa, se realiza la preparación de la superficie inferior del paño, que consiste en el retiro de todo tipo de material

inadecuado, como exceso de agua, material suelto, restos sólidos no estructurales, posteriormente se realiza el armado de las mallas de acero según corresponda el ancho del paño y finalmente se realiza el encofrado de los lados laterales del paño de losa, el cual consiste en un panel de madera apuntalado tanto desde la parte interior del paño como desde la parte exterior.

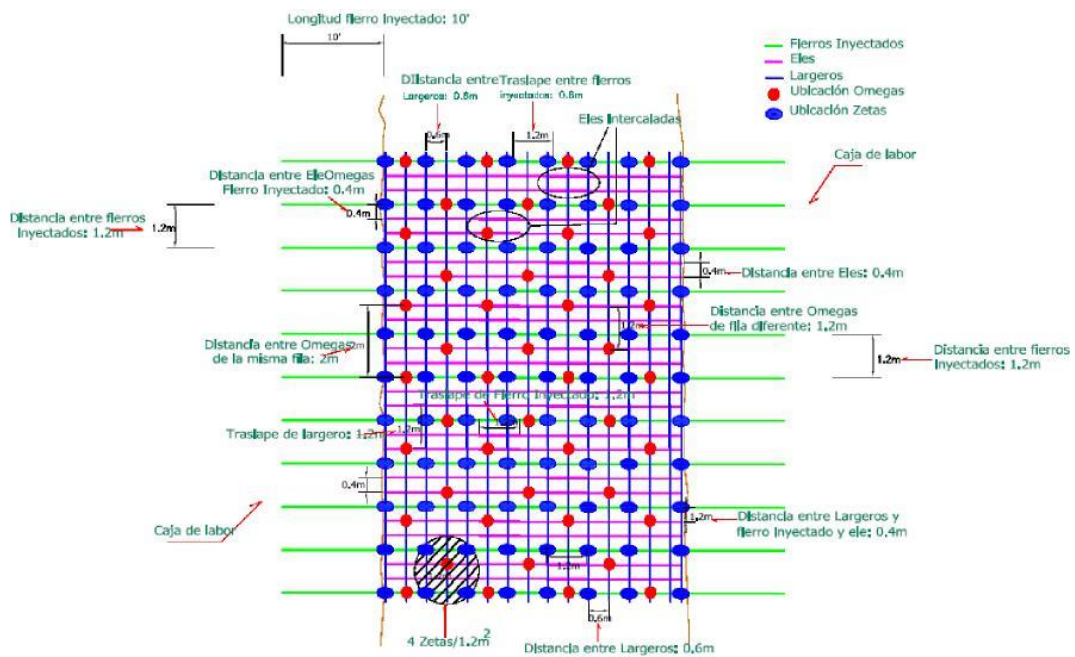


Figura 4. Malla de acero actual para refuerzo de la losa.
Fuente: Laboratorio de geomecánica Andaychagua, (2014).

La malla de acero es de diferentes diámetros y tienen la función de incrementar la resistencia a la flexión y reforzar en el caso que exista juntas frías durante el vaciado, las mismas que están ancladas en la roca de la caja techo y piso. Para casos en que el ancho de losas es mayor a 6 m se coloca doble malla espaciados 15 cm entre sí. En la figura 4, se muestra las dimensiones del armado de malla.

Los fierros inyectados y los ejes son de 2,54 cm (1") de diámetro, los largueros de 1,91 cm (3/4") de diámetro, los zetas y omegas son de 1,91 cm (3/4") de diámetro y los traslapes son de 1 a 1,2 m. (ver anexos de preparación de barreras y enmallado de fierros).

2.1.6. Tabiques o encofrados

Los encofrados de cada panel de losa son construidos usando tablonces de madera de 5,08 cm (2") y puntales de 20,32 cm (8") de diámetro, la altura de los encofrados son de 3,5 m y detrás del encofrado se

coloca una tela arpillera para que el relleno cementado no escape por lo orificios. En la figura 5 siguiente se muestra unas fotos referenciales (ver anexos de preparación de barreras y enmallado de fierros).



Figura 5. Encofrado o tabique actual de las losas.

Fuente: Laboratorio de geomecánica Andaychagua. (2014).

En vista que los trabajos de construcción del encofrado son laboriosos requiriendo de abundante mano de obra y tiempo, se recomienda evaluar la posibilidad de reemplazar estos encofrados por una estructura de malla más shotcrete ancladas en las cajas, que cumplan la función del encofrado.

2.1.7. Losa de concreto

Las losas son de 3,50 m de altura y se deja un espaciamiento de 1,0 m con respecto a la losa inmediatamente superior, el largo de las losas es de 200 m y los anchos pueden ser variables entre losa y losa que van de 3,50 m hasta 15,00 m. Las longitudes de vaciado varían entre 12 a 15 m, que son delimitados por un encofrado o tabique. En algunos sectores de la losa a lo largo del tajeo se realiza el encofrado de una chimenea discontinua con la finalidad de obtener una zona hueca en la losa, para poder evaluar las posibles deformaciones y mejorar la ventilación dentro del tajeo, en donde hasta la fecha se ha observado roturas en la madera del encofrado interior pero sin deformaciones del relleno cementado.

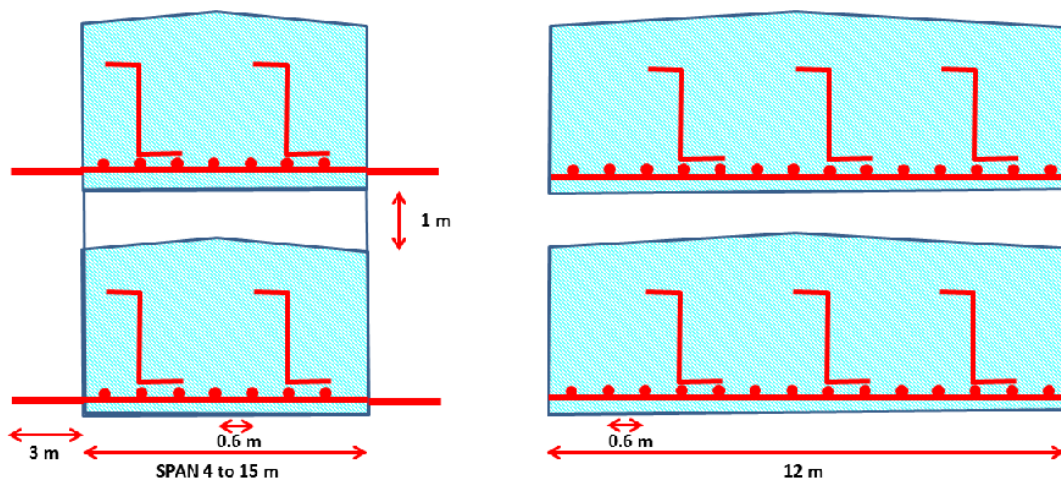


Figura 6. Vistas longitudinal y transversal de la losa de relleno cementado.
Fuente: Laboratorio de geomecánica Andaychagua. (2014)

2.1.8. Ensayos de resistencia a la compresión uniaxial

En la unidad Andaychagua los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial se realizan con el equipo del laboratorio de suelos consistente en una prensa Part N° 60916, modelo B de 689,48 BAR máximo, el cual es calibrado cada 6 meses, las muestras no pasan por el proceso de capeado, en su reemplazo se utiliza un disco de neopreno con 2,54 cm de espesor en ambos lados de la muestra.

Este sistema únicamente brinda la fuerza a la cual falla la muestra, sin presentar la gráfica esfuerzo vs. deformación.

Estos ensayos son realizados en dos unidades a los 7 y 28 días para las muestras conformadas en superficie y en dos unidades a los 28 días para las muestras conformadas en interior mina.

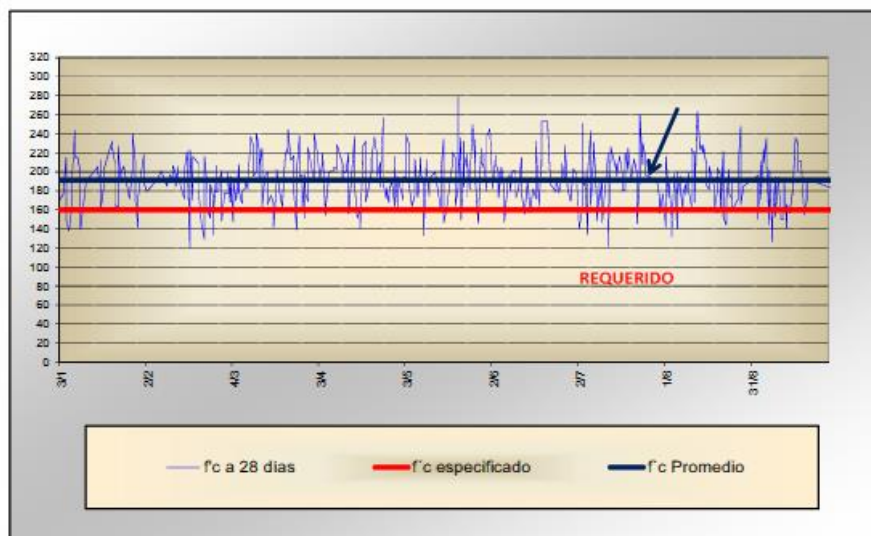


Figura 7. Resistencia del concreto a los 28 días, con muestras en superficie en el año 2013.

Fuente: Laboratorio de geomecánica Andaychagua. (2014)

Seguidamente se muestran en la Figura 7 los resultados estadísticos de los ensayos de resistencia a la compresión simple a los 28 días, sobre muestras en superficie, durante el año 2013.

En la Figura 8 se presentan los resultados estadísticos de los ensayos de resistencia a la compresión simple a los 28 días, sobre muestras en interior mina, durante el año 2013.

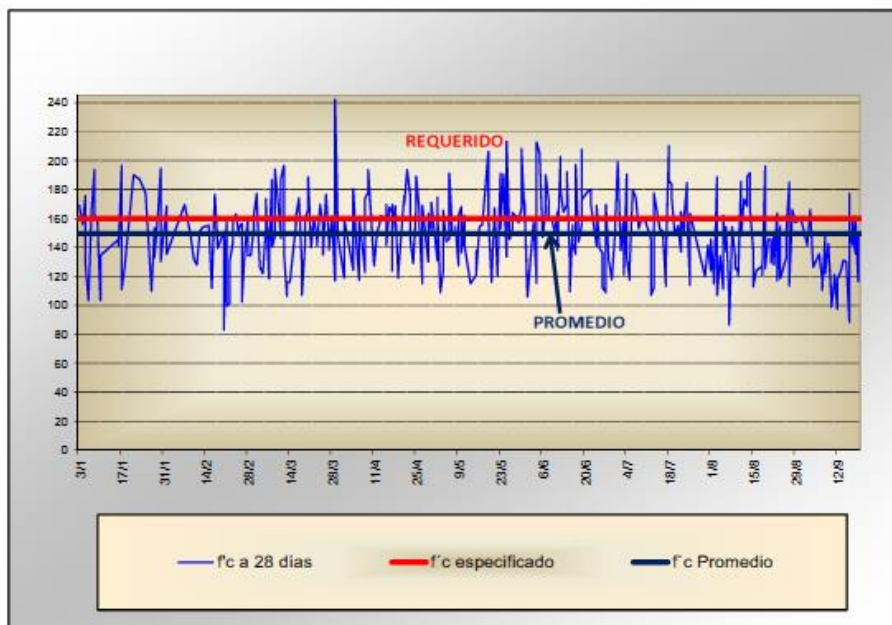


Figura 8. Resistencia del concreto a los 28 días, con muestras en interior mina en el año 2013

Fuente: Laboratorio de Geomecánica Andaychagua. (2014).

2.1.9. Consumo y costo unitario

De acuerdo con los registros del laboratorio de geomecánica de Andaychagua, la producción de relleno cementado durante el 2013, fue de 115 088 m³ y el gasto total asciende a 10'415 364 US\$, en promedio se estimó que el costo unitario total (US\$/m³) del relleno cementado asciende a 90,7.

En la Tabla 5 se indica el volumen promedio mensual de relleno cementado durante el año 2013, así como, en la Tabla 6 y la Figura 8, se muestra en promedio mensual para el año 2013, los costos unitarios estimados por las diferentes partidas y el porcentaje de incidencia correspondiente.

Tabla 5
Volumen producido de Relleno cementado (m³)

Descripción	Promedio mensual 2013
Relleno cementado m ³	11509

Fuente: Lab. geomecánica Andaychagua

Tabla 6
Costos del relleno cementado (US\$)

Descripción de partidas	Promedio Mensual 2013	Incidencia %
Cemento Andino tipo I	375995,00	35,7
Servicios (INCIMMET + Pala)	277510,00	26,4
Agregados (arena y piedra)	115794,00	11,0
Fe corrugado 2,54 y 1,91 cm x 9 m	90968,00	8,6
Mano de obra (mantenimiento y operación)	70365,00	6,7
Aditivos EUCO 537 y WO	44861,00	4,3
Tuberías y accesorios	28772,00	2,7
Madera para encofrado	21805,00	2,1
Energía	13811,00	1,3
Varios	13235,00	1,3
Costo total (US\$)	1053116,00	100,0

Fuente: Lab.Geomecánica Andaychagua

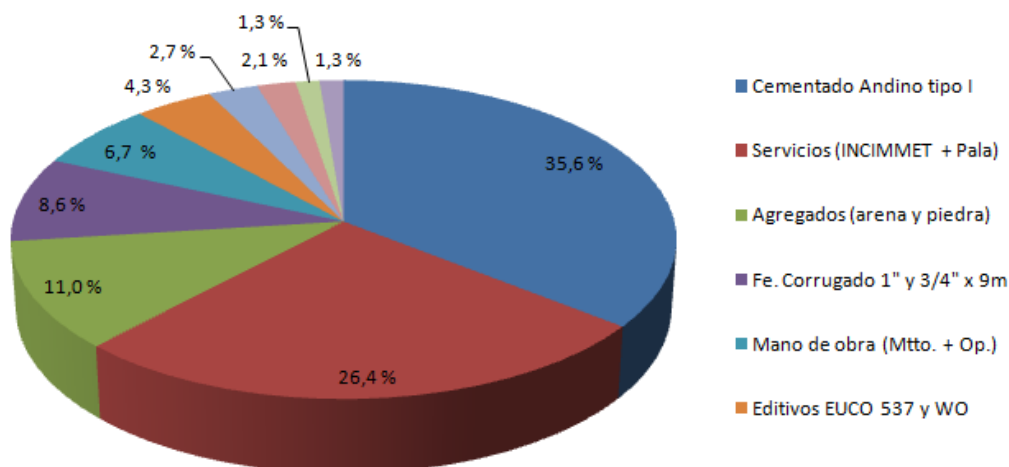


Figura 9. Porcentaje de incidencia de las partidas en la producción de relleno cementado.

Fuente: Laboratorio de geomecánica Andaychagua. (2014).

Como se aprecia, la partida Cemento Andino tipo I es la que tiene un 35,7 de incidencia en el costo unitario de relleno cementado.

2.1.10. Evaluación estructural de la losa en condición actual

En el párrafo 2.2.13. del Marco Teórico se hizo referencia a los criterios de rotura de losas, los cuales fueron aplicados por una consultora externa, determinando los esfuerzos de confinamiento y deformación; así como evaluación analítica de la losa.

2.1.11. Esfuerzos de confinamiento y deformación

Considerando la profundidad de la mina, la geometría de las excavaciones y las propiedades geomecánicas de las rocas encajonantes, se ha estimado los niveles de esfuerzo de confinamiento de las cajas hacia las losas de relleno cementado. Con la ayuda del programa de cómputo Phases2D de Rocscience, la consultora SVS S.A.C., ha modelado secuencialmente la construcción de las losas y

mediante el método de elementos finitos se ha determinado las presiones de confinamiento, tanto para el criterio gravitacional de esfuerzos como para la tendencia predominante de esfuerzos in-situ medidos en la mina.

Los parámetros geomecánicos de la roca utilizados, tal como Índice de Resistencia Geológica (**GSI**), la resistencia a la compresión del material intacto (σ_{ci}), la constante de material (**mi**), las constantes del macizo rocoso (**a** y **s**), el valor reducido de la constante de material (**mb**) y el módulo de deformación del macizo rocoso (**E_{mr}**), son los que se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7.
Propiedades de resistencia del macizo rocoso y la losa de relleno cementado

Litología	GSI	σ_{ci}	mi	a	mb	S	σ_{cm} (MPa)	E_{mr} (MPa)
Filitas	45	50	10	0,508	0,729	0,0007	5,54	3976
Filitas argilizadas	30	16	7	0,522	0,250	0,0001	0,94	948
Mineral	30	33	19	0,522	0,678	0,0001	3,25	1362
Relleno Cementado				0,5	10	1	16	20000

Fuente: David Córdova (2010)

Tabla 8.

Estimación de esfuerzo de confinamiento sobre la losa

Tipo de Modelo	Esfuerzo Transversal a la Losa o Esfuerzo Principal Mayor (σ_1) Mpa	Esfuerzo de Confinamiento a la Losa o Esfuerzo Principal Menor (σ_3) Mpa
Esfuerzos Gravitacionales	15 a 30	1 a 7
Esfuerzos In-situ	8 a 30	2 a 10

Fuente: David Córdova (2010)

La Tabla 8, muestra el resumen de los resultados del proceso de estimación del esfuerzo principal mayor (σ_1) y el esfuerzo de confinamiento, esfuerzo principal menor (σ_3), sobre la losa de relleno cementado.

2.1.12. Evaluación analítica de la losa

Considerando los parámetros de resistencia de la roca y la resistencia del relleno cementado se ha determinado el factor de seguridad, para diferentes anchos de minado, simulando la condición actual.

Tabla 9.

Factores de seguridad de las losas en condición actual (sin refuerzo de acero)

Ancho de Losa o Ancho de Minado	Falla por Flexión	Falla por Deslizamiento de Interface Losa-Roca	Falla por Desplome	Falla Rotacional
18 m	1,2	1,1	6,7	No aplica
15 m	1,7	1,3	8,1	No aplica
10 m	3,7	1,9	12,1	No aplica
6 m	10,4	2,7	20,2	No aplica
4 m	23,4	4,1	30,3	No aplica

Fuente: David Córdova (2010)

2.1.13. Análisis de costos actuales de relleno cementado

Aun a continuación se estimará el costo unitario del metro cúbico de relleno cementado, es necesario realizar el análisis detallado de los costos con el fin de comprobar las variaciones ocasionadas por el proceso de optimización de los diseños aplicados en la construcción de las losas. Para el efecto, en la Tabla 10, se muestran los parámetros constantes de los materiales que intervienen en la formulación de los diseños, que incluye el volumen promedio estimado de producción mensual.

Tabla 10**Parámetros constantes para el análisis de costos.**

	Pesos Específicos		Tipo de Cambio		Producción Planta (m³)
Piedra # 67	1570	EUCO 537	1,115	US\$/Euro 1,381	Prom. Mes 12000,00
Confitillo #89	1550	EUCO WR 75	1,111		
Relave	1550				

Fuente: Elaboración propia.

Los diseños actuales de mezcla, utilizan los desmontes producidos en la mina, previo chancado, así como, materiales de préstamo de canteras; en la Tabla 11, se incluyen los diseños 1 y 3, como condiciones promedio. Se observa que el diseño con materiales de cantera es más caro, dado que los precios unitarios correspondientes incluyen el costo del transporte desde las canteras hasta la planta.

Debemos anotar que los precios unitarios de la piedra, el confitillo y los aditivos son por metro cúbico, los mismos que se convierten respectivamente.

Tabla 11: Diseño de mezcla con material de chancadora y de cantera

Materiales de Chancadora (Diseño 1)				
Detalle	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo US\$/m³
Cemento	kg	0,12	300	36,00
Piedra	kg	5,28	560	1,88
Confitillo	kg	5,28	620	2,11
Relave	kg	1,61	625	0,65
EUCO 537	kg	1,23	3	3,31
EUCO WO	kg	2,14	0,3	0,58
Total Chancado				44,53

Materiales de Cantera (Diseño 3)				
Detalle	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo US\$/m³
Cemento	kg	0,12	300	36,00
Piedra	kg	21,42	850	11,60
Confitillo	kg	21,38	445	6,14
Relave	kg	1,61	590	0,61
EUCO 537	kg	1,23	3	3,31
EUCO WO	kg	2,14	0,3	0,58
Total Cantera				58,24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12

Costo unitario de instalación y materiales de maderas y fierros

INSTALACION				
Detalle	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo
Colocación de ángulos de 10', 9', 8', 7' y 6'	un	7,45	151,00	1124,95
Colocación de cable acerado para barrera	un	31,08	30,00	932,40
Poste para relleno cementado	un	34,77	152,00	5285,04
Enrejado de barrera	m ²	23,62	1317,94	31129,74
Colocación de marchavantes	un	9,73	60,00	583,80
Colocación de puntales de 10', 9', 8', 7' y 6'	un	8,35	2,00	16,70
Instalación de lona (3m de ancho)	ml	0,85	1000,94	850,80
Colocación de Perno Helic. C/CEM 3/4"x10'	ml	12,35	608,00	7508,80
Colocación de malla electrosoldada	m ²	1,97	2374,77	4678,30
Enmallado en interior mina	kg	0,33	81256,40	26814,61
Producción del mes analizado m ³				12000,00
Total				78925,14
Total Instalación				6,58
MATERIALES				
Detalle	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo
Ángulos de 10', 9', 8', 7' y 6'	un	0,34	151,00	51,34
Colocación de cable acerado para barrera	un	0,50	30,00	15,00
Poste para relleno cementado	un	25,40	152,00	3860,80
Enrejado de barrera	m ²	2,78	1317,94	3663,87
Marchavantes	un	20,00	60,00	1200,00
Puntales de 10', 9', 8', 7' y 6'	un	41,00	2,00	82,00
Lona (3m de ancho)	ml	1,66	1000,94	1661,56
Perno Helic. C/CEM 3/4"x10'	ml	12,67	608,00	7703,36
Mallado en interior mina	kg	3,20	81256,40	260020,48
Producción del mes analizado m ³				12000,00
Total				278258,41
Total Materiales				23,19
Total Madera y Fierro				29,77

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

Costo unitario de materiales e instalación de tubería

Línea de cambio Anual				
Detalle	Unidad	P.U.	Cantida d	Costo
Tubo ESSER Twin 700 DN 125, PN 200, 3000 mm	PZA	424,7	196	83241,20
Tubo ESSER Twin 700 DN 125, PN 160, 1000 mm	PZA	676,27	13	8791,51
Tubo ESSER Twin 700 DN 125, PN 160, 6000 mm	PZA	676,27	117	79123,59
Tubo ESSER Twin 700 DN 125, PN 200, 3000 mm	PZA	424,7	29	12316,30
Tubo ESSER Twin 700 DN 125, PN 200, 2000 mm	PZA	373,26	20	7465,20
Tubo ESSER Twin 900 DN 125, PN 200, 1000 mm	PZA	696,75	40	27870,00
Tubo ESSER Twin 700 DN 125, PN 160, 3000 mm	PZA	431,57	10	4315,70
Codo ESSER Twin 900 DN 125, PN 200 90°	PZA	1607,53	15	24112,95
Codo ESSER Twin 900 DN 125, PN 200 45°	PZA	930,39	12	11164,68
Codo ESSER Twin 900 DN 125, PN 200 30°	PZA	537,54	30	16126,20
Codo ESSER Twin 900 DN 125, PN 200 15°	PZA	405,92	30	12177,60
Codo ESSER Twin 900 DN 125, PN 200 7°	PZA	367,74	30	11032,20
Empaquetadura 140,0 x8,0 NBR 90	PZA	3,42	355	1214,10
Acoplamiento DN 125, PN 200	PZA	71,19	355	25272,45
Total (Euro)				324223,68
Total (US\$)				447752,90
Total Línea US\$/m³				3,11
Instalación				
Detalle		P.U.	Cantidad	Costo
Instalación de tubo de 5" en recta		464	9,3	4315,2
Instalación de codos en recta		54	36,61	1976,94
Recuperación de tubo de 5" en recta		131	5,49	719,19
Traslado de tubo de 5"		523	5,44	2845,12
Instalación de tubo de 5" en chimenea		52	22,7	1180,4
Instalación de codos en chimenea		19	73,23	1391,37
Recuperación de tubo de 5" en chimenea		28	10,97	307,16
Recuperación de codo de 5" en chimenea		11	15,52	170,72
Producción del mes analizado				12000
Total				12906,1
Total Instalación US\$/m³				1,08
Total Tuberías				4,18

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 12, muestra el cálculo del costo unitario del metro cúbico en lo que se refiere a la instalación y materiales de maderas y fierros que se utilizan el proceso constructivo de las losas de relleno cementado.

La Tabla 13, muestra los precios unitarios de las tuberías que constituyen la línea de conducción del relleno cementado, desde la planta de preparación hasta el tajeo correspondiente, este equipamiento es de duración anual; la tabla incluye los costos asociados a su instalación. Aquí se justifica la inclusión del tipo de cambio US\$/Euro, debido a que todo el material de tubería se cotiza en la moneda europea.

Tabla 14: Costo unitario de mantenimiento por m³

Detalle	Costo US\$/m³
Mantenimiento	8,00
Mano de Obra	2,00
Total	
Mantenimiento	10,00

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 14, muestra los costos asociados a las labores de mantenimiento mecánico de la planta de relleno cementado.

La Tabla 15, muestra los costos unitarios por metro cúbico de relleno cementado fabricado utilizando materiales de chancado de desmonte de mina, alcanzando un valor de 88,48 US\$/m³.

Tabla 15.
Costo total unitario del diseño 1 del RC

Detalle	Costo US\$/m³
Total chancado	44,53
Total madera y fierro	29,77
Total tuberías	4,18
Total mantenimiento	10,00
Costo Total de Relleno Cementado / m³ con material de chancadora	88,48

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16.
Costo total unitario del diseño 3 del RC

Detalle	Costo US\$/m ³
Total chancado	58,24
Total madera y fierro	29,77
Total tuberías	4,18
Total mantenimiento	10,00
Costo Total de Relleno Cementado / m³ con material de chancadora	102,19

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la Tabla 17, muestra los costos unitarios por metro cúbico de relleno cementado fabricado con materiales de cantera de préstamo, alcanzando un valor de 102,19 US\$/m³.

La Tabla 17, muestra la comparación de los costos unitarios por metro cúbico de relleno cementado con una resistencia a la compresión uniaxial de 16 MPa fabricado con materiales de chancadora y de cantera de préstamo, alcanzando un valor promedio de 95,34 US\$/m³.

Tabla 17.

Costo total unitario por m³ de relleno cementado de 16 MPa

Detalle	Costo US\$/m³
Costo Total de Relleno Cementado por m ³ con material de chancadora	88,48
Costo Total de Relleno Cementado por m ³ con material de cantera	102,19
Costo Total Promedio de Relleno Cementado por m³	95,34

Fuente: Elaboración propia

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Relleno de tajeos en minería subterránea

El relleno es un componente cada vez más importante de las operaciones de minado subterráneo en todo el mundo.

A continuación se presenta una breve descripción de los métodos actuales de la tecnología de relleno, centrándose en el relleno con roca cementada, porque, la roca cementada es el material de relleno principal utilizado en las operaciones de Andaychagua.

La disposición de relleno subterráneo no solo reduce el impacto y la huella ambiental, sino que también proporciona la base de un material de ingeniería que se puede utilizar para mejorar tanto las condiciones del terreno, y la economía del minado. Los sistemas de relleno cuidadosamente diseñados y operados de manera eficiente pueden mejorar significativamente la productividad de una operación minera. Por otra parte, el sistema de relleno mal diseñado puede convertirse en un serio impedimento a las operaciones mineras y, en el peor de los casos, comprometen la seguridad.

Ya sea compuesto de relaves, arena aluvial, o roca cementada gruesa, el relleno puede ser tratado como una forma especial de suelo. Por lo tanto, varias de las propiedades y relaciones mecánicas del suelo se pueden aplicar al relleno.

Se debe considerar que las propiedades mecánicas y el secado (curación) de relleno subterráneo depositado pueden variar considerablemente, dependiendo de las

propiedades intrínsecas del material de relleno, el método de preparación, la ubicación y el estado del ambiente de la mina.

2.2.2. Usos del relleno

El relleno tiene múltiples usos, como se muestra en la Figura 8. Los objetivos principales son mejorar la estabilidad del techo del tajeo y para permitir el aumento de la extracción del mineral. Otros usos de aplicación importantes incluyen el control de dilución y el soporte regional. Aunque es mucho menos común, algunas aplicaciones interesantes podrían incluir la mejora de la ventilación, control de incendios y protección ambiental (De Souza, et al., 1998).

En el uso del relleno para la estabilidad de paredes, el objetivo no es transmitir los esfuerzos de la roca, sino, reducir la convergencia incontrolable de masa de roca, para que la roca misma conserve su capacidad de carga; y, a su vez, disminuir la propagación de agrietamiento de pilares de coronas y contrafuertes (Barret et al., 1978). Esto también

ayuda a prevenir derrumbes y caídas de techo, minimizar hundimiento de la superficie, y mejorar la recuperación de pilares. El resultado final es un menor deterioro de las condiciones del terreno en la mina, y por lo tanto el funcionamiento y la seguridad se han mejorado en general.

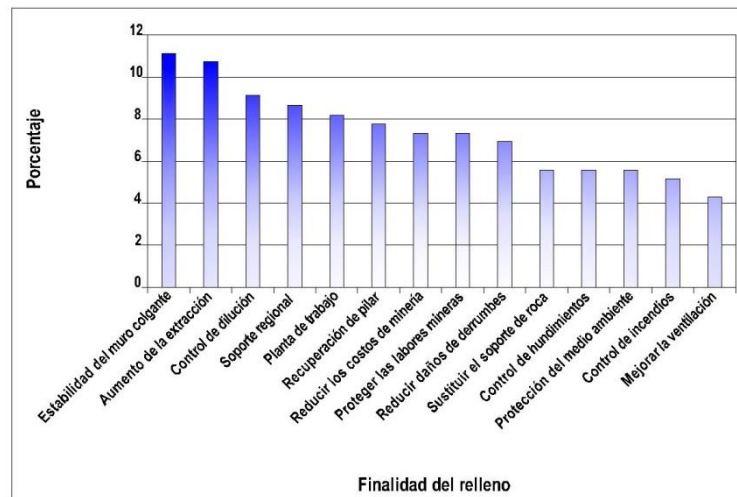


Figura 10. Usos o finalidad del relleno.

Fuente: Cáceres (2005).

La adición de pequeños porcentajes de cemento Portland ordinario proporciona fuerza de cohesión y auto-soporte, cuando se expone en caras verticales adyacentes a pilares de minado, así como para la extracción llevada a cabo a continuación. La naturaleza auto-soportante del

relleno permite una mayor recuperación de pilares. Esto, a su vez, permite una mayor explotación de las reservas mineras, y mejora la economía de la operación minera. El aumento de la recuperación de mineral tiene como consecuencia una vida más larga de mina.

En algunos métodos de minado, (como es el caso del corte y relleno ascendente) el relleno forma una plataforma de trabajo para personal y equipos de la mina. El relleno debe ser capaz de soportar este tráfico. Por lo general el cemento no es necesario en tal aplicación.

El depósito subterráneo del relleno reduce directamente la cantidad de residuos que deben eliminarse en la superficie. Esto se traduce en beneficios de costos directos operativos y de capital, así como se reducen los costos futuros de rehabilitación. Nantel (1998) reportó el inicio de una tendencia ahora común en Canadá, donde las autorizaciones ambientales para futuras minas subterráneas exigen la devolución de la máxima cantidad disponible de desechos o desmontes mineros a la operación subterránea.

Esta tendencia ha llegado a su límite lógico, como se ve en la reciente recomendación del gobierno australiano para aprobar un proyecto para la propuesta mina de uranio de Jabiluka, que está rodeada por el mundialmente famoso Parque Nacional de Kakadu (inscrito en la lista del patrimonio mundial). Para este proyecto, un porcentaje máximo de residuos de molienda están obligados a ser re-depositados bajo tierra.

2.2.3. Tipos de relleno

Se refiere a cualquier material de desecho re-depositado en huecos de minas, ya sea para su eliminación o alguna otra tarea de ingeniería. Estos materiales incluyen la roca estéril de desarrollo, deslamada y residuos de tratamiento metalúrgicos, de cantera y agregados chancados y arenas aluviales o eólicos. Otros componentes exóticos de relleno pueden incluir hielo y sal. Los materiales de desecho a menudo se combinan con cemento u otros aglutinantes puzolánicos (cenizas volcánicas) para mejorar sus propiedades de resistencia.

Los tres tipos de relleno más comunes son:

- Relleno hidráulico. Relaves deslamados, con densidades de hasta 70 % de concentración de sólidos, las fracciones más gruesas se depositan subterráneamente como relleno hidráulico y los lodos rechazados a la presa de superficie.
- Relleno de roca. Desechos de rocas superficiales o subterráneas fragmentados a un tamaño máximo, se puede depositar como es o combinado con lechada de relleno hidráulico cementado.
- Relleno en pasta. Relaves totales filtrados o espesados a 80 % de concentración de sólidos, aproximadamente, al que se añade cemento y agua, para alcanzar las características reológicas y de resistencia requeridas. Este tipo de relleno no es motivo de discusión en ésta tesis.

2.2.4. Relleno de roca

El enrocado se puede agrupar en tipos de material no consolidado y consolidado. Este último comprende mezclas aglutinadas que alcanzan la resistencia requerida para un propósito dado.

Relleno de roca consolidado, o cementado (CRF) incluye agregados clasificados o sin clasificar, mezclado con una variedad de tipos y cantidades de materiales aglutinantes. Típicamente, el relleno de roca no consolidada, o no cementado (URF) es pre-mezclado con aglutinante de cemento, por lo general en forma de barro o suspensión, antes de su entrada en el tajeo, formando un material razonablemente homogéneo en ese momento. El relleno de roca consolidado se emplea comúnmente en grandes exposiciones donde puede ocurrir socavamiento, se espera que la exposición futura de los muros de relleno, y se desea una resistencia significativa al movimiento de la pared. La rigidez de enrocado así logrado produce ventajas significativas a las operaciones que buscan el control del

terreno en los lugares sometidos a altas tensiones del terreno.

El tipo de relleno CRF, también facilita un método barato de eliminar los residuos de desarrollo o residuos de tajo abierto superficial.

2.2.4.1. Relleno de roca no cementado — URF

El relleno URF es el material de desecho depositado sin aditivos. Aunque URF tiene una limitada capacidad de soporte del terreno debido a su mínima resistencia al cierre, URF evitará pared lodosa. Es insignificante la capacidad de tal relleno de mantenerse libremente. URF se utiliza cuando el tajeo lleno no estará expuesto a futuras operaciones de recuperación de pilar. En este caso, los tajeos que rodean el tajeo lleno habrán explotado y rellenado antes de la recuperación del pilar. El procedimiento URF se utiliza generalmente para el relleno de vacíos y proporcionar alguna medida de soporte pasivo a la

pared, para resistir el movimiento localizado del terreno. Es un medio de llenado de costo relativamente bajo, lo que es a la vez conveniente y relativamente fácil de colocar in situ.

2.2.4.2. Relleno de roca cementado con lechada de cemento Portland — CRF

Una variación de relleno de roca cementada ampliamente utilizado en Canadá hace uso de roca estéril triturada y lechada de cemento Portland agregada a tasas de aproximadamente el 5 % en peso de cemento. En consecuencia, la curva general de dimensionamiento es baja en contenido de finos (es decir, la distribución del tamaño de fragmentos de roca). Esto reduce la capacidad de trabajo del relleno depositado y exige mayor agregación de cemento para proporcionar el rendimiento equivalente de esfuerzos. La técnica está actualmente en uso en la mina Andaychagua, donde una planta de hormigón en superficie produce lodo, que luego se entrega a

través de las perforaciones a una planta de mezcla subterráneo.

Tenga en cuenta que el CRF produce un relleno de alta resistencia, exigiendo menores cantidades de agentes de cementación en comparación con los materiales de relleno hidráulico cementado (incluyendo relleno en pasta).

Agregado con componentes aglutinantes equivalentes, CRF exhibe una resistencia a la compresión uniaxial que pueden ser de dos a tres veces mayor que el relleno hidráulico consolidado (incluyendo relleno en pasta).

Los rellenos CRF también exhiben altos módulos de elasticidad, de cohesión, y los de ángulo de fricción característicos, excepto las mezclas de relleno hidráulico (incluyendo relleno en pasta) compuestas de contenidos de cemento similares.

2.2.5. Propiedades del relleno

Las partículas del relleno de roca están en constante contacto con los demás, es decir, las partículas no chocan sino ruedan, frotan y raspan contra otros. Este tipo de tensión se llama tensión de fricción, en oposición a la tensión de colisión o cinética, que se produce en soluciones más diluidas.

Cuando el material granular no se mueve o fluye en cualquier medida, la única fuerza que actúa sobre los granos es la gravedad. La teoría de la ingeniería básica establece que para cualquier fluido, la tensión total en la parte inferior de una pila granular de la altura h sería:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.1)$$

Donde:

- g es la aceleración de la gravedad; y
- ρ es la densidad aparente del material rocoso.

Teóricamente, la tensión total en la parte inferior del relleno de desmonte es una tensión normal a lo largo de la

dirección vertical (h), y por lo tanto es una presión isostática, exclusivamente a consecuencia del peso de la pila de enrocado. En la práctica esto no es cierto. De hecho, más allá de una altura suficiente de la columna de enrocado, la presión alcanza un valor máximo y no aumentará más, independientemente de la altura del relleno. Esto ocurre porque el enrocado soporta la tensión de cizallamiento de fricción, incluso en una situación estática. Además, existen paredes laterales dentro de la bancada, que pueden soportar el peso extra de la columna de enrocado. Y así, la tensión total en la parte inferior de la pila de enrocado es una combinación de tensión normal y la tensión de cizallamiento.

Con el fin de predecir la capacidad de soporte del terreno de un sistema de relleno, es esencial para definir en primer lugar, y para entender, las propiedades importantes del material de relleno. Dado que la mayoría de material de relleno puede ser definido como suelos granulares o de grano fino, la evaluación de cualquier propiedad de llenado implica los principios de mecánica de suelos. Sin embargo,

la mecánica de suelos por sí sola no puede describir todas las propiedades de relleno cementado. La agregación de cemento y otras puzolanas a un relleno, transforma el relleno de material natural, por ejemplo, el suelo, a un material de ingeniería, haciendo el proceso de caracterización de propiedades de relleno más complejo. Por tanto, es necesaria una extensa evaluación de los efectos de la agregación de cemento.

Detallados estudios y trabajos de laboratorio existentes examinan los rellenos cementados y las propiedades importantes en su diseño. Las pruebas de laboratorio indican que las propiedades relevantes de relleno cementado son:

- resistencia (resistencia a la compresión uniaxial);
- comportamiento a la deformación;
- cohesión y ángulo de fricción interno;
- densidad y porosidad; y
- consistencia de la mezcla.

Al igual que con relleno no cementado, la resistencia es la principal preocupación en rellenos cementados. Ciertas propiedades del material de relleno incluyendo ángulo de fricción, densidad y porosidad, tienen el mismo efecto sobre la resistencia del relleno cementado como en la resistencia de relleno no cementada.

La agregación de cemento mejora las propiedades de resistencia del material de relleno. El aumento más evidente en la fuerza de un relleno sobre un relleno cementado está en la resistencia al corte.

Ligazones de cemento formadas entre las partículas de relleno producen un componente de cohesión en la resistencia al corte del relleno, ausente en un relleno cementado.

La relación entre la tensión de cizallamiento y la tensión normal se conoce comúnmente como la relación de Mohr-Coulomb para el esfuerzo de corte friccional.

En su forma básica, es:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (2.2)$$

Donde:

- T:** es el esfuerzo de corte friccional (MPa, psi, etc.);
- σ_n :** es el esfuerzo normal friccional (MPa, psi, etc.); y
- c:** es la cohesión del material (MPa, psi, etc.).

La cohesión, c , es una propiedad conocida del material (describiendo el estado cohesivo de los granos) normalmente despreciable en material de relleno no cementado, y ϕ es el ángulo de reposo (i.e., el ángulo de fricción interna del material).

La siguiente figura describe la ecuación 2.2:

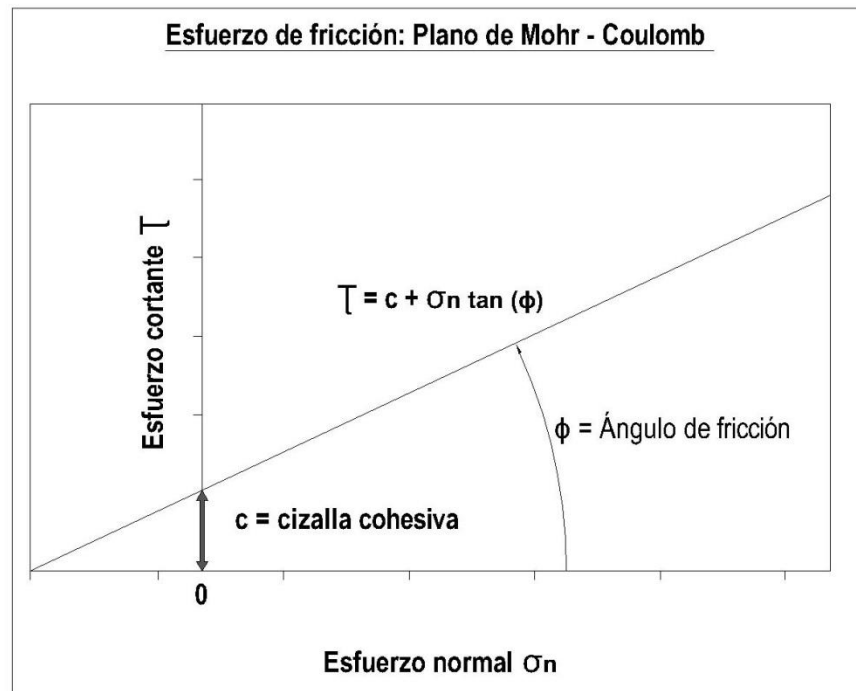


Figura 11. Envolvente de rotura de Mohr-Coulomb de un material de relleno cohesivo
Fuente: Cáceres (2005).

En rendimiento, la mayor tensión de rozamiento, mayor es la tensión de corte. El mayor interconectado de las partículas, es decir, más cohesiva, o cuanto mayor sea el ángulo de fricción, mayor es la tensión de corte, como se indica en la figura 11.

La ley de Mohr-Coulomb describe la ecuación 2.2 y se muestra en la figura 12, es una ley que afirma que un material

puede producir por cizallamiento en un elemento de superficie si T alcanza un valor crítico definido por la ecuación 2.2. Esta relación lineal se llama a veces la "línea de fluencia". Por debajo de la línea de fluencia, la respuesta del material será rígido o elástico y no suelen someterse a tensión, y si lo hace es meramente deformación elástica. La deformación elástica es insignificante en material de enrocado no cementado.

La Figura 12, representa la envolvente de Mohr-Coulomb para un material de relleno no cohesivos. Si la tensión de cizallamiento se incrementa para una tensión normal dado para que el estado de tensión del material permanece en el rendimiento, a continuación, la deformación plástica, es decir, produciendo, resultará. Un estado de estrés no puede existir por encima de la línea de fluencia de Mohr-Coulomb. Cuando se alcanza la tensión de fluencia, las partículas simplemente se deslizan una sobre la otra.

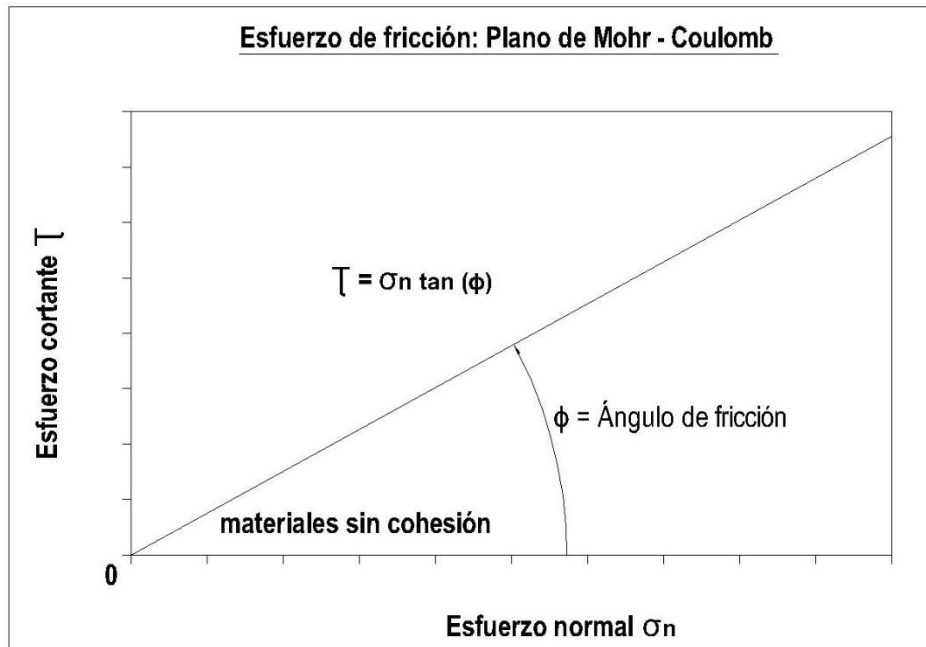


Figura 12. Envolvente de rotura Mohr-Coulomb de un material de relleno no Cohesivo.
Fuente: Cáceres (2005).

En este caso, la tensión de cizallamiento del material de enrocado se debe únicamente a la componente de fricción y se moviliza por la tensión normal.

El ángulo de reposo (o el ángulo de fricción interno) es evidente en la figura siguiente:



Figura 13. Ángulo de reposo para el material de relleno no cohesivo

Fuente: Cáceres (2005).

El ángulo de reposo, mostrado en la figura 13, es bajo cuando los granos son suaves, gruesas, o redondeada, y alta para partículas pegajosas, afilados, irregulares o muy finos. Típicamente, toma valores entre 15 y 50 grados. Los ángulos de fricción de enrocado en Andaychagua oscilan de 35 a 40 grados.

2.2.6. Parámetros que afectan la resistencia del relleno cementado

Los siguientes parámetros se consideran esenciales para la resistencia final del relleno cementado:

- tamaño máximo del agregado;
- granulometría del agregado;
- contenido de aglutinante de la mezcla; y
- contenido de agua de la mezcla.

La clasificación adecuada del agregado es importante, no solo para reducir la porosidad, es decir, la relación de vacío del relleno, sino también para aumentar el número de contactos roca en roca por unidad de área. La resistencia del relleno depende del número de enlaces de cemento que se desarrollan en estos puntos de contacto. La fuerza y la calidad del relleno cementado depende de lo bien que las partículas de enrocado se revisten con la lechada de cemento antes de que se depositen en el tajeo. En una operación bien controlada, se excluye bolsillos de roca no cementado del

relleno resultante, y una masa casi homogénea de relleno cementado, es alcanzable.

En la mayoría de las operaciones de minería subterránea revisado, el tamaño del agregado de roca chancada se mezcla con lechada de cemento, típicamente a un contenido de cemento del 5 al 6 por ciento, en peso (cw), y una densidad de pulpa de 50 a 60 % (cw). Este tipo de relleno puede ejercer presión activa al entrar en contacto con las paredes de los tajeos, proporcionando no solo de soporte subterráneo, sino también la mejora de la resistencia de la pared de roca inherente. En el caso de enrocado consolidado, normalmente ningún problema de drenaje se produce, y una alta calidad de relleno a menudo se puede lograr si los materiales se mezclan adecuadamente. Con estos materiales de roca chancada. Sin embargo, el control de la segregación puede ser difícil, y control de calidad puede ser variable. En este sentido, Stone (1993) presenta una metodología para la optimización de los diseños de mezcla para relleno cementado, y sugiere las evaluaciones de laboratorio para la verificación de los parámetros de diseño. Además, un

programa de pruebas de control de calidad y supervisión del rendimiento se perfila para mejorar la fiabilidad del diseño.

La segregación de relleno de roca consolidado es a menudo inevitable, pero puede ser minimizado cuando las operaciones de llenado están bien planificadas y se controlen estrechamente.

2.2.7. Definición de la losa

Los puentes son bloques de mineral que quedan entre los niveles de trabajo en una mina subterránea para sostener el relleno suprayacente de la mina, durante la extracción del mineral subyacente. Cuerpos de mineral fuertemente inclinados deben ser extraídos de abajo hacia arriba, pero por razones económicas o debido a las limitaciones de estabilidad, los niveles de mineral superiores son generalmente extraídos primero (por ejemplo, mediante corte y relleno descendente). Las losas se utilizan comúnmente en zonas de mineral con fuerte buzamiento de ancho limitado.

Una situación típica se ilustra en la Figura 14:

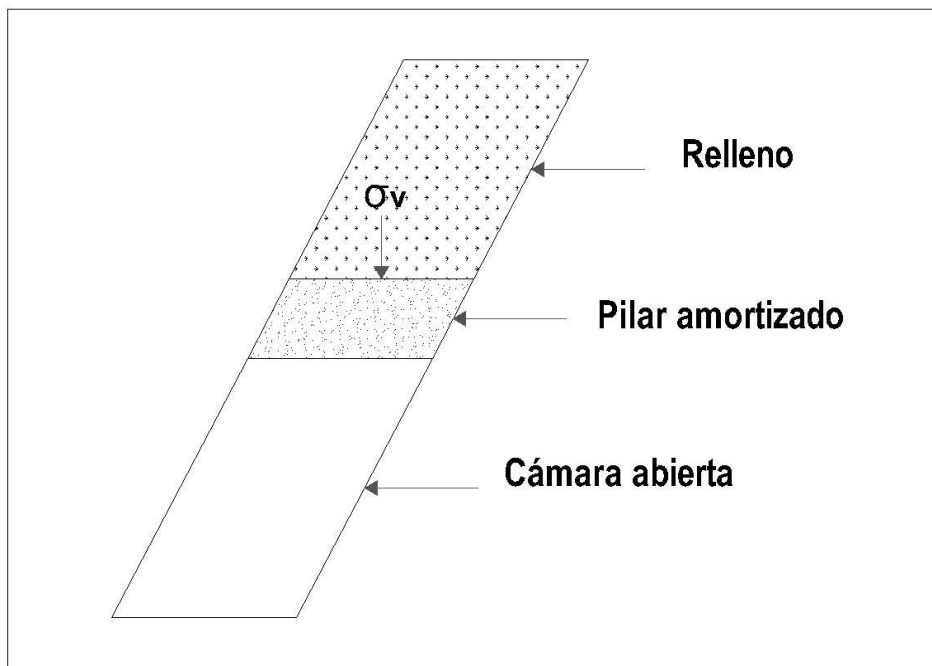


Figura 14. Sección transversal de una losa "Sill mat pillar".

Fuente: Cáceres (2005).

En consecuencia, los valores explotables en el mineral generalmente hacen que sea económicamente viable para extraer el pilar de sostenimiento. Es necesario crear una losa artificial, que sostenga el relleno suprayacente no consolidado, después se extrae el siguiente tajeo. Tales losas de

cimentación se pueden construir a partir de cualquier material de relleno cementado, hidráulico o relleno en pasta.

En el análisis de la estabilidad de la losa, la fuerza de relleno necesaria para mantener la estabilidad es una función de los esfuerzos generados dentro y alrededor de la losa y la masa de relleno.

Estos esfuerzos son causados por:

- peso propio de la losa;
- carga vertical del relleno no consolidado;
- daños por explosión/abrasión; y
- movimientos del terreno.

La carga de diseño más importante utilizada en esta tesis es el peso del material de relleno. Las tensiones generadas por este peso son una función de la densidad de relleno, el ángulo de fricción del relleno, la altura, y el ancho de minado.

Se han propuesto una serie de métodos para el análisis de la estabilidad de las losas cementadas. Estos generalmente usan pared independiente o conceptos de estabilidad de tajeos bidimensionales. El enfoque de Mitchell (1991) se revisa en este capítulo.

2.2.8. Cargas que actúan sobre materiales no consolidados

Cuando el material de relleno se vierte sobre una superficie horizontal, se acumula en un volumen en forma cónica, formando un específico ángulo ϕ con el plano horizontal. Este ángulo es característico de cada tipo de material y se llama el ángulo natural de reposo del material. Este es el ángulo de fricción interno. Si el material se descarga en un espacio cerrado, como el de un tajeo, ejercerá presión sobre las paredes y en el piso del tajeo. El empuje resultante, debido a la fricción del material en las paredes, es oblicuo en relación a la superficie de las paredes. Este empuje tiene dos componentes, uno, N, normal a la pared, y la otra, T, paralela a la pared.

La presión normal también se llama empuje lateral

(Figura 15):

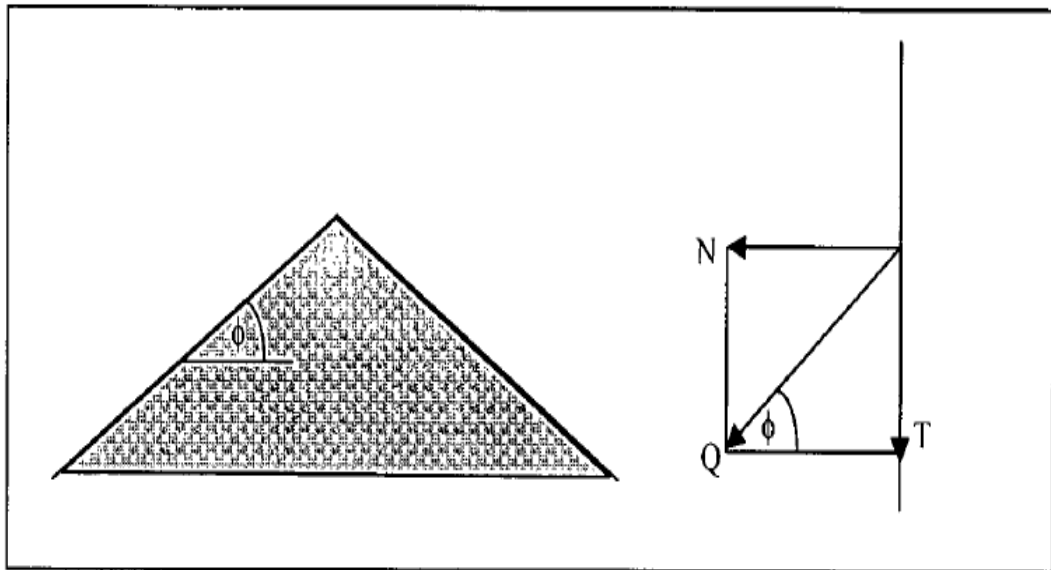


Figura 15. Ángulo natural de reposo del material (izquierda) y los componentes oblicuos, de esfuerzos normal y tangencial (a la derecha).
Fuente: Cáceres (2005).

El ángulo de fricción del material en las paredes se denomina ϕ' , y el coeficiente correspondiente de fricción es $\tan \phi'$. En función del empuje oblicuo Q definido arriba, los dos componentes N y T son:

$$N = Q \cdot \cos \phi' \quad 2.3$$

$$T = Q \cdot \sin \phi' \quad 2.4$$

Por lo tanto:

$$T = N \cdot \tan \phi' \qquad 2.5$$

Donde T es la carga equilibrada por la fricción que corresponde al empuje N.

A una profundidad dada del tajeo, la carga, es decir, la presión vertical total, es la diferencia entre el peso total del material de relleno y el desplazamiento por la fricción del material en las paredes de carga total.

Las mediciones in situ nos dicen que la presión aumenta con la profundidad. Sin embargo, debido a la fricción del material en las paredes, la presión en el suelo del tajeo es meramente una fracción del peso del material confinado.

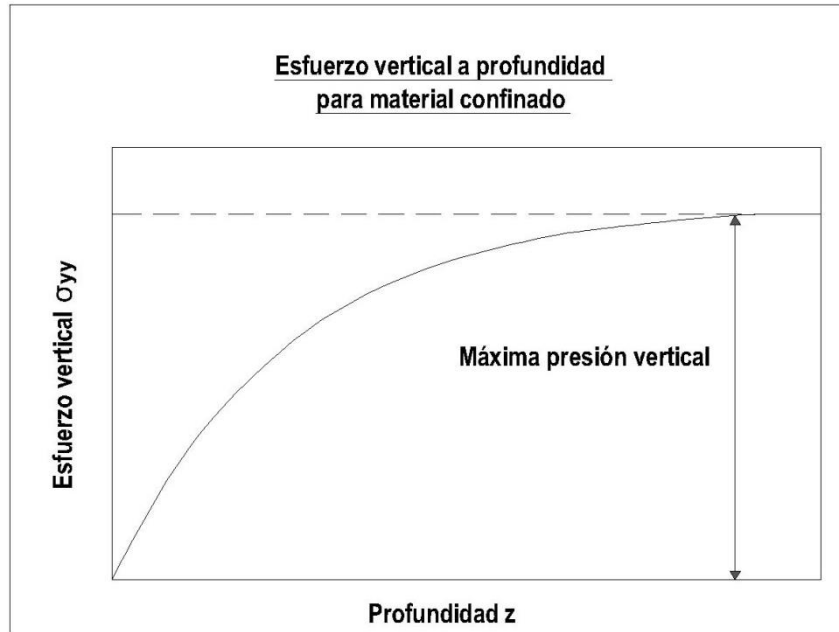


Figura 16. Esfuerzo vertical a aumentar la profundidad de un material confinado.
Fuente: Cáceres (2005).

Por otra parte, en las grandes profundidades la presión alcanza un valor máximo constante. La curva que representa la presión (profundidad trazado en el eje x, y la presión en el eje y) es asintótica paralela al eje x, en correspondencia con la presión vertical máxima (representado en la figura 16).

2.2.9. Presión máxima horizontal en las paredes del tajeo

Un comportamiento similar a la representada por la figura 17, se puede inferir de la curva que representa el empuje lateral en las paredes. Esta curva es paralela asintótica al eje x , donde las parcelas del eje y empuje máximo. El valor del empuje horizontal máximo se puede determinar por el siguiente método (figura 14):

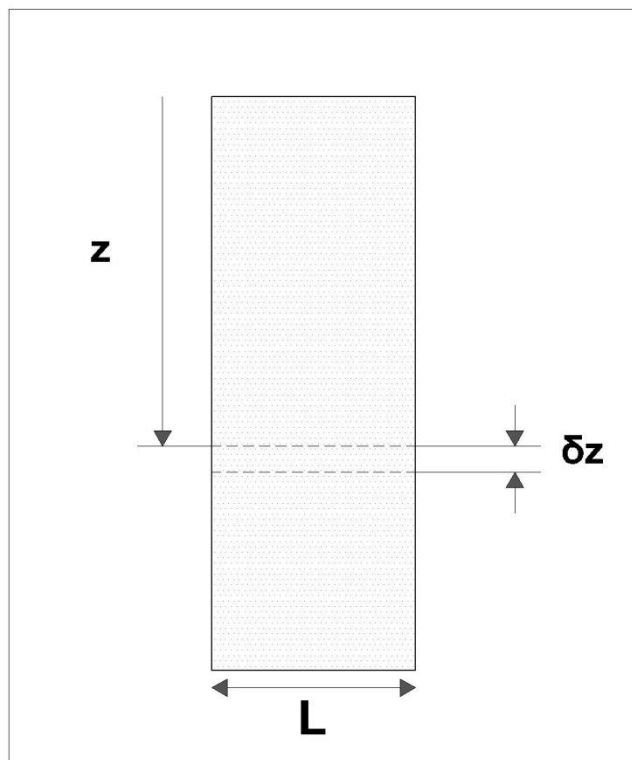


Figura 17. La presión sobre una rebanada horizontal de espesor δz .

Fuente: Cáceres (2005).

El peso de una rebanada horizontal de espesor dz en el interior del tajeo es:

$$S \cdot dz \cdot \gamma \quad 2.6$$

Donde:

S = área interna de la sección transversal del tajeo;

γ = peso unitario del material de relleno; y

dz = espesor de una tajada horizontal.

El peso ejerce una presión lateral en las paredes en todo el perímetro:

$$\sigma_x(z) \cdot P \cdot dz \quad 2.7$$

Donde:

$\sigma_x(z)$ = empuje lateral a una profundidad z ; y

P = perímetro interno del tajeo.

La presión aumenta con la profundidad hasta el máximo σ_{x_Max} , momento en el que la fricción en las paredes equilibra el peso real de la tajada considerada. Por lo tanto:

$$\sigma_{x_Max} \cdot P \cdot dz \cdot \tan \varphi' = S \cdot dz \cdot \gamma \quad 2.8$$

Desde donde se puede determinar el valor de empuje máximo:

$$\sigma_{x_Max} = \frac{\gamma \cdot S}{P \cdot \tan \varphi'} \quad 2.9$$

Tenga en cuenta que, para tajeos de suficiente dimensión longitudinal, el radio hidráulico S/P tiende a la mitad del ancho del tajeo (ver ecuación 2.9). La ecuación 2.10 indica el empuje lateral máximo dentro de un tajeo de suficientemente dimensión longitudinal:

$$\sigma_{xx_Max} = \frac{\gamma \cdot L}{2 \cdot \tan \varphi'} \quad 2.10$$

Donde:

L = ancho del tajeo.

Hasta este punto en el análisis, solo el empuje lateral máximo ha sido derivado analíticamente. La determinación de la estabilidad de la losa de CRF está relacionada con la carga vertical ejercida sobre la parte superior de la losa. El coeficiente de presión lateral del terreno implica una relación entre las presiones verticales y horizontales. Esta relación se considera en lo que sigue.

2.2.10. Coeficiente de presión lateral del terreno

La estimación de las presiones laterales del terreno no es un problema sin importancia. Tampoco es un problema nuevo. Couplet y Coulomb desarrollaron sus teorías en 1726 y 1776 (respectivamente), y Rankine desarrollo su teoría en 1857. El movimiento a la flexión de la estructura debe ocurrir para que las predicciones de estas teorías sean válidas, y si hay una traslación/rotación dentro, o fuera de, la masa de suelo en cuestión, la presión lateral activa (o pasiva) del terreno se va a desarrollar.

El coeficiente de empuje lateral implica una relación constante entre los esfuerzos promedio horizontal, σ_H , y vertical, σ_V , independiente de la geometría del volumen del relleno. Aunque no existe una razón física para una relación tal para sostener, en la práctica, los cálculos de rutinas industriales indican que los resultados implícitos en esta relación son razonablemente precisos empíricamente.

La ecuación 2.11 muestra esta relación (el coeficiente de empuje lateral del terreno):

$$K = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} \qquad 2.11$$

2.2.10.1. Categorías de la presión lateral del terreno

Hay tres categorías de presión lateral de terreno y cada uno depende del movimiento experimentado por la pared vertical en la que la presión está actuando.

Estas categorías son:

- Presión de terreno activa;
- Presión de terreno pasiva; y
- Presión de terreno en reposo.

La presión activa se desarrolla cuando la pared es libre de moverse hacia el exterior. Por ejemplo, un muro de contención en la masa del suelo puede estirarse lo suficiente, para movilizar su resistencia al corte. Por otro lado, si la pared se mueve en el suelo, entonces, la masa de suelo se comprime lo suficiente para movilizar su resistencia al corte donde se desarrolla presión pasiva.

Este problema puede producirse a lo largo de la sección de la pared que está por debajo de la rasante, en la pared opuesta de la sección superior.

Con el fin de desarrollar presión activa total o presión pasiva total, la pared debe moverse. Si la pared

no se mueve lo suficiente, la presión total no se desarrollará. Si la presión activa total no se desarrolla detrás de una pared, entonces, la presión será mayor que la presión activa esperada. Un movimiento significativo es necesario para movilizar a la presión pasiva total. Esto se ilustra en la figura 18.

La mayoría de los problemas de retención de tierras implican el movimiento de la estructura lejos de la masa de suelo, conocido como el "estado activo". Terzaghi (1996) demostró la importancia de los empujes laterales desarrollados en estructuras que no experimentan movimiento, y los llamó "presiones de tierra en reposo". Tenga en cuenta la condición de reposo, representada por la figura 18(b), donde la rotación de la pared es igual a cero (es decir, la condición para empuje lateral cero).

La Figura 18 muestra que:

- Como la pared se aleja del relleno del suelo (véase la figura 18(c)), la condición activa desarrolla y la presión lateral contra la pared disminuye con el movimiento de la pared, hasta que se alcanza la fuerza de presión activa de la tierra mínima;
- Como la pared se mueve hacia (es decir, en) el relleno del suelo (véase la figura 18(a)), la condición pasiva desarrolla y presión lateral contra la pared aumenta con movimiento de la pared hasta que se alcanza la máxima presión pasiva de la tierra - la intensidad de la presión horizontal pasiva/activa, que es una función del coeficiente de presión de la tierra aplicable, depende del movimiento de la pared, ya que afecta el grado de resistencia al corte movilizado en el suelo circundante; y
- La presión en reposo se desarrolla cuando la pared experimenta ningún movimiento lateral, que normalmente se produce cuando la pared

está restringida de movimiento, como en el caso de un tajeo (véase la figura 18(b)).

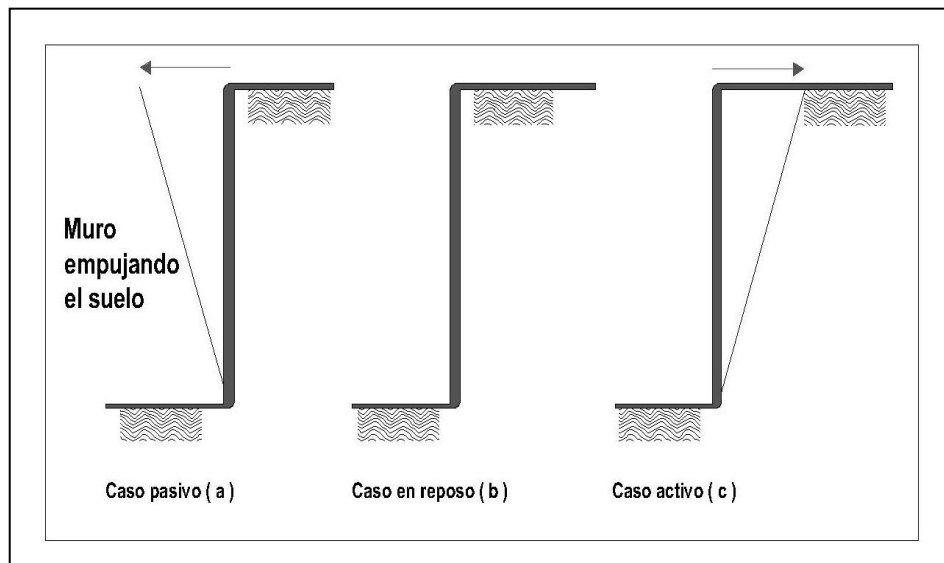


Figura 18. Relación de presión del terreno al movimiento de la pared.
Fuente: Cáceres (2005).

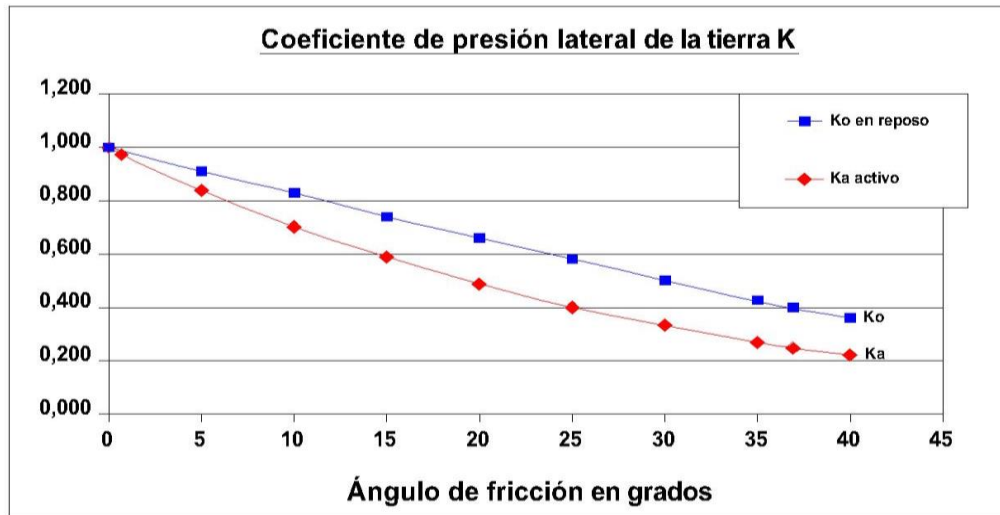


Figura 19. Comparación de coeficientes de presión en reposo y activo del terreno. Fuente: Cáceres (2005).

2.2.10.2. Cálculo de coeficientes laterales del terreno

La presión lateral del terreno está relacionada con la presión vertical del terreno por coeficientes, denominados de la siguiente manera:

- Coeficiente de empuje activo (K_a);
- Coeficiente de empuje pasivo (K_p); y
- Coeficiente de empuje en reposo (K_o).

La presión lateral del terreno es igual a la presión vertical del terreno multiplicado por el apropiado coeficiente de presión del terreno.

Desde que el relleno del suelo es típicamente material granular, tales como roca triturada, arena, arena limosa, arena con grava, etc., el material de relleno que ejerce presión sobre la pared puede ser tratado como material no cohesivo de grano grueso.

A. Coeficientes activos y pasivos de presión de terreno

Cuando se habla de la presión lateral de terreno activa y pasiva, hay dos teorías clásicas relativamente sencillas (entre otras) de uso generalizado: presión de terreno de Rankine y presión de terreno de Coulomb.

La teoría de Rankine asume que:

- No hay adhesión o fricción entre la pared y el suelo;
- La presión lateral se limita a las paredes verticales;
- La falla (en el relleno) se produce como una cuña de deslizamiento a lo largo de un asumido plano de falla definido por ϕ ;
- La presión lateral varía linealmente con la profundidad, y la presión resultante se encuentra a un tercio de la altura por sobre la base de la pared; y
- La fuerza resultante es paralela a la superficie de relleno.

La teoría de Coulomb es similar a la teoría de Rankine, excepto que:

- Hay fricción entre la pared y el suelo y las cuentas para este, mediante el uso de un ángulo de fricción de suelo-pared de δ (los

rangos de δ van a partir de $\phi/2$ a $2\phi/3$ y se utiliza comúnmente un valor de δ igual a $2\phi/3$);

- Presión lateral no se limita a las paredes verticales; y
- La fuerza resultante no es necesariamente paralela a la superficie de relleno por el valor δ de fricción del suelo-pared.

Los coeficientes de presión activa y pasiva de Rankine para una superficie de relleno horizontal se calculan como sigue:

$$(Activo) K_a = \frac{1 - \sin(\phi)}{1 + \sin(\phi)} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad 2.12$$

$$(Pasivo) K_p = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad 2.13$$

Los coeficientes de presión de terreno activa y pasiva de Coulomb son expresiones más complejas que dependen del ángulo de la pared posterior, el

valor de la fricción del suelo con la pared, y el ángulo del relleno. Los coeficientes de presión del terreno activo y pasivo de Coulomb para el caso específico de un ángulo de la pared posterior vertical y la superficie de relleno horizontal (no se muestra) da resultados equivalentes al método de Rankine (ecuaciones 2.12 y 2.13).

B. Coeficiente en reposo

Generalmente, la presión de terreno en reposo es la componente horizontal del estado de esfuerzo in situ, o la presión horizontal que actúa sobre una estructura de retención de tierras. Las presiones laterales del terreno en reposo se puede demostrar que son un múltiplo de la tensión vertical en cualquier punto, lustrada en la siguiente relación (Terzaghi, 1996):

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad 2.14$$

Donde:

σ_h : es la presión horizontal;

σ_v : es la presión vertical; y

K_0 : es el coeficiente la presión del terreno en reposo.

Una definición más específica es ofrecido por Bishop (1958): "El coeficiente de empuje en reposo, es la relación entre las tensiones efectivas laterales y verticales en un suelo consolidado bajo la condición de no deformación lateral, las tensiones siendo tensiones principales sin esfuerzo de corte aplicado a los planos en los que estas tensiones actúan" o:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad 2.15$$

Donde:

σ'_h : es la tensión efectiva principal horizontal; y

σ'_v : es la tensión efectiva principal vertical.

Relaciones publicadas existentes dependen de los valores de ingeniería de suelos para calcular el coeficiente de empuje en reposo. Un coeficiente de empuje común para la condición de reposo utilizado con suelo granular se llama el "método de presión de tierras neutral", derivado por Tschebotarioff (1973):

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad 2.16$$

Donde:

V: es la relación de Poison.

La suposición es que la fuerza de gravedad afecta la masa elástica de material y por lo tanto se evita el movimiento lateral.

Una solución alternativa para K_0 se puede encontrar a través de la ecuación de Jaky (1944):

$$K_0 = 1 - \sin(\phi) \quad 2.17$$

Donde:

ϕ : es el valor del ángulo de fricción del suelo.

2.2.11. Carga vertical máxima ejercida por el relleno en el piso de un tajeo

Después de determinar la máxima presión de empuje horizontal o lateral $a_{x_{max}}$, que se muestra en la ecuación 2.9, en la pared del tajeo, el siguiente paso es encontrar la presión vertical máxima ejercida por el relleno. Desde el (previamente definido) coeficiente de presión lateral del terreno K , lo que corresponde con la relación de esfuerzo horizontal a vertical, la máxima resistencia vertical se puede encontrar utilizando la ecuación 2.18:

$$\sigma_{y_{Max}} = \frac{y \cdot S}{P \cdot K \cdot \tan(\phi)} \quad 2.18$$

La dimensión longitudinal de magnitud suficiente permite que el radio hidráulico sea considerado como un

medio del ancho de minado en el tajeo. El esfuerzo vertical máximo será:

$$\sigma_{y_Max} = \frac{y*L}{2*K*\tan(\phi)} \quad 2.19$$

A. Formula de Terzaghi

Otro enfoque para la estimación de la carga vertical ejercida por el material de relleno deriva una solución a la ecuación diferencial lineal de primer orden:

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \left(\gamma - \frac{2*c}{L} \right) - \left(\frac{2*K*\sigma_y*\tan \phi}{L} \right) \quad 2.20$$

Donde:

c: es la cohesión del relleno cementado.

Para suelos no cohesivos, la solución a la ecuación diferencial de primer orden se obtiene de la ecuación para la tensión vertical máxima:

$$\sigma_{y_Max}(z) = \left(\frac{y*L}{2*K*\tan(\phi)} \right) \quad 2.21$$

C. Fórmula de Blight para tajeos inclinados

Propuso una solución aproximada para las tensiones en un tajeo inclinado planar. Esta solución aplicada al diseño de tajeos rectangulares inclinadas, produce la ecuación:

$$\sigma_{y_Max} = \left(\frac{y*L}{2*K*\tan(\phi)} \right) * \sin(\beta) \quad 2.22$$

Donde:

β : es la inclinación del tajeo.

2.2.12. Carga vertical de material no consolidado como una función de la altura del material

El empleo de la carga vertical máxima en lugar de la carga vertical real, dependiendo de la altura del relleno, sobreestima la resistencia requerida para soportar la carga en una losa. Esto a su vez conduce a un aumento en el costo. Por esa razón es preferible la aplicación de cargas verticales como una función de la altura de relleno.

Hay numerosas formulaciones de la teoría de silo, dos de los cuales se discuten aquí. La teoría de silo solo se aplica a los silos verticales y por lo tanto no es válido para tajeos inclinados. La teoría de silo, sin embargo, puede mejorar nuestra comprensión de cómo las tensiones verticales actúan dentro de los tajeos abiertos. El método de Janssen, y el método de Reimbert, se discuten a continuación.

A. El método de Janssen Method — Teoría de Silo

El método de Janssen se basa en el equilibrio de una rebanada delgada horizontal, expresada como una ecuación diferencial (2.23).

$$\frac{\partial \sigma_{\gamma}}{\partial \gamma} + \left(\frac{K * \sigma_{\gamma} * \tan(\phi)}{HR} \right) - \gamma = 0 \quad 2.23$$

$$\sigma_{\gamma}(z) = \left(\frac{y * HR}{K * \tan(\phi)} \right) * \left[1 - \exp \left(- \frac{K * \tan(\phi) * z}{HR} \right) \right] \quad 2.24$$

$$\sigma_{\gamma}(z) = \sigma_{\gamma_Max} * \left[1 - \exp \left(- \frac{K * \tan(\phi) * z}{HR} \right) \right] \quad 2.25$$

Donde:

γ = peso unitario del material de relleno de roca
no cementado;

HR = radio hidráulico del tajeo;

K = coeficiente de presión lateral del terreno;

b = Mitad del ancho del tajeo (ver figura 16):

ϕ = ángulo de fricción del relleno rocoso; y

z = altura del relleno.

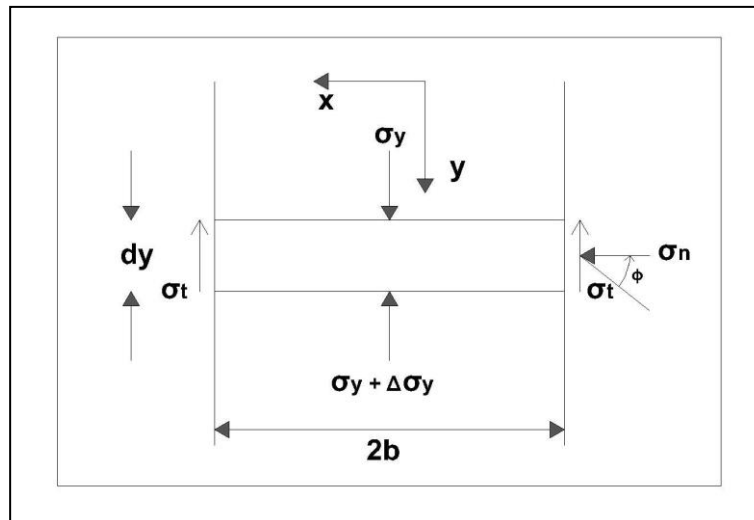


Figura 20. Rebanada diferencial en un silo.
Fuente: Cáceres (2005).

La implicación general de esta ecuación es que por debajo de una cierta profundidad en el material granular, todo el peso soportado por las paredes del tajeo, a través de la fricción, genera ya sea un estado activo o pasivo de esfuerzo (como se ilustra en la figura 17).

B. El método de Reimbert — Teoría de Silo

El método de Reimbert es una modificación del método de Janssen basado en observaciones empíricas. El método de Reimbert asume que la tensión vertical, que es la diferencia entre la tensión vertical hidrostática y la carga equilibrada por la fuerza de fricción (asintótica con la profundidad), puede representarse por una curva experimental. Para un silo indefinido entre dos paredes verticales paralelas la tensión vertical en profundidad (z) se expresa como:

$$\sigma_{\gamma}(z) = \gamma * \left\{ z \left[\left(\frac{z}{A_i} \right) + 1 \right]^{-1} \right\} \quad 2.26$$

Donde:

A_i es la abscisa característica correspondiente al silo.

La abscisa característica está definida como:

$$A_i = \frac{2*L}{\pi*\tan(\theta)*K} \quad 2.27$$

Combinando las ecuaciones 2.26 y 2.27, tenemos:

$$\sigma_\gamma(z) = \gamma * \left\{ z \left[\left(\frac{\pi*\tan(\theta)*K*z}{2*L} \right) + 1 \right]^{-1} \right\} \quad 2.28$$

2.2.13. Estabilidad de la losa de relleno cementado

La Figura 19 muestra el diagrama de esfuerzos asociados a los modos de rotura de la losa de relleno cementado para evaluar la estabilidad aplicando la metodología del equilibrio límite.



Figura 21. Diagrama de esfuerzos de la losa de relleno cementado.
Fuente: Vivar (2014).

Para el efecto, uno de los componentes clave, de la estabilidad de la losa de relleno cementado, es la carga vertical ejercida por el material de relleno. La carga vertical es un parámetro de entrada crucial de la solución analítica de la estabilidad de la losa.

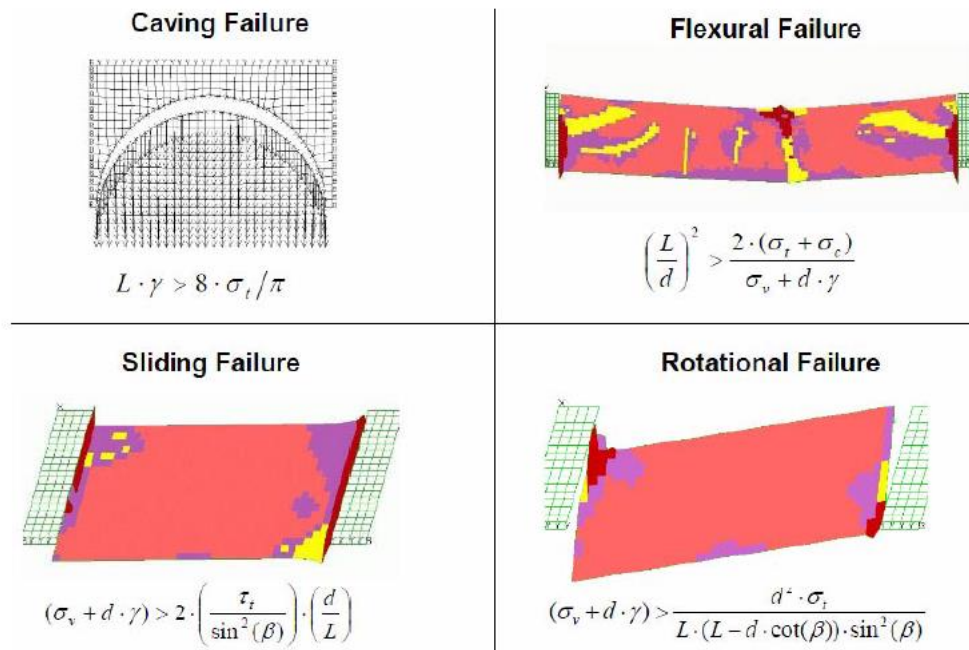


Figura 22. Criterios de falla de la losa de relleno cementado.

Fuente: Mitchell (1991).

Según la Figura 22, los modos específicos de rotura pertinentes aquí son: hundimiento de bloque, falla a la flexión, deslizamiento de bloque (falla al corte paralela a la pared que cuelga dentro del relleno), y la falla por rotación (falla por tensión/corte de la cubierta a medida que gira lejos de la pared colgante de buzamiento plano).

A. Falla por hundimiento (Caving Failure)

De acuerdo con Mitchell (1991), si se supone que el hundimiento se extiende hasta la altura de un arco estable $L/2$ (para un arco semicircular), todas las losas no reforzadas formarían una profundidad, $d > L/2$, y el hundimiento se produciría cuando:

$$L * \gamma > 8 * \frac{\sigma_t}{\pi} \quad 2.29$$

Donde:

σ_t = resistencia a la tensión del relleno cementado;

γ = peso unitario del material; y

L = ancho del tajeo

Las fuerzas motrices representadas por el peso w del arco de radio $L / 2$ se definen como:

$$\omega = \frac{\pi * L^2}{8} * \gamma \quad 2.30$$

La resistencia a la tensión de la losa σ_t , sobre toda la abertura L entre la caja techo y la caja piso, representa la

fuerza de resistencia. El factor de seguridad (FS) se deriva de las fuerzas que resisten el movimiento sobre las fuerzas motrices:

$$F.S. = \frac{8 * \sigma_t}{\gamma * \pi * L} \quad 2.31$$

B. Falla por flexión (Flexural Failure)

Una losa ancha y delgada es susceptible de fallar a la flexión debido a la relativamente baja resistencia a la tracción del material de relleno cementado. Usando las fórmulas de flexión estándar según (Mitchell, 1991), para un extremo fijo de una viga uniformemente cargada, la falla se predice cuando:

$$\left(\frac{L}{d}\right)^2 > \frac{2 * (\sigma_t + \sigma_c)}{w} \quad 2.32$$

$$\left(\frac{L}{d}\right)^2 > \frac{2 * (\sigma_t + \sigma_c)}{\sigma_v + d * \gamma} \quad 2.33$$

Donde:

σ_t = resistencia a la tensión del relleno cementado;

σ_c = esfuerzo horizontal confinado;

w = carga uniforme, la cual incluye el propio peso de la losa;

L = ancho del tajeo

d = profundidad de la losa

C. Falla por deslizamiento (Sliding Failure)

De equilibrio, el bloque deslizante de la losa se produce como resultado de una falla de corte lateral (Mitchell, 1991) cuando:

$$(\sigma_v + d * \gamma) > 2 * \left(\frac{\tau_t}{\sin^2(\beta)} \right) * \left(\frac{d}{L} \right) \quad 2.34$$

Donde:

σ_t = resistencia a la tensión del relleno cementado;

σ_c = esfuerzo horizontal confinado;

w = carga uniforme, la cual incluye el propio peso de la losa;

L = ancho del tajeo;

d = profundidad de la losa:

D. Falla rotacional (Rotational Failure)

El fallamiento por rotación es más probable que ocurra cuando la resistencia al corte en el contacto de la caja techo es demasiado baja, como consecuencia de la mala calidad de la roca de la caja techo o ángulos de bajo buzamiento. La separación se produce posteriormente. Para ángulos de bajo buzamiento, una predicción aproximada se puede hacer al asumir que la falla por tracción de la losa resulta en una separación completa del contacto con la caja techo (es decir, se forma un hueco)

La falla rotacional se desarrolla (Mitchell, 1991) cuando:

$$(\sigma_v + d * \gamma) > \frac{d^2 * \sigma_t}{2 * L * (L - d * \cot(\beta)) * \sin^2(\beta)} \quad 2.35$$

Técnicamente, esta fórmula tiene un factor de seguridad encapsulado de 2,0. Por consiguiente, la fórmula debe ser de la forma:

$$(\sigma_v + d * \gamma) > \frac{d^2 * \sigma_t}{L * (L - d * \cot(\beta)) * \sin^2(\beta)} \quad 2.36$$

2.2.14. Propiedades de la resistencia

La resistencia a la tracción del relleno es crucial en su capacidad para resistir el daño debido a la vibración de una explosión, y para resistir fallas donde se efectúa el rebaje. La resistencia a la tracción del relleno se limita a, y es principalmente una función del contenido de aglutinante. La resistencia al daño por vibración de explosión es una función de resistencia a la tracción dinámica, que se puede aproximar como 5 % a 15 % de resistencia a la compresión no confinada. Arioglu concluyó que la resistencia a la tracción de relleno de áridos cementado se produce en aproximadamente el 15 % de UCS. Smith concluyó que la resistencia a la tracción de relleno de relaves cementados ocurre en aproximadamente el 12 % de UCS.

Yu (no publicado) establece que la resistencia actual de CRF colocado en una mina, será aproximadamente $\frac{2}{3}$ del valor que se obtiene en laboratorio en cilindros de ensayos de concreto estándar de 6 pulgadas de diámetro, pero será aproximadamente el 90 % del valor obtenido a partir de cilindros de 12 pulgadas de diámetro.

Para el análisis de la estabilidad de losas CRF, el estudio realizado por Cáceres (2005), utiliza una resistencia a la tracción de 10 % de UCS. Todas las demás propiedades de resistencia que aplicó se obtuvieron utilizando criterios de resistencia de Mohr-Coulomb.

Las propiedades de resistencia utilizados para calcular los factores de seguridad se obtienen por las ecuaciones analíticas:

$$\text{Cohesión, } c \quad \frac{UCS}{2} * \tan(45 + \frac{\phi}{2}) \quad 2.37$$

$$\text{Resistencia a la tensión, } \sigma_t \quad \frac{UCS}{10} \quad 2.38$$

$$\text{Resistencia al corte, } \tau_t \quad c + \sigma_n * \tan(\phi) \quad 2.39$$

$$\text{Resistencia normal, } \sigma_n \quad \frac{1}{2} * K_a * \gamma * d^2 * \sin(\beta) \quad 2.40$$

2.2.15. Método gráfico de diseño empírico de estabilidad

El Método Gráfico de Estabilidad para el diseño de tajeos abiertos fue propuesto inicialmente por Mathews y

otros (1981), que se muestra en la figura 21, y posteriormente modificado por Potvin (1998), utilizando 242 casos históricos (176 sin soporte, 66 con soporte) y mediante la redefinición de algunos de los factores de ajuste. El resultado fue el número estabilidad modificado N'. La influencia del soporte con perno de cable fue reexaminado por Potvin (1998), que se muestra en la figura 22, y Nickson (1992), figura 23, para llegar al Gráfico de Estabilidad modificado. La estabilidad se evaluó cualitativamente como ser: estable, potencialmente inestable, o derrumbado.

Una investigación en la Universidad de Columbia Británica cuantificó el grado de desprendimiento por la introducción del término Equivalente Lineal de Sobre excavación/desprendimiento o "Equivalent Linear Overbreak/Slough," ELOS, como se muestra en la figura 24. La estimación empírica de desprendimiento de pared emplea:

- Número de estabilidad N (o N' , modificado); y
- RMR ajustado con respecto al Radio Hidráulico (Clark, 1998).

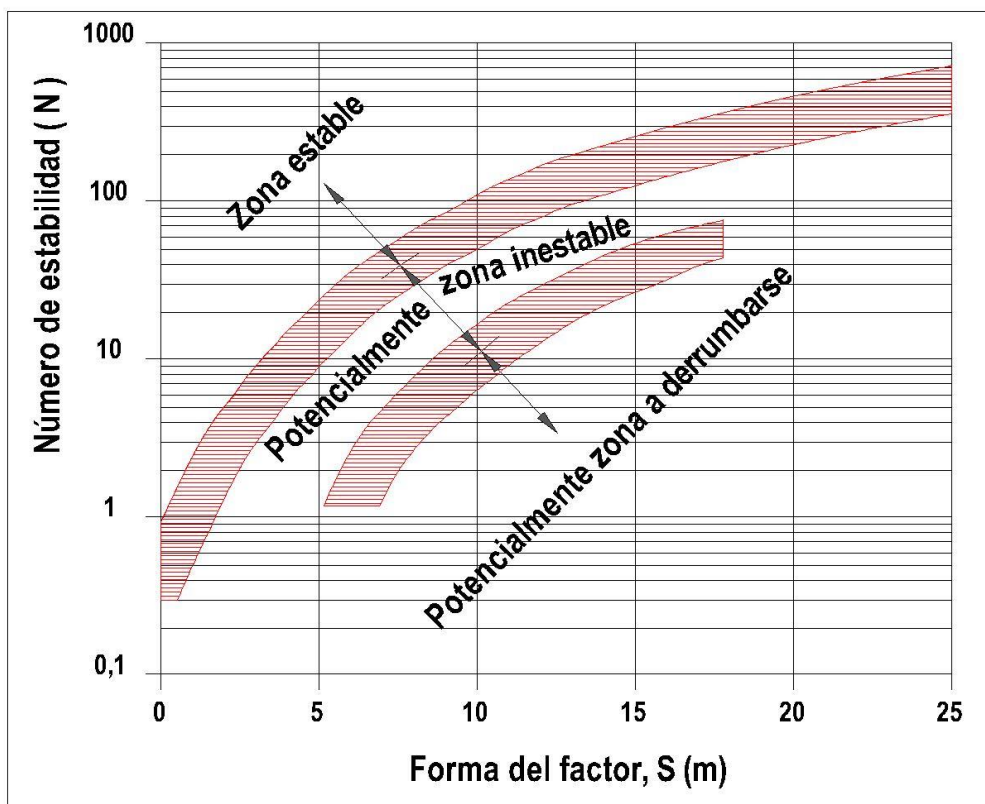


Figura 23. Gráfico de estabilidad de Mathews

Fuente: Mathews y otros, 1981

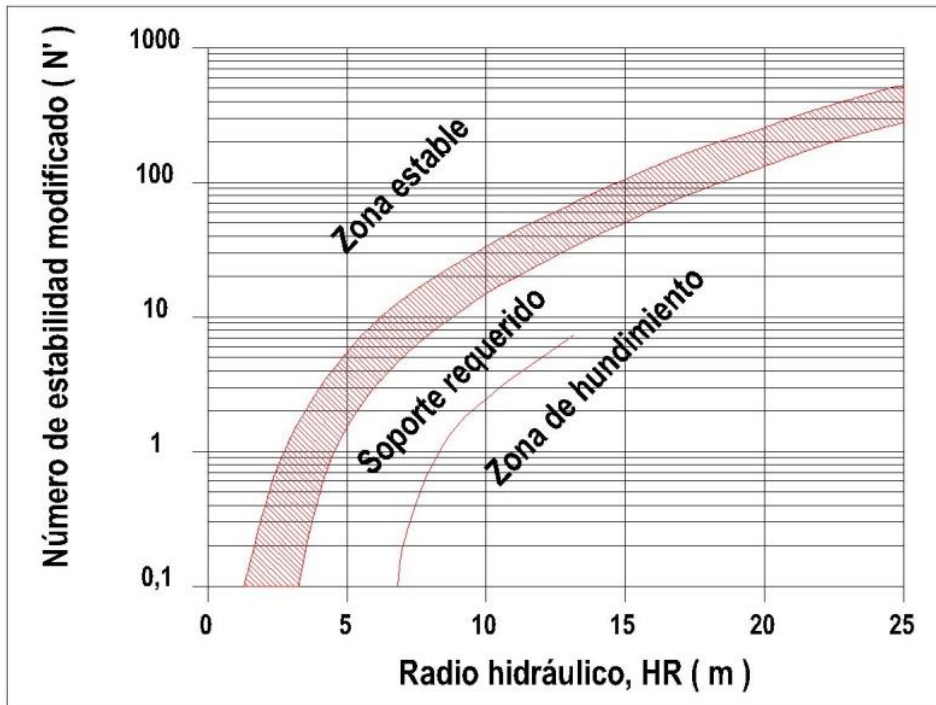


Figura 24. Gráfica de estabilidad modificada.
Fuente: Potvin y Milne, 1992.

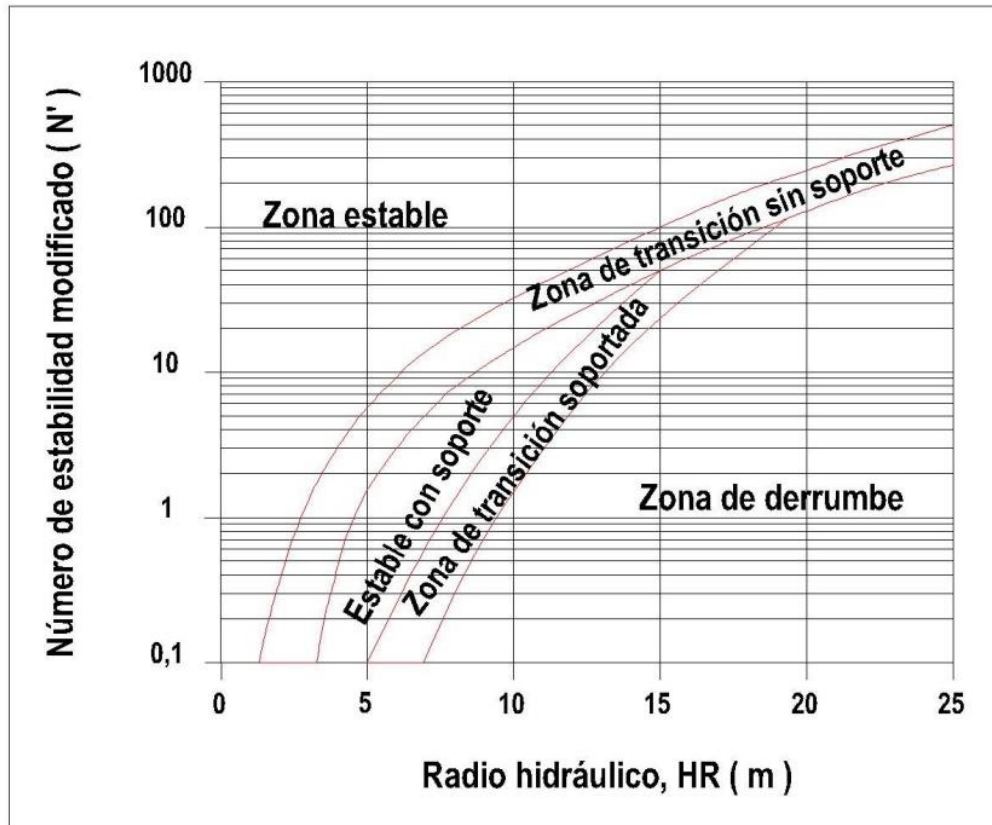


Figura 25. Gráfica de estabilidad modificada con soporte.
Fuente: Nickon, 1992.

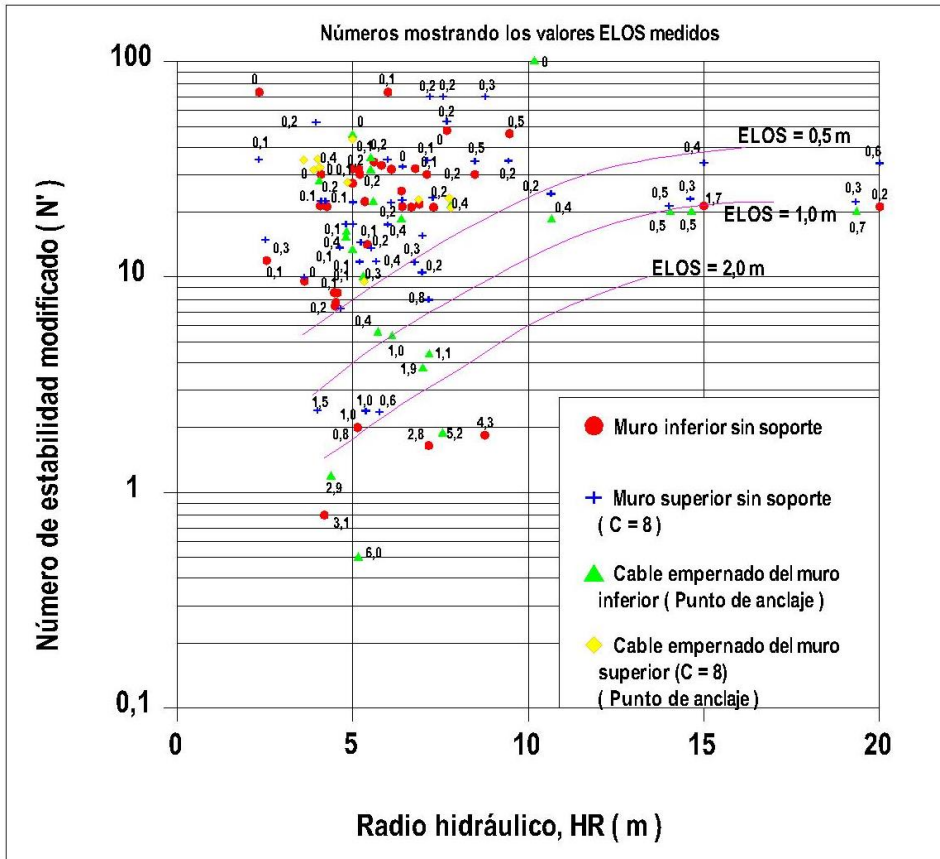


Figura 26. Método de diseño por dilución ELOS.
 Fuente: Clark, 1998.

2.3. Definición de términos

- Relleno de roca: El enrocado se puede agrupar en tipos de material no consolidado y consolidado. Este último comprende mezclas aglutinadas que alcanzan la resistencia requerida para un propósito dado.
- Falla rotacional: Es más probable que ocurra cuando la resistencia al corte en el contacto de la caja techo es demasiado baja, como consecuencia de la mala calidad de la roca de la caja techo o ángulos de bajo buzamiento.
- Falla por deslizamiento: De equilibrio, el bloque deslizante de la losa se produce como resultado de una falla de corte lateral (Mitchell, 1991).
- Falla por flexión: Una losa ancha y delgada es susceptible de fallar a la flexión debido a la relativamente baja resistencia a la tracción del material de relleno cementado.
- Falla por hundimiento: si se supone que el hundimiento se extiende hasta la altura de un arco estable $L/2$ (para un arco semicircular), todas las losas no reforzadas formarían una profundidad, $d > L/2$.

- Losas de concreto: Las losas son de 3,50 m de altura y se deja un espaciamiento de 1,0 m con respecto a la losa inmediatamente superior, el largo de las losas es de 200 m y los anchos pueden ser variables.
- Tabiques: Los encofrados de cada panel de losa son contruidos usando tablonos de madera.
- Enmallado de acero: se realiza el armado de las mallas de acero según corresponda el ancho del paño.
- Omegas: Son varillas de fierro corrugado en forma de Ω que son instaladas verticalmente en el piso del tajeo a rellenar y que permiten amarrar la malla electrosoldada con el nivel de enfierrado.
- Zetas: Son varillas de fierro corrugado de 1,90 cm (3/4") de diámetro y de 3 m de longitud doblados a 0,5 m en sus extremos y que son instalados verticalmente y amarrados a la estructura de fierro.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Diseño metodológico de la investigación

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Dado que el objetivo de la tesis implica una innovación tecnológica que supone el uso de resultados producidos por laboratorios especializados, se trata de un estudio descriptivo analítico.

3.2. Población y muestra de estudio

Población

Mezclas de materiales de: cancha de relaves, agregados de canteras, agua y cemento Portland; utilizados en la construcción de losas de relleno cementado para el sostenimiento de los tajeos del método de explotación por corte y relleno descendente, aplicado en la U.P. Andaychagua

Muestra

Mezclas de materiales típicos dosificados con el fin de elaborar probetas para su evaluación en laboratorio, cuyo rendimiento se exprese dentro del rango de diseño, 4 y 8 Megapascales.

3.3. Operacionalización de variables

Los datos de resistencia de losa fueron obtenidos durante la rotura de muestras mediante una prensa hidráulica, esto sirvió para determinar las resistencias requeridas sean las que se piden de acuerdo al diseño de mezcla.

3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

Las técnicas y métodos a aplicarse son:

- Evaluación cualitativa preliminar de los diferentes materiales suministrados para definir su uso en la elaboración del diseño de mezclas.
- Determinación de las características físicas y granulométricas de los materiales suministrados, para el efecto, se efectuaron mezclas de prueba, cuyo resumen

de caracterización numérica en cuanto a tamaño máximo nominal, módulo de fineza total, absorción y contenido de superfinos se pueden apreciar en la Tabla N°1.

Tabla 18
Caracterización numérica de materiales de mezcla

MATERIAL	MÓDULO DE FINEZA TOTAL	ABSORCIÓN (%)	MATERIAL PASANTE DEL TAMIZ N° 200 (%)	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL
Relave Piedra # 67	-	1,01%	22,70%	-
Planta Piedra # 89	6,83	1,43%	3,06%	1"
Planta	4,89	1,70%	8,91%	1/2"

Fuente: Elaboración propia

- Obtención de diseños de mezcla con resistencias de 4 Mpa y 8 Mpa a los 28 días, las combinaciones de agregados siguientes:
 - Cemento Andino Tipo I + Relave
 - Cemento Andino Tipo I + Relave + Agregado chancado en planta Huso #67
 - Cemento Andino Tipo I + Relave + Agregado chancado en planta Huso #89
- Aplicación de aditivos que provean la reología necesaria

para el transporte eficiente en la longitud indicada, manteniendo la trabajabilidad el tiempo necesario para que llegue al extremo y se pueda colocar adecuadamente, evitándose simultáneamente los atoros en la línea.

- Se estableció emplear en las pruebas un contenido de cemento de 260 kg/m^3 para la resistencia de 8 MPa, y 220 kg/m^3 para la resistencia de 4MPa, utilizando las combinaciones de agregados definidas en un acápite anterior, para luego optimizarlos en función de los resultados de ensayos a compresión.
- Muestreo en planta de relleno cementado
- Muestreo en el tajeo, y
- Ensayos de Resistencia a la compresión uniaxial

Recolección de datos:

La prensa de resistencia a la compresión uniaxial, presenta sus lecturas en Megapascales por medio de un dial analógico, los datos son procesados en Excel para obtener, a partir de una base de datos, las resistencias a la compresión uniaxial.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Las técnicas de procesamiento y análisis de los datos, aplicados son de estadística descriptiva, en la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial de las probetas asociadas a los diseños de mezclas. No se requieren establecer niveles de significación probabilística.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

El objetivo general de la presente tesis consiste en encontrar el diseño óptimo de mezcla para construir las losas de relleno cementado, adecuado para la aplicación del método de corte y relleno descendente en la U.P. Andaychagua. Para el efecto, se analizó y modifíco la cantidad de materiales constituidos por cemento, piedra chancada y confitillo, que se utilizan en la preparación de la mezcla.

La mejora se alcanza a partir de un mejor conocimiento del macizo rocoso y la aplicación de la metodología prueba-error, principalmente en la preparación de las mezclas, para alcanzar las resistencias a la compresión uniaxial para un factor de seguridad adecuado, que satisfaga los requerimientos de la normatividad vigente, así como la disminución de los costos unitarios asociados a la construcción de las losas de relleno cementado.

4.1.1. Diseño estructural de la losa optimizada

Considerando que el ancho de minado máximo será de 6 m, se ha realizado un análisis de estabilidad de la losa con diferentes resistencias, aplicando las ecuaciones del párrafo 2.2.13, para estimar los factores de seguridad de los diferentes tipos de fallas: por flexión, deslizamiento y desplome (ver la Tabla 19.).

Tabla 19
Factores de seguridad de la losa de 6 metros de ancho de minado.

Ancho de losa o ancho de minado	Resistencia de losa (MPa)	Falla por flexión	Falla por deslizamiento de interface Losa-Roca	Falla por desplome	Falla Rotacional
6 m	8	5,8	2,7	10,1	No aplica
6 m	4	3,4	2,7	5,0	No aplica
6 m	2	2,3	2,7	2,5	No aplica

Fuente: Elaboración propia.

En los resultados obtenidos se puede apreciar que tanto para 8 MPa como para 4 MPa, la losa tiene factores de seguridad conservadores, que pueden garantizar la estabilidad de los tajeos. Si bien para 2 MPa, el factor de seguridad sale por encima de la unidad, esto deberá ser evaluado en un siguiente

estudio a mayor detalle previa implementación de las resistencias de 8 y 4 MPa y monitoreo de la instrumentación recomendada.

4.1.2. Diseño de mezcla para la losa optimizada

Para tener una estimación referencial del diseño de mezcla para alcanzar resistencias de 4 y 8 MPa, se realizó tres combinaciones con el uso de material existente en la operación. Los mismos que son descritos a continuación:

- Cemento Andino Tipo I + Relave
- Cemento Andino Tipo I + Relave + Agregado chancado en planta Huso #67
- Cemento Andino Tipo I + Relave + Agregado chancado en planta Huso #89

Con los materiales especificados se efectuaron un total de seis muestras de prueba con contenidos variados de cemento, tipo de material y dosis de aditivos para lograr la resistencia a la compresión de 4 y 8 MPa, respectivamente. Los periodos en que fueron ensayadas las probetas en cada uno de los casos, fueron

a los 3, 7 y 28 días. Los aditivos recomendados para la optimización de la mezcla son los que se indican en la Tabla 20.

Tabla 20
Aditivos de mezcla recomendados

Aditivos Actuales		Aditivos Nuevos	
Nomenclatura	Función	Nomenclatura	Función
EUCO WASH OUT	Inhibidor de Hidratación	EUCO WR 75	Reducción de agua y mantenimiento de trabajabilidad
EUCO 537	Superplastificante	EUCO 537	Superplastificante

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 21 muestra los diseños de muestras de prueba y en ella se observa que en lo que se refiere a las mezclas con solo relave se requiere contenidos de cemento y aditivos superiores a los empleados en las pruebas, para lograr las resistencias especificadas, implicando por lo tanto, un mayor costo.

Tabla 21
Diseños de mezclas de prueba con relave y agregado grueso

Identificación de los materiales		Diseño para f'c de 4 MPa			Diseño para f'c de 8 MPa		
Materiales	Unidades	Diseño c/Relave	Diseño c/Relave y #67	Diseño c/Relave y #89	Diseño c/Relave	Diseño c/Relave y #67	Diseño c/Relave y #89
Cemento Tipo I - Andino	kg/m ³	220	220	220	260	260	260
Agua - Red pública	kg/m ³	397	302	308	379	328	336
Relave - Andaychagua	kg/m ³	1492	921	842	1505	861	783
Piedra huso 67 (chancada en planta) - Andaychagua	kg/m ³	0,00	785	0,00	0,00	734	0,00
Piedra 89 (chancada en planta) - Andaychagua	kg/m ³	0,00	0,00	842	0,00	0,00	784
Euco 537	kg/m ³	4,40	3,96	3,96	5,20	4,68	4,68
Euco WR 75	kg/m ³	0,22	0,22	0,22	0,26	0,26	0,26
Relación a/c	-	1,80	1,37	1,40	1,46	1,26	1,29

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22
Resistencia a la compresión calculada

Días	Curado Unidades	Diseño para f'c de 4 MPa			Diseño para f'c de 8 MPa		
		Diseño c/Relave	Diseño c/Relave y #67	Diseño c/Relave y #89	Diseño c/Relave	Diseño c/Relave y #67	Diseño c/Relave y #89
3	kg/m ²	12	45	42	33	71	56
7	kg/m ²	24	68	67	55	108	82
28	kg/m ²	33	95	93	75	133	112

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 22 que muestra los resultados obtenidos como consecuencia de los ensayos a la resistencia a la compresión, aplicados a las muestras elaboradas para cada uno de los diseños de mezclas; se observa que los resultados para el diseño de 4 MPa elaborado con relaves y agregados #67 y #89, alcanzan el 100 % de la resistencia a los 3 días y a los 28 días superan el doble de la resistencia especificada.

Se puede estimar que, desde el punto de vista del contenido de cemento, dichas mezclas, serán más rentables.

Tabla 23
Diseños de mezcla optimizados

Identificación de los materiales		Diseño para f'c de 4 MPa			Diseño para f'c de 8 MPa		
Materiales	Unidades	Diseño c/Relave	Diseño c/Relave y #67	Diseño c/Relave y #89	Diseño c/Relave	Diseño c/Relave y #67	Diseño c/Relave y #89
Cemento Tipo I - Andino	kg/m ³	240	200	210	280	220	230
Agua - Red pública	kg/m ³	397	302	308	379	302	308
Relave - Andaychagua	kg/m ³	1492	931	852	1485	921	837
Piedra huso 67 (chancada en planta) - Andaychagua	kg/m ³	0,00	795	0,00	0,00	785	0,00
Piedra 89 (chancada en planta) - Andaychagua	kg/m ³	0,00	0,00	847	0,00	0,00	837
Euco 537	kg/m ³	4,40	3,96	3,96	5,0	4,8	4,68
Euco WR 75	kg/m ³	0,22	0,22	0,22	0,26	0,26	0,26
Relación a/c	-	1,80	1,37	1,40	1,46	1,26	1,29

Fuente:

Elaboración

propia

Tabla 24
Resistencia a la compresión proyectada

Curado		Diseño para $f'c$ de 4 MPa			Diseño para $f'c$ de 8 MPa		
Días	Unidades	Diseño c/Relave	Diseño c/Relave y #67	Diseño c/Relave y #89	Diseño c/Relave	Diseño c/Relave y #67	Diseño c/Relave y #89
3	kg/m ²	24	24	24	45	45	45
7	kg/m ²	37	37	37	68	68	68
28	kg/m ²	55	55	55	95	95	95

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Estandarización del diseño de mezcla

Sobre la base de los resultados obtenidos, en la Tabla 23, se han proyectado los diseños de mezcla optimizados para su empleo en la planta de relleno cementado y en la Tabla 24, se muestran las resistencias proyectadas considerando un sobre diseño de 1,5 MPa sobre las especificadas a 28 días para compensar las dispersiones en producción y las diferencias entre las condiciones de laboratorio y tajeos.

El ajuste final de los diseños de mezcla deberá realizarse sobre la base de ensayos realizados durante la producción.

4.1.4. Costo de relleno cementado optimizado

Se ha realizado la determinación de los costos unitarios de relleno cementado para 2 de los 6 diseños propuestos.

Tabla 25
Costo de materiales para relleno de 8 MPa

Detalle	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo US\$/m ³
Cemento	kg	0,12	220	26,40
Piedra	kg	5,28	785	2,64
Confitillo	kg	5,28	0	0,00
Relave	kg	1,61	921	0,96
EUCO 537	kg	1,23	3	3,31
EUCO WR 75	kg	2,14	0,3	0,58
Total				
Chancado				33,88

Fuente: Elaboración propia

Dado que los diseños de mezclas optimizadas implican solamente una variación en los contenidos de los materiales (básicamente, cemento y agregados), la Tabla 25 muestra el costo unitario de los materiales de chancadora para la mezcla de relave con piedra #67 con una resistencia a la compresión de 8 MPa, con un valor de 33,88 US\$/m³; los otros elementos del costo unitario tienen valores similares a los estimados en las Tablas 12 a 14 del capítulo anterior, los mismos que se incluyen

en la Tabla 26 que muestra el costo total unitario de 77,83 US\$/m³ de relleno cementado.

Tabla 26
Costo total unitario de relleno cementado de 8 MPa

Detalle	Costo US\$/m ³
Total chancado	33,88
Total madera y fierro	29,77
Total tuberías	4,18
Total mantenimiento	10,00
Costo total de relleno cementado con material de chancadora	77,83

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 27 muestra el costo unitario de los materiales de chancadora para la mezcla de relave con piedra #67 con una resistencia a la compresión de 4 MPa, con un valor de 32,00 US\$/m³.

Tabla 27
Costo de materiales para relleno de 4 MPa

Detalle	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo US\$/m³
Cemento	kg	0,12	200	24,00
Piedra	kg	5,28	795	2,67
Confitillo	kg	5,28	0	0,00
Relave	kg	1,61	931	0,97
EUCO 537	kg	1,23	3,6	3,97
EUCO WR 75	kg	2,14	0,2	0,39
Total Chancado				32,00

Fuente: Elaboración propia

Igualmente al caso anterior, los otros elementos del costo unitario tienen valores similares a los estimados en las Tablas 12 a 14 del capítulo anterior, los mismos que se incluyen en la Tabla 28 que muestra el costo total unitario de 75,95 US\$/m³ de relleno cementado.

Tabla 28
Costo total unitario de relleno cementado de 4 MPa

Detalle	Costo US\$/m ³
Total chancado	32,00
Total madera y fierro	29,77
Total tuberías	4,18
Total mantenimiento	10,00
Costo Total de Relleno Cementado / m³ con material de chancadora	75,95

Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Implementación del tajeo piloto

En atención a los parámetros fijados a nivel de laboratorio, estos se aplicaron en la construcción de una losa de relleno cementado en el Nivel 1150, acceso 423, tajo 400.

La losa mencionada, aplicando el diseño con cemento, relave y piedra #67, para una resistencia a la compresión de 8 MPa, tiene las siguientes dimensiones: 14 metros de largo, 4,5 metros de ancho de minado (span) y 3,5 metros de altura (dejando un espacio de 1 metros de altura entre losa actual y losa del corte superior)

Se aplicó el monitoreo según el protocolo estándar consiste en tomar, mediante probetas, tres muestras de la mezcla en el tajeo piloto; luego se aplica el ensayo a la resistencia a la compresión uniaxial a los 3, 7 y 28 días respectivamente. Los valores obtenidos en estos ensayos varían más o menos 1 %, respecto a los valores de diseño.

4.1.6. Aplicar un diseño mejorado de mezclas para la construcción losas de relleno cementado en los tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua.

Los seis diseños obtenidos a nivel de laboratorio deberán implementarse progresivamente, en función de los controles “in situ” que se tienen que aplicar con el fin de validar dichos resultados.

Operacionalmente, se implementó la construcción de una losa en un tajeo piloto, utilizando la mezcla optimizada de cemento, relave y piedra #67 para una resistencia a la compresión uniaxial de 8 MPa. Dicha implementación ha implicado cambios en lo que se refiere a la resistencia a la

compresión uniaxial misma y al costo unitario por metros cúbico de relleno cementado

El resultado de los cambios se muestra en la Tabla 29 Costos de relleno cementado por metros cúbico, en la que se comparan los costos asociados al relleno cementado con resistencia a la compresión uniaxial de 16 MPa construido con materiales de desmonte de mina chancado, tomados de la Tabla 15, versus los costos asociados al relleno cementado con resistencia a la compresión uniaxial de 8 MPa construido con cemento, relave y piedra #67, tomados de la Tabla 26.

Tabla 29
Costos unitarios de relleno cementado

Costos asociados	RC 16	RC 8
	Mpa	Mpa
	US\$/m ³	US\$/m ³
Total chancado	44,53	33,88
Total madera y fierro	29,77	29,77
Total tuberías	4,18	4,18
Total mantenimiento	10	10
Costo total de relleno cementado	88,48	77,83

Fuente: Elaboración propia

Por comparación de los valores mostrados se aprecia una diferencia en el costo del orden de 10,65 US\$/m³. Considerando una programación de 12 000 m³ de relleno cementado por mes, implica un ahorro de US\$ 123 000.

4.2. Discusión

Los resultados obtenidos en ésta tesis reflejan el nivel de la información disponible durante el periodo de evaluación, la caracterización geomecánica es de gran importancia para la aplicación de los modelos empíricos para la determinación de los criterios de falla y considerando los factores de seguridad para los valores de resistencia a la compresión de diseño, evaluar todas las posibilidades de optimización de las mezclas de materiales disponibles para la fabricación de las losas de relleno cementado. Una importante limitación en el estudio es que la metodología de monitoreo de las losas consiste únicamente en el muestreo con probetas de la mezcla en el tajeo.

Considerando que este proceso sería más efectivo si los ensayos de los esfuerzos “in situ”, se realizaran sobre probetas de testigos de perforación diamantina en los períodos fijados por el

protocolo correspondiente. La implementación del muestreo con perforación diamantina permitiría validar la efectividad del muestreo mediante probetas.

La metodología aplicada en la presente tesis puede ser replicada en operaciones similares de la minería peruana, sobre todo en la coyuntura actual en la que los niveles de los precios de los metales están bajos y es necesario reducir costos para mantener sostenibles las operaciones.

4.3. Comparación de resultados con antecedentes

No es posible comparar los resultados con los antecedentes locales, constituidos por trabajo informes, dado que el objetivo que persiguen es ilustrar sobre los aspectos operacionales de la aplicación de los diversos tipos de relleno.

En el proceso de la investigación se ha aplicado la metodología de Stone (1993), para la optimización de los diseños de mezcla del relleno cementado, que incluye las evaluaciones de laboratorio para la verificación de los parámetros de diseño. Considerando el programa

de pruebas de control de calidad y supervisión del rendimiento para mejorar la fiabilidad del diseño.

Así mismo, utilizando como parámetro principal, los valores de la carga vertical (resistencia a la compresión uniaxial), se ha aplicado la solución analítica de la estabilidad de la losa (propuesta por Mitchell (1991)), para los específicos casos de hundimiento de bloque, falla a la flexión, deslizamiento de bloque y la falla por rotación. Esta última no es aplicable dado que la veta Andaychagua tiene una inclinación o buzamiento de 90 grados centígrados.

Los resultados obtenidos son muy semejantes a los valores que se están aplicando en otras latitudes y se debe continuar con el monitoreo de las otras opciones, diferentes a la mezcla de cemento, relave y piedra #67 para losas de relleno cementadas para anchos de minado de 6 m.

Es imperativo, analizar al detalle la factibilidad de aplicar estos diseños de mezclas que permitan explotar estructuras con anchos de minado superiores a los 6 m, manteniendo valores de resistencia de

losa, en el rango de 4 a 8 MPa e implementar la aplicación de una secuencia de minado por paneleo.

Una de las principales consideraciones a tener en cuenta en el ciclo de minado por paneleo, es mantener un ancho de minado de 6 m como máximo. En el caso de que la veta tenga 8 m de potencia, deberá ser explotado con dos paneles de 4 m de ancho de minado. En el caso de que la veta tenga 15 m de potencia, deberá ser explotado con paneles de 5 m de ancho de minado.

CONCLUSIONES

Los parámetros geomecánicos son imprescindibles para el diseño de la mezcla óptima, sustentando los factores de seguridad para implementar una losa de relleno cementado con una resistencia de 8 MPa, en reemplazo de una losa con una resistencia de 16 MPa.

El diseño de mezcla óptima en tajeos de 6 m de ancho es aplicable al 25 % de la veta Andaychagua.

El valor de la resistencia a la compresión uniaxial de las losas de relleno cementado es una función de la cantidad de cemento utilizada en la mezcla, por lo que el cambio de un relleno con una resistencia de 16 MPa a otro de 8 MPa implica una diferencia en el costo del orden de 10,65 US\$/m³ y considerando una programación de 12 000 m³ de relleno cementado por mes, genera un ahorro de US\$ 123 000.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar los procedimientos para el control de calidad de las losas de relleno cementado con resistencia de 8 MPa, que permita la progresiva implementación de las losas con 4 MPa.

Se recomienda que para potencias mayores a 6 m en la veta Andaychagua se implemente un sistema de paneleo en la construcción de las losas de relleno cementado, de modo que, en el caso de que la veta tenga 8 m de potencia, deberá ser explotado con dos paneles de 4 m de ancho de minado; y en el caso de que la veta tenga 15 m de potencia, deberá ser explotado con paneles de 5 m de ancho de minado.

Implementar la aplicación, en otro tajeo piloto, de un diseño de mezcla de relleno cementado con una resistencia de 4MPa, dado que esta implicará un menor costo unitario y en consecuencia mayor ahorro en su construcción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albarracín Meléndez, Carlos Oswaldo. (2014). APLICACIÓN DEL RELLENO HIDRAÚLICO CEMENTADO EN LA UNIDAD DE PRODUCCIÓN ANDAYCHAGUA COMPAÑÍA MINERA VOLCÁN S.A.A. Trabajo Informe. ESMI. UNJBG.

Barret, J.R., Coulthard, M.A. y Dight, P.M. (1978). Determination off Fill Stability, Mining with Backfill. 12th Canadian Rock mechanic Syposium, CIM Special Volume 19, Sudbury,Ontario. 23-25.

Bishop, A.W. (1958). Test Requirements for Measuring the Coefficient of Earth Pressure at Rest. Proceedings, Brussels Conference on Earth Pressure Problems. Vol 1, 2-14.

Caceres, C. (2005). Effect of Backfill on Longhole Open Stoping, MASc Thesis, Mining Engineering, University of British Columbia, 139pp.

Córdova Rojas, David. (2010). EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MINADO MINA ANDAYCHAGUA. Informe Técnico. DCR Ingenieros S.R.L.

Huamán Montes, Lázaro Wilder. (2007). Aplicación de Relleno Hidráulico en la Mina Jimena de Compañía minera Poderosa S.A. Tesis. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima. Perú.

Jaky, J. (1944). The Coefficient of Earth Pressure at Rest. Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers. 355-358

Jenks, W.F. (1951). Triassic and Tertiary stratigraphy near Cero de Pasco, Perú. Geological Society of America Bulletin. 203.

McLaughlin. (1925). Geology and physiography of the peruvian cordillera Departamentos of Junin and Lima. Geological Society of America Bulletin. 591-632.

Mah S., (1997). Quantification and Prediction of Wall Slough in Open Stope Mining Methods. MSc Tesis, University of British Columbia, 290.

Mathews K.E., Hoek, E., Wylie, D. y Stewart. (1981). Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000 m in hard rock. CANMET, DSS Serial N° 0SQsq80-00081.

Mato Céspedes, Orlando. (2001). OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE MINADO EN ANDAYCHAGUA. Mina Andaychagua. Volcan Cia. Minera S.A.A.

Mitchell, R.J., (1991). Sill Mat Evaluation Using Centrifuge Models. Mining Science and Technology, Elsevier Science Publisher B.V., 13: pp. 301-313.

Nantel, J.H. (1998). Recent Development and trends in Backfill Practices in Canada. Australian Institute of Mining and Metallurgy Symposium on Mining with Backfill. Brisbane, Australia.

Nickson, S. (1992). Cable support guidelines for underground hard rock mine operations. MASC Thesis, University of British Columbia. 223.

Palkanis, R. y otros. (2005). Design Spans – Underhand Cut and Fill Mining. 107th CIM-AGM Toronto, April. 1-5.

Palkanis, R. y otros. (2014). Underhand Cut and Fill Mining as Practiced in Three Deep Hard Rock Mines in the United States. National Institute for Occupational Safety and Health. 2.

Potvin y Milne. (1992). Empirical Open Stope Design in Canada. PhD Thesis. Faculty of Graduate Studies, Department of Mining and mineral Process Engineering.

TERZAGHI, K., PECK,R.B., y MESRI.,G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley and Sons, New York, 549pp.

Toledo Garay, Fernando Enrique. (2006). REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN MINA CON LA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS EN EL SUBSUELO. Tesis de Maestría. Unidad de Post-grado. FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. UNMSM.

Tschebotarioff, G.P. (1973). Foundations: retaining and earth structures: the art of design and construction and its scientific basis in soil mechanics. New York: McGraw-Hill.

Souza, E. De, Archibald, J.F., y Dirige, A.P. (2003). Economics and Perspectives of Underground Backfill Practices in Canadian Mines. 105th AGM-CIM, Montreal, 15pp.

Stone, D.M.R. (1993). The Optimization of Mix Designs for Cemented Rockfill. Minefill 93. SA IMM, Johannesburg, pp. 249-253.

Vivar Montañez, Aquiles. (2014). OPTIMIZACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOSAS DE RELLENO CEMENTADO EN ANDAYCHAGUA, VOLCÁN CÍA. MINERA S.A.A. 10º CONGRESO NACIONAL DE MINERÍA. 1-44.

Wilson, J.J. (1963). Cretaceous stratigraphic off Central Andes of Peru. AAPG Bulletin. 47 (1): 1-34.

ANEXO

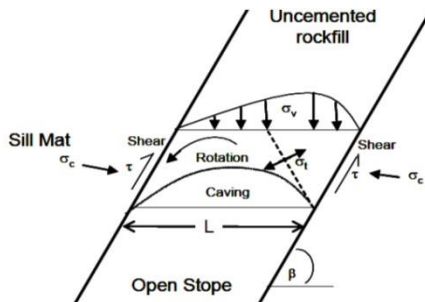
LOSA EN CONDICIÓN ACTUAL (18 M ANCHO)

Datos

14% cemento	
UCS estimado 28 días	16 MPa
Sigma t	1.6 MPa
Densidad Losa	23.54 kN/m ³
Densidad Roca	27.37 kN/m ³
L	18 m
D	3.5 m

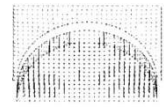
NOTA: No considera efecto de las varillas de acero cementado

CAVING FAILURE-ACTUAL 15 M



- L = Span of the stope
- γ = Rockfill's unit weight
- σ_t = Tensile strength of the cemented sill
- d = Thickness of sill
- σ_c = Horizontal confinement (assumed zero - conservative)
- σ_v = Vertical stress due loading above sill mat
- T_r = Shear strength along fill/wall contact
- β = Stope dip angle

Caving Failure



$$L \cdot \gamma > 8 \cdot \sigma_t / \pi$$

Se tendra caving cuando se cumpla la siguiente re lacion

$$L \cdot \gamma > 8 \cdot \sigma_t / \pi$$

L	=	18 m
γ	=	23.5 kN/m ³
σ_t	=	1.6 MPa

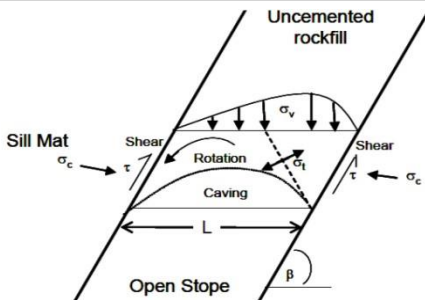
Reemplazando

$$423792 \text{ Pa} > 4076433 \text{ Pa}$$

F.S.= 9.6

No se cumple la relacion por lo tanto falla por caving no ocurrira

FLEXURAL FAILURE-ACTUAL 15 M



- L = Span of the stope
- γ = Rockfill's unit weight
- σ_t = Tensile strength of the cemented sill
- d = Thickness of sill
- σ_c = Horizontal confinement (assumed zero - conservative)
- σ_v = Vertical stress due loading above sill mat
- T_r = Shear strength along fill/wall contact
- β = Stope dip angle

Flexural Failure



$$\left(\frac{L}{d}\right)^2 > \frac{2 \cdot (\sigma_t + \sigma_c)}{\sigma_v + d \cdot \gamma}$$

Se tendra Flexural Failure cuando se cumpla la siguiente relación

$$\left(\frac{L}{d}\right)^2 > \frac{2 \cdot (\sigma_t + \sigma_c)}{\sigma_v + d \cdot \gamma}$$

L	=	18 m
γ	=	23.5 kN/m ³
σ_t	=	1.6 MPa
d	=	3.5 m
σ_v	=	0 No hay carga encima de la losa
σ_c	=	0 Carga de confinamiento conservador

Reemplazando

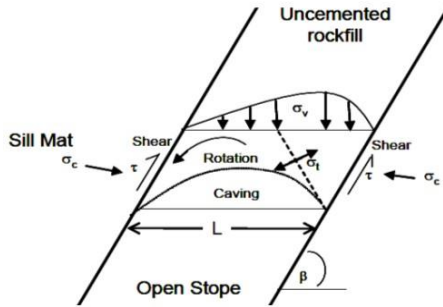
$$26.45 > 38.83$$

F.S.= 1.5

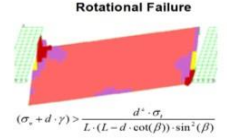
No se cumple la relación por lo tanto falla por flexión no ocurrirá

LOSA EN CONDICIÓN ACTUAL (18 M ANCHO)

ROTATIONAL FAILURE-ACTUAL 15 M



- L = Span of the slope
- γ = Rockfill's unit weight
- σ_t = Tensile strength of the cemented sill
- d = Thickness of sill
- σ_c = Horizontal confinement (assumed zero – conservative)
- σ_v = Vertical stress due loading above sill mat
- τ_t = Shear strength along fill/wall contact
- β = Slope dip angle



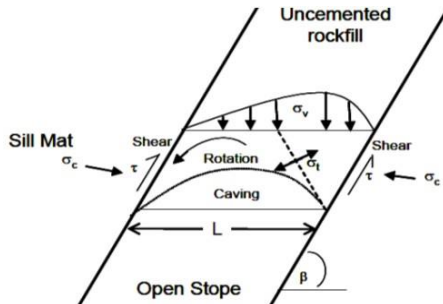
Se tendra Rotational Failure cuando se cumpla la siguiente relacion

$$(\sigma_v + d \cdot \gamma) > \frac{d^2 \cdot \sigma_t}{L \cdot (L - d \cdot \cot(\beta)) \cdot \sin^2(\beta)}$$

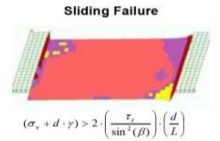
- L =
- γ =
- σ_t =
- d =
- σ_v =
- σ_c =
- β =

NO APLICA

SLIDING FAILURE-ACTUAL 15 M



- L = Span of the slope
- γ = Rockfill's unit weight
- σ_t = Tensile strength of the cemented sill
- d = Thickness of sill
- σ_c = Horizontal confinement (assumed zero – conservative)
- σ_v = Vertical stress due loading above sill mat
- τ_t = Shear strength along fill/wall contact
- β = Slope dip angle



Se tendra Sliding Failure cuando se cumpla la siguiente relacion

$$(\sigma_v + d \cdot \gamma) > 2 \cdot \left(\frac{\tau_t}{\sin^2(\beta)} \right) \cdot \left(\frac{d}{L} \right)$$

$$\tau = \sigma \tan(\phi) + c$$

$$\sigma^1 = \sigma_c = 0.5$$

$$(\phi) = 28 \text{ GRADOS}$$

$$c = 0.013 \text{ MPa}$$

$$\tau_t = 0.38 \text{ MPa}$$

- τ_t = 0.38 MPa
- L = 18 m
- γ = 23.5 kN/m3
- σ_t = 1.6 MPa
- d = 3.5 m
- σ_v = 0 No hay carga encima de la losa
- σ_c = 0.5 Carga de confinamiento conservador
- β = 90°

$$0.08 \text{ MPa} > 0.15 \text{ MPa} \quad \text{F.S.} = 1.8$$

No se cumple la relación por lo tanto falla por deslizamiento no ocurrirá

ANEXO

ENSAYO GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS

NTP : 400-012
ASTM C-136 – 95a

DEFINICIÓN: Este ensayo se realiza para determinar la distribución granulométrica de los agregados, en el agregado fino adicionalmente se determina el módulo de fineza que debe estar en un rango de 2.3 a 3.1, este es un valor empírico adimensional que nos determina si el agregado fino es de grano grueso o de grano fino. En el A. grueso determinamos el tamaño máximo, tamaño máximo nominal y el módulo de fineza.

En el hormigón, al igual que en el agregado grueso se determina los mismos valores.

* **TAMAÑO MÁXIMO (T.M.)**.- Se refiere al tamiz de menor dimensión por el cual paso todo el A. grueso. Es la malla inmediata superior al tamaño máximo nominal (T.M.N.).

* **TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL (T.M.N.)**.- Es la malla que produce el primer retenido de la fracción gruesa. Es la malla inmediata inferior del T.M.

A) ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO:

EQUIPOS

- Tamices N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 y el fondo.
- Horno capaz de mantener la temp. 110± 5 °C.
- Una balanza con aprox. a 0.1 gr. con capacidad de por lo menos 2Kg.
- Herramientas varias.

PROCEDIMIENTO

- Cuarteo del A. fino:

El A. fino para ser cuarteado tiene que tener cierta humedad, de tal forma que la muestra este cohesiva y evite la segregación de los A. gruesos. Obtener una muestra que en estado seco sea mayor de 500gr. (>500).

Tomar el peso inicial seco y tamizar. Determinar el peso retenido por cada malla con aproximación de 0.1gr, determinar los porcentajes retenidos,

porcentajes retenido acumulado, módulo de fineza y dibujar la curva granulométrica con su respectiva especificación.

$$MF = \frac{\sum \% Reten. N^{\circ}4 + \dots + N^{\circ}100}{100}$$

$$MF \Rightarrow 2.3 \text{ a } 3.1 \text{ (rango)}$$

CÁLCULOS

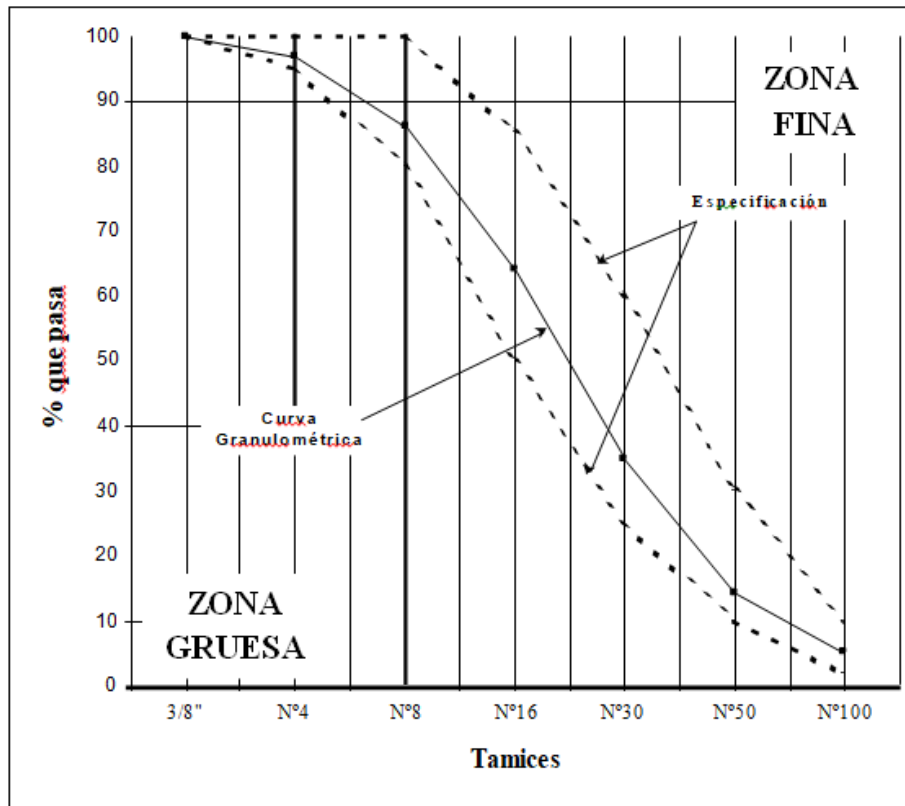
P.I. Seco: 975.4gr.

Malla N°	Peso Retenido (gr.)	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado
4	30.2	3.1	3.1
8	104.8	10.7	13.8
16	215.3	22.1	35.9
30	283.4	29.1	65.0
50	201.4	20.6	85.6
100	90.3	9.3	94.9
Fondo	50.0	5.1	100.0
			M. F. = 2.98

$$M. F. = \frac{3.1 + 13.8 + 38.9 + 65.0 + 85.6 + 94.9}{2.98 \cdot 100}$$

Ejemplo:

Tamiz	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje Retenido Acumulado que Pasa	Especificación
3/8"	-----	-----	100
N°4	3.1	96.9	95 – 100
N°8	13.8	86.2	80 – 100
N°16	39.5	64.1	50 – 85
N°30	65.0	35.0	25 – 60
N°50	85.6	14.4	10 – 30
N°100	94.9	5.1	2 – 10



PROCEDIMIENTO

Si el A. grueso se encuentra húmedo secarlo, hasta un peso constante, si el agregado se encontrara aparentemente seco, se puede utilizar para este ensayo.

Passar una muestra representativa por cuarteo de acuerdo a la siguiente tabla:

T.M.N.	Muestra Mínima (Kg.) (N.T.P.) - (A.S.T.M.)
3/8"	1
1/2"	2
3/4"	5
1"	10
1 1/2"	15
2"	20
2 1/2"	35
3"	60
3 1/2"	100

Ejemplo:

P.I. Seco: 12549gr.

Tamiz	Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Retenido Acumulado que pasa
2 1/2"	----	----	----	----
2"	----	----	----	----
1 1/2"	----	----	----	100.0
1"	1215	9.7	9.7	90.3
3/4"	3520	28.1	37.8	62.2
1/2"	3850	30.7	68.5	31.5
3/8"	2500	19.9	88.4	11.6
N°4	1320	10.5	98.9	1.1
Fondo	144	1.1	100.0	0.0
			T.M.	1 1/2"
			T.M.N	1"

B) ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO

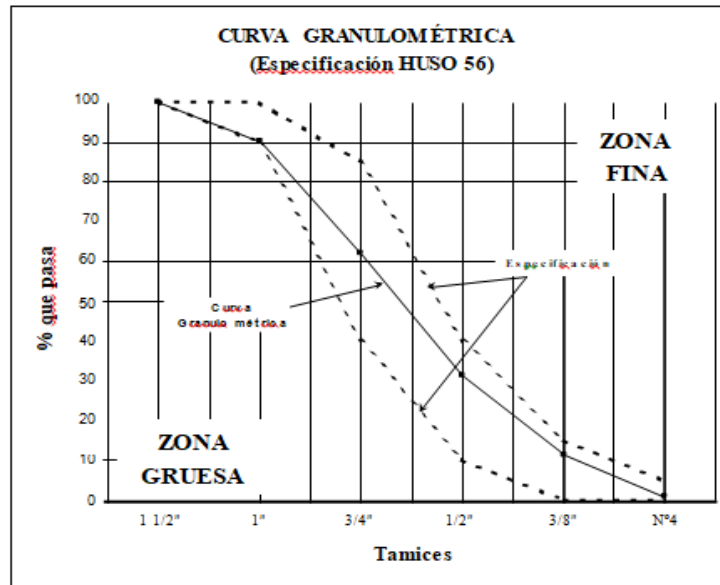
EQUIPOS

- Una balanza con aprox. 0.5gr con cap. de 20Kg.
- Horno (T° 110 ± 5°C)
- Tamices: 2 1/2", 2", 1 1/2", 1" 3/4", 1/2", 3/8", N°4 (N°8, N° 16 opcional).
- Envases y herramientas varias

M. F. = 7.25

ESPECIFICACIÓN HUSO 56

Tamiz	% Ret Acum que pasa
1 1/2"	100
1"	90 – 100
3/4"	40 – 85
1/2"	10 – 40
3/8"	0 – 15
N°4	0 – 5



$$M.F = \frac{\sum \% Reten. Acum. N^{\circ}100 + N^{\circ}50 + N^{\circ}30 + N^{\circ}16 + N^{\circ}8 + N^{\circ}4 + 3/8'' + 3/4'' + 1/2''}{100}$$

1/2"

100

$$M. F. = \frac{100 + 100 + 100 + 100 + 100 + 98.9 + 88.4 + 37.8}{100}$$

GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GLOBAL EQUIPOS

- Balanza con aprox. a 1gr. de por lo menos 20 Kg. de capacidad.
- Horno (T° 110 ± 5°C)
- Mallas: 3", 2 1/2", 2", 1 1/2", 1" 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100.
- Recipientes y herramientas varias.

PROCEDIMIENTO

Obtener una muestra representativa siguiendo los mismos pasos que para el A. grueso, y tamizar por las mallas arriba mencionadas, para determinar luego el T.M.N., T.M. y M.F. y su respectiva curva granulométrica.

- Rango del M.F = 4.80 a 5.20 (Tener en cuenta 2 decimales).

$$M.F. = \frac{\sum \% Reten. Acum. 1/2'' + 3/4'' + 3/8'' + N^{\circ}4 + \dots + N^{\circ}100}{100}$$

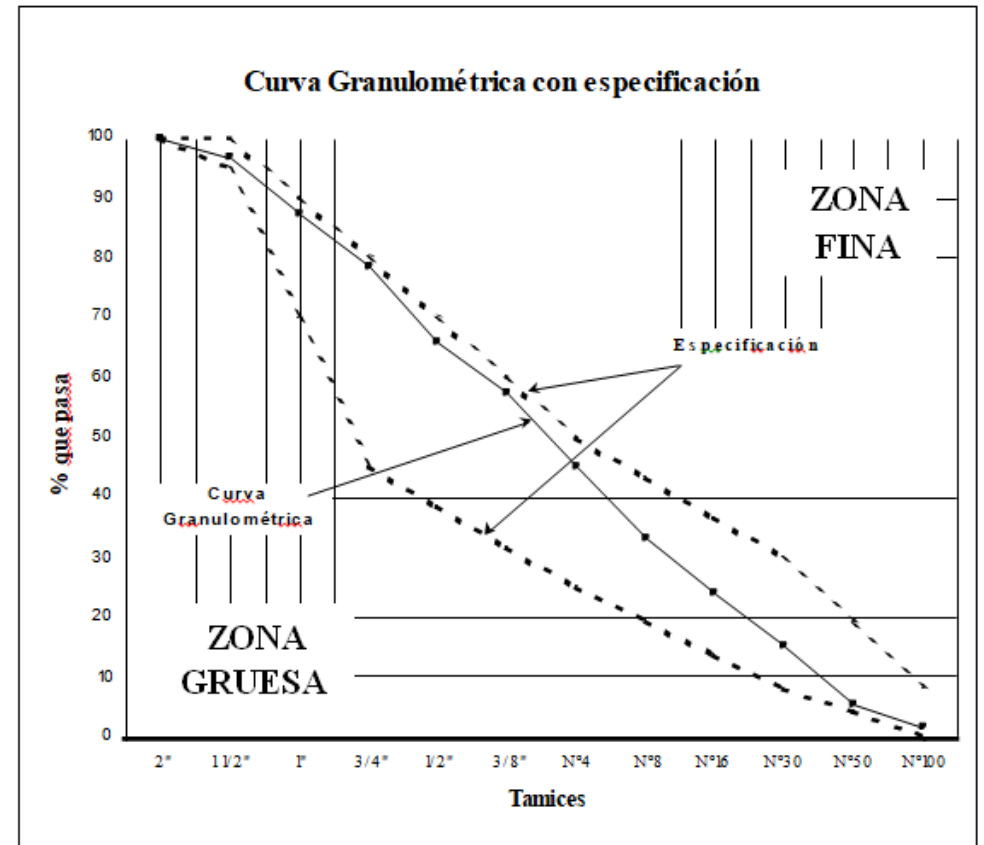
Ejemplo:

P.I. Seco = 20825gr

Tamiz	Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Retenido Acumulado que pasa
3"	----	----	----	----
2 ½"	----	----	----	----
2"	----	----	----	100.0
1 ½"	625	3.0	3.0	97.0
1"	1978	9.5	12.5	87.5
¾"	1833	8.8	21.3	78.7
½"	2666	12.8	34.1	65.9
⅜"	1770	8.5	42.6	57.4
Nº4	2561	12.3	54.9	45.1
Nº8	2499	12.0	66.9	33.1
Nº16	1874	9.0	75.9	24.1
Nº30	1895	9.1	85.0	15.0
Nº50	2020	9.7	94.7	5.3
Nº100	971	3.8	98.5	1.5
Fondo	312	1.5	100.0	----

Especificación

Tamiz	% Ret. Acum. que pasa
2"	100
1 ½"	95 – 100
¾"	45 – 80
Nº4	25 – 50
Nº30	8 – 30
Nº100	0 – 8



MATERIAL MAS FINO QUE PASA LA MALLA N°200

NTP : 400.018
ASTM C – 117

DEFINICIÓN: Este ensayo se realiza para determinar las partículas más finas contenidas en los agregados. Estas partículas en cantidad considerable en los agregados son perjudiciales para el concreto, evita que la pasta se adhiera firmemente con los agregados, interfiriendo en la resistencia del concreto.

EQUIPOS

- Tamiz N° 200
- Horno (T° 110 ± 5°C)
- Balanza con aproximación a 0.1gr para el A. Fino y
- Balanza con aproximación a 1gr para el A. Grueso
- Recipientes varios

PROCEDIMIENTO

- Tomar una muestra por cuarteo y secar en el horno hasta peso constante una cantidad determinada a la siguiente tabla.

Tamaño Máximo	Muestra Mínima (gr.)
N°8	100
N°4	500
3/8"	2000
3/4"	2500
> 1 1/2"	5000

- Tomar el peso inicial seco, transportar la muestra a un envase en la cual pueda ser completamente sumergida, adicionarle agua y remover ligeramente con los dedos para que los finos se suspendan, decantar el agua con los finos en suspensión a la malla N°200. Repetir el procedimiento hasta que el agua esté clara, el material retenido en la malla N°200 transportarlo al recipiente donde se encuentra la otra parte de la muestra y llevarlo al horno hasta peso constante. Retirar del horno y pesar.

CÁLCULOS

$$\% \text{ de finos} = \frac{PIs - PFs}{PIs} \times 100$$

Donde:

PIs : Peso Inicial seco de la muestra (gr.)
PFs : Peso final de la muestra lavada secada al horno (gr.)

EXPRESION DE RESULTADOS:

- Si el porcentaje de finos no excede al 10%, se informa con aproximación a 0.01%.
- Si el porcentaje superara el 10% se informará aproximando al entero más cercano.

PESO UNITARIO DE LOS AGREGADOS

NTP : 400.017
ASTM C – 27

DEFINICIÓN: Es la cantidad de agregado o material que entra en 1m³, incluyendo sus vacíos. En estado suelto o compactado y con diferentes contenidos de humedad. Se expresa en Kg/m³. Para fines de diseño de mezcla, el peso unitario debe estar en condición seca.

EQUIPOS

- Moldes normalizados de 1pie³, 1/2pie³, 1/3pie³ y 1/10pie³.
- Una varilla compactadora de acero liso de 60cm. de longitud, 5/8" de \square y con punta de bala o semiestérica.
- Balanza con capacidad de por lo menos 50Kg. y con aproximación a 50gr.
- Balanza con aproximación a 0.1gr.
- Horno capaz de mantener la temp. 110± 5 °C.
- Herramientas varias.

PROCEDIMIENTO

- Seleccionar el recipiente a usar de acuerdo al T.M. y T.M.N. del material que se desea ensayar, de acuerdo a la siguiente tabla:

T.M.	T.M.N.	Recipiente a Usar (Pie ³)
3/4"	1/2"	1/10
1 1/2"	1"	1/3
2"	1 1/2"	1/2
3 1/2"	3"	1

- * **Peso Unitario Suelto:** El material a ensayar con fines de diseño de mezcla no deberá tener cohesión (debe estar seco o aparentemente seco). Tomas una muestra que represente por lo menos del 125 al 200% del volumen del recipiente a usar. Llenar el molde con el material dejándolo caer libremente a una altura de 2" sobre el borde superior de éste. Llenar en exceso, enrasar y luego pesar. Si el material está aparentemente seco, sacarle contenido de humedad.
- * **Peso Unitario Compactado:** la muestra a ensayar debe estar seca o aparentemente seca y debe carecer de cohesión si es que el ensayo se va a utilizar con fines de diseño. Llenar el envase con tres capas y a cada capa, compactarla, luego enrasar y pesar.

MÉTODOS DE COMPACTACIÓN

- A) **Método de Apisonado o Chuseado:** Este método se utiliza cuando tiene agregados con T.M.N. de 1 1/2" hacia abajo o cuando se usa como máximo el envase de 1/2pie³, consiste en compactar cada capa con 25 chuseadas con la varilla chuseadora, luego se golpea el exterior del molde con una comba de goma para que los agujeros dejados por la varilla se cierren. Cuando se llena la segunda capa, apisonar de tal forma que la varilla penetre 1" aproximadamente a la capa inferior, llenar la tercera capa hasta el exceso del molde y proceder de la misma forma que la segunda capa.
- B) **Método de Percusión:** Este método se utiliza cuando el agregado posee tamaño máximo nominal mayor de 1 1/2" o cuando se usa el recipiente de 1pie³ compactando cada capa con 50 golpes. Cada golpe consiste en levantar un lado del molde a una altura de 5cm. y dejar caer al suelo (25 caídas por lado).

CÁLCULOS

A)
$$P.U. \text{ Aparente} = \frac{\text{Peso del Material}}{\text{Vol. del Recipiente Usado}} = \text{Kg/m}^3$$

$$P.U. \text{ Seco} = \frac{P.U. \text{ Aparente} \times 100}{C.H. + 100}$$

B)
$$P.U. \text{ Aparente} = \text{Peso del Material (Kg.)} \times \text{Constante} = \text{Kg/m}^3$$

$$P.U. \text{ Seco} = \frac{P.U. \text{ Aparente} \times 100}{C.H. + 100}$$

C) Cálculo de la constante

a) **Método Geométrico:**

Para el molde de 1/2pie³

Si 1000000cm³ □ 1m³

Diámetro : 25.4cm

Altura : 27.9cm

Volumen = 14137

$$\text{Contante} = \frac{1000000}{14137} = 70.7 < 71$$

b) **Método Volumétrico:**

Consiste en llenar el recipiente con agua destilada, enrasar con un vidrio, pesar, determinar la temperatura con un termómetro y luego corregir con un factor obteniéndose el volumen del recipiente (cm³) y dividir 1000000 entre el volumen que se obtuvo.

° F	° C	γ _{agua} (gr/cm ³)
60	15.6	0.9990
65	18.3	0.9985
70	21.1	0.9980
73.4	28.0	0.9975
75	23.9	0.9973
80	26.7	0.9966
85	29.4	0.9958

Ejemplo:

Molde de 1/2pie³

Peso del Molde = 5565gr. Peso del Molde +
Agua = 19729 gr. Peso del Agua
= 14164 gr. Temperatura del
Agua = 18° C. Densidad del Agua
= 0.9985gr/cm³

$$\text{Si: Volumen} = \frac{\text{Peso}}{\text{Densidad}}$$
$$\Rightarrow \text{Volumen del Molde} = \frac{14164 \text{ gr.}}{0.9985 \text{ gr/cm}^3} = 14185 \text{ cm}^3$$

$$\text{Constante} = \frac{1000000}{14185} = 70$$

c) *Método Directo.* (Aplicable a moldes normalizados)

$$\frac{1}{1} \times \frac{1}{35.3} = 35.3$$

$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{35.3} = 71$$

$$\frac{1}{3} \times \frac{1}{35.3} = 106$$

$$\frac{1}{10} \times \frac{1}{35.3} = 353$$

PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS

AGREGADO GRUESO : NTP : 400.021 ASTM C-127
AGREGADO FINO : NTP : 400.022 ASTM C-128

DEFINICIÓN: El peso específico también llamado densidad, es la relación del peso del material entre el volumen que ocupa, sin incluir los vacíos, en este ensayo determinamos el peso específico de masa, peso específico saturado con superficie seca y el porcentaje de absorción.

PORCENTAJE DE ABSORCIÓN: Es la cantidad de agua que puede absorber un agregado para llenar sus vacíos, se expresa en porcentaje (%).

PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO EQUIPO

- Una cesta metálica confeccionada con malla N°10, con un recipiente que lo pueda almacenar.
- Una balanza hidrostática con aproximación a 1gr.
- Horno capaz de mantener la temp. 110 ± 5 °C.
- Franela.
- Recipientes varios.

PROCEDIMIENTO

- Tomar aproximadamente 5000gr. de agregado grueso que retenga la malla N°4 y saturarlo por 24 horas.
- Excluir el agua y tomar 3000gr. aproximadamente de agregado saturado con superficie seca (S.S.S.). Esto se obtiene secándolo con ayuda de una franela la superficie de los agregados.
- Sumergir la canastilla metálica en un recipiente lleno de agua a un determinado nivel y que debe estar acoplado la balanza hidrostática. Tomar el peso de la canastilla dentro del agua y adicionar la muestra S.S.S. a la canastilla y pesar.
- Retirar la muestra, colocarlo en un recipiente y llevarlo al horno hasta peso constante.

CÁLCULOS

- Peso específico de masa (gr/cm^3) $A/(B-C)$
- Peso específico saturado con superficie seca (gr/cm^3) $B/(B-C)$
- Peso específico aparente (gr/cm^3) $A/(A-C)$
- Porcentaje de absorción (%) $[(B-A)/A] \times 100$

Donde:

A = Peso de la muestra seca (gr.)

B = Peso de la muestra saturada con superficie seca (gr.)

C = Peso de la muestra dentro del agua (gr.)

Ejemplo:

(1) Peso de la muestra S.S.S. En el aire (g) B	3001
(2) Peso de la canastilla dentro del agua (g)	1563
(3) Peso de la muestra S.S.S. + Peso de la canastilla dentro del agua (g)	3467
(4) Peso de la muestra S.S.S. Dentro del agua (g) (3)-(2) C	1904
(5) Peso de la tara (g)	250
(6) Peso de la tara + Muestra seca (g)	3200
(7) Peso de la Muestra seca (g) (6)-(5) A	2950

Peso Especifico de Masa $A/(B-C)$	2.69 gr/cm^3
Peso Especifico Saturado con Superficie Seca $B/(B-C)$	2.74 gr/cm^3
Peso Especifico Aparente $A/(A-C)$	2.82 gr/cm^3
Porcentaje de Absorción $[(B-A)/A] \times 100$	1.7 %

PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO

- Saturar aproximadamente 2 Kg. de A. Fino por 24 horas.
- Luego decantar el agua y extender el agregado saturado en una superficie no absorbente. Se deja el agregado extendido para que pierda humedad superficial gradualmente, este procedimiento se puede acelerar con ayuda de un ventilador, cuando el agregado ha perdido cierta humedad, se mezcla todo el material y se vuelve a extender asegurando una muestra homogénea. Cuando el agregado se encuentre ya no muy húmedo, se comienza a probar en el cono, introduciéndolo dentro de éste y apisonándolo 25 veces con el pisón normalizado. Limpiar el agregado que se ha precipitado a los costados y levantar el cono en forma vertical. Si no hubiera desmoronamiento se sigue

extendiendo el material y se prueba éste entre lapsos de tiempo de 15 a 30 minutos, hasta que se produzca un desmoronamiento parcial, en este momento se dice que el agregado fino se encuentra en condición saturada con superficie seca, momento en el cual se toma 500 gramos para el ensayo.

Si por el contrario cuando se prueba el material en el cono y se desmorona totalmente, se dice que ya pasó la condición de saturado con superficie seca, en este caso se puede adicionar unos centímetros cúbicos de agua para humedecer la muestra y se coloca en un recipiente herméticamente cerrado por 30 minutos y luego se vuelve a probar en el cono hasta que llegue a la condición de saturado con superficie seca.

- Colocar los 500gr. de agregado S.S.S. en un balón de 500cm^3 de capacidad y de peso conocido.
- Adicionarle un poco de agua hasta saturar la muestra por completo (sin llegar a la marca) y realizar giros circulares con el fin de eliminar todas las burbujas de aire contenido en la muestra. Completar con agua hasta la marca del balón y dejar en reposo por 1 hora o hasta que los finos se asienten, retirar con papel absorbente la espuma que hubiera en la superficie y completar con agua hasta la marca, luego pesar.
- Extraer la muestra y colocarla en un recipiente metálico o tara de peso conocido y llevarlo al horno por 24 horas o hasta peso constante.

CÁLCULOS

- Peso específico de masa (gr/cm^3) $A/(V-W)$
- Peso específico saturado con superficie seca (gr/cm^3) $500/(V-W)$
- Peso específico aparente (gr/cm^3) $A/[(V-W)-(D-A)]$
- Porcentaje de absorción (%) $[(D-A)/A] \times 100$

Donde:

A = Peso de la muestra seca (gr.)

V = Volumen del balón (cm^3)

D = Peso de la muestra saturada con superficie seca (gr.)

W = Peso del agua que se entra en el balón cuando la muestra S.S.S. se encuentra dentro del balón (gr.)

Ejemplo:

(1) Peso de la Muestra S.S.S. (gr.) D	500.0
(2) Peso del Balón seco (gr.)	183.7
(3) Peso de la Muestra S.S.S. + Peso del Balón (1) + (2) (gr.)	683.7
(4) Peso de la Muestra S.S.S. + Peso del Balón + Peso del Agua (gr.)	994.7
(5) Peso del Agua (g) (4)-(3) W	311.0
(6) Peso de la tara (gr.)	107.5
(7) Peso de la tara + Muestra seca (gr.)	600.2
(8) Peso de la Muestra seca (gr.) (7) - (6) A	492.7
(9) Volumen del Balón (cm ³) V	500

Peso Especifico de Masa $A/(V-W)$	2.61 gr/cm ³
Peso Especifico de Masa Saturado con Superficie Seca $D/(V-W)$	2.65 gr/cm ³
Peso Especifico Aparente $A/[(V-W)-(D-A)]$	2.71 gr/cm ³
Porcentaje de Absorción $[(D-A)/A] \times 100$	1.5 %

Nota : Tanto en el agregado grueso, como en el agregado fino, el peso específico se informa con aproximación al 0.01gr/cm³ y el porcentaje de absorción, con aproximación a 0.1 %

CONTENIDO DE HUMEDAD EVAPORABLE EN AGREGADOS POR SECADO

NTP : 339.185
ASTM C-566

OBJETIVO: Determinar el porcentaje total de humedad evaporable en una muestra de agregado fino o grueso por secado.

La humedad evaporable incluye la humedad superficial y la contenida en los poros del agregado, pero no considera el agua que se combina químicamente con los minerales de algunos agregados.

APARATOS

- Balanza con sensibilidad a 0.1gr. para el agregado fino y 1gr. para el agregado grueso
- Recipiente para muestras.

- Fuente de calor: Horno, lámparas caloríficas, horno microondas, cocina eléctrica o a gas.
- Removedor (opcional) de metal

MUESTREO

Se realiza un cuarteo, obteniéndose una muestra representativa protegiéndola contra la pérdida de humedad de acuerdo a la siguiente tabla:

T.M.N.	Masa mínima Kg.
Nº4	0.5
3/8"	1.5
1/2"	2.0
3/4"	3.0
1"	4.0
1 1/2"	6.0

PROCEDIMIENTO

Tomar el peso inicial húmedo de la muestra.

Secar la muestra en el recipiente, por medio del horno, hasta peso constante.

Determinar la masa de la muestra seca.

CÁLCULOS

$$\square \% = \frac{PIh - PFs}{PFs} \times 100$$

Donde:

\square = Contenido de Humedad (%)

PIh = Peso inicial húmedo, en gramos.

PFs = Peso final seco, en gramos.

DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA DE UNA MEZCLA DE CONCRETO FRESCO

NTP : 339.045
ASTM C-143

DEFINICIÓN: Este ensayo se realiza para determinar la consistencia de una mezcla de concreto en estado fresco. La consistencia, no es sinónimo de trabajabilidad, viene a ser la fluidez de la mezcla como consecuencia del agua que contiene.

Esta mezcla es solo aplicable a asentamientos verdaderos. No es aplicable o no tiene importancia en mezclas secas y mezclas fluidas o mezclas que carecen de cohesión.

A este ensayo también se le conoce con los nombres de slump, revenimiento, asentamiento, prueba de ordenamiento.

EQUIPOS

- Un cono de Abrams.
- Una varilla compactadora de 60 cm de longitud, de acero liso, 5/8" de diámetro y con punta semiesférica o de bala.
- Plancha metálica de 1/4" de espesor y con suficiente dimensión para que albergue la base inferior del cono.
- Wincha o regla metálica con aproximación a 1/4".
- Herramientas varias.

PROCEDIMIENTO

- 1) Humedecer el cono internamente con una franela húmeda, así como la base metálica. Ubicar el equipo en una superficie nivelada libre de vibración, fijar el cono en la base inferior, esto se logra pisando las aletas inferiores del cono con la punta de los pies.
- 2) Llenar el molde con concreto fresco en tres capas, aproximadamente de igual volumen, compactar cada capa a razón de 25 golpes con la varilla. Cuando se compacta la primera capa, no se debe llegar a tocar fuertemente la base, luego se procede a llenar la segunda capa y se compacta de tal forma que la varilla penetre 1" en la capa inferior, se llena la última capa en exceso y se procede a compactar, si durante la compactación, la mezcla baja por debajo del nivel superior del cono, se puede hacer una breve parada y adicionar más mezcla y

luego se completa los golpes de tal forma que cuando se termina de compactar, el nivel de la mezcla exceda el volumen del cono. Enrasar la parte superior del cono con ayuda de una plancha de albañil, inmediatamente se procede a limpiar el exterior del cono del concreto fresco que se haya caído. Levantar el cono verticalmente en un tiempo de 5 ± 2 segundos, luego medir el asentamiento de la mezcla con la ayuda de la wincha o regla metálica, en pulgadas generalmente. Se mide el asentamiento en el centro del área superior que se ha quedado deformado. Si la mezcla falla por corte, se repite el ensayo y si vuelve a fallar de nuevo por corte, quiere decir que la mezcla carece de cohesión y el ensayo ya no es aplicable.

Nota: El tiempo máximo que debe transcurrir desde la obtención de la última parte de la muestra y el término del ensayo, no debe ser mayor que 5 minutos.

El tiempo máximo que debe transcurrir desde el inicio del ensayo hasta la finalización de éste, no debe ser mayor de 2 minutos y medio.

Este ensayo también puede ser hecho sobre una superficie no absorbente (concreto pulido).

TIEMPOS DE MEZCLADO DE UNA MUESTRA DE CONCRETO EN LABORATORIO

- 3 Minutos de mezclado
- 3 Minutos de reposo
- 2 Minutos de remezclado

Nota: Se comienza a controlar el tiempo desde que el cemento hace contacto con el agua

SECUENCIA DE CARGA DE LOS MATERIALES A LA MEZCLADORA

(Solo recomendación, no hay norma)

1. Añadir la mitad de agua a la mezcladora.
2. Añadir la totalidad del agregado grueso.
3. Añadir la totalidad del agregado fino.
4. Añadir el cemento y controlar el tiempo.
5. Adicionar la cantidad de agua necesaria restante.

Nota: todo equipo o instrumento en donde se va a preparar concreto fresco o a ensayar, este debe estar húmedo.

DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL CONCRETO FRESCO

NTP : 339.184-2002
ASTM C-1064

DEFINICIÓN: Este ensayo tiene como objeto determinar la temperatura del concreto en estado fresco (la temperatura del concreto es relacionado con la resistencia)

EQUIPOS

- Termómetro blindado con un rango de -5°C a 50°C .
- Recipiente que albergue el concreto de tal forma que cuando se introduce el termómetro, éste quede cubierto con 3" de mezcla en todas direcciones.

PROCEDIMIENTO

- Colocar el concreto en un recipiente e introducir la sonda del termómetro blindado a una profundidad de 3", dejar por 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice y registrar la temperatura con aproximación a $\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$.
- Si la mezcla del concreto tiene agregado grueso con T.M.N $> 3"$, esta muestra debe dejarse por lo menos 20 minutos después del mezclado para que la temperatura de la mezcla se estabilice, luego determinar la temperatura.

Temperaturas Extremas:

- La temperatura de la mezcla de concreto no debe ser menor de 10°C ni mayor de 32°C .
- La temperatura ambiente en el cual se va a vaciar el concreto no debe ser menor de 5°C ni mayor de 28°C .
- Si la temperatura del concreto o del ambiente están fuera de este rango, se deberá tomar las medidas necesarias para evitar complicaciones

PESO UNITARIO DE UNA MEZCLA DE CONCRETO FRESCO

NTP : 339.049
ASTM C-138

DEFINICIÓN: Ensayo se realiza para determinar el peso del concreto fresco que entra en 1m^3 .

EQUIPOS

- Balanza de 20Kg de capacidad con aproximación a 1 gr. (Si se usa un recipiente de $1/4\text{pie}^3$), o de 20Kg de
- Balanza de 50Kg de capacidad con aproximación a 10gr. (Si se usa un recipiente de $1/2\text{pie}^3$);
- Recipiente de $1/2\text{pie}^3$ o $1/4\text{pie}^3$ que tiene un asa metálica, posee a la vez un anillo de $1/4"$ de espesor alrededor del perímetro superior del molde. El material con el que está construido el molde es similar con la que se construye las probetas, es resistente al cemento.
- Varilla compactadora de 60cm de largo, $5/8"$ de diámetro, fierro liso y punta de bala.
- Martillo de goma de 600 \times 200gr.
- Herramientas varias.

PROCEDIMIENTO

- Para fines de cálculo, determinar el volumen del recipiente (m^3) o determinar su constante de acuerdo a la norma A.S.T.M. C-29.
- Colocar el molde en una superficie nivelada y llenar el concreto en 3 capas y compactar cada capa a razón de 25 veces por capa y dándole de 10 a 15 golpes en el exterior del molde con el martillo de goma, luego enrasar y pesar.

Nota: Registrar el peso del molde húmedo antes del ensayo.

CÁLCULOS

$$\text{P.U. Concreto} = \frac{\text{Peso concreto fresco}}{\text{Vol. del Recipiente Usado}} = \text{Kg/m}^3$$

$$\text{P.U. Concreto} = \text{Peso del Material (Kg.)} \times \text{Constante} = \text{Kg/m}^3$$

Ejemplo

$$\text{P.U. Concreto} = 34.3631 \times 70.6 = 2426 \text{Kg/m}^3$$

$$\text{Volumen del Concreto} = \frac{\text{Peso de Tanda(Kg.)}}{\text{P.U. Concreto (Kg/m}^3)} = \text{m}^3$$

Ejemplo de corrección de diseño por peso unitario de concreto Tanda 0.020

		Diseño
C	= 6.800 Kg.	340 Kg/m ³
Agua	= 4.100 Lt.	250 Lt/m ³
A. F.	= 16.820 Kg.	841 Kg/m ³
A. G.	= <u>22.430 Kg.</u>	<u>1122 Kg/m³</u>
	50.150 Kg.	2508 Kg/m ³

$$\text{Volumen del concreto} = \frac{\text{Tanda}}{\text{P.U. Concreto}}$$

$$\text{P. U. Concreto} = 2435 \text{Kg/m}^3$$

$$\text{Volumen del concreto} = \frac{50.15 \text{Kg}}{2435} = 0.0206 \text{m}^3$$

Preparado

$$\text{Volumen del concreto} = \frac{2508 \text{Kg}}{2435 \text{Kg/m}^3} = 1.030 \text{m}^3$$

Total 2435Kg/m³

Cemento = 340 2508

$$X \quad 2435 \quad \square \quad X = 330 \text{Kg/m}^3$$

Agua = 205 2508

$$X \quad 2435 \quad \square \quad X = 199 \text{Lt/m}^3$$

A. Fino = 841 2508

$$X \quad 2435 \quad \square \quad X = 817 \text{Kg/m}^3$$

A. Grueso = 1122 2508

$$X \quad 2435 \quad \square \quad X = 1089 \text{Kg/m}^3$$

Diseño corregido por el peso unitario del concreto:

Cemento	=	330 Kg/m ³
Agua	=	199 Lt/m ³
A. Fino	=	817 Kg/m ³
A. Grueso	=	<u>1089 Kg/m³</u>
		2435 Kg/m ³

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE EN MEZCLAS DE CONCRETO POR EL MÉTODO DE PRESION TIPO NEUMÁTICO (WASHINGTON)

N.T.P.: 339.083

A.S.T.M. C-231

DEFINICIÓN: Este ensayo tiene como finalidad determinar el contenido de aire total en una mezcla de concreto fresco. Este ensayo es conocido como Washington.

En una mezcla de concreto fresco al cual no se le añade ningún aditivo para incorporar aire, el aire total será igual al aire atrapado. En una mezcla de concreto fresco al cual se le introduce aire por medio de un aditivo, el aire total que registra el equipo será la sumatoria del aire atrapado más el aire incorporado.

Este ensayo es ampliamente usado en mezclas de concreto en donde se le introduce aire intencionalmente por medio de un aditivo, como e las zonas de altura del territorio nacional.

PROCEDIMIENTO

a) Calibración del Equipo

- El recipiente que va a contener la muestra de concreto equivale o es equivalente a 1/4pie³ (7075cm³ aprox), el cual tiene un manómetro en la tapa que debe ser calibrado de la siguiente manera.
- Colocar el recipiente en una superficie nivelada, rígida y llenar con agua, introducir el calibre equivalente al 5% del volumen del recipiente, tapar el equipo y llenar con agua por el embudo del recipiente hasta que salga agua por el embudo de desfogue. Bombear aire hasta que el agua negra del manómetro coincida con la aguja amarilla, luego abrir la válvula que

hace ingresar el aire de la cámara de presión hacia el recipiente. El porcentaje del aire total medido de esa forma deberá ser 5%. Si el porcentaje del aire es 5%, quiere decir que el equipo se encuentra calibrado. Si por el contrario no marcara 5%, tendrá que ser revisado y ajustado por un especialista.

Nota: Si no se contara con el patrón para calibrar el equipo, entonces se puede recurrir a un método alternativo, el cual consiste en llenar totalmente con agua el recipiente, nivelarlo con un vidrio y extraer con la ayuda de una jeringa 5% del volumen del recipiente y luego ensayar.

b) Procedimiento de Ensayo

- Llenar el recipiente en 3 capas, confinando cada capa 25 veces con la varilla compactadora y golpeando ligeramente el exterior del molde con un mazo de goma, hasta que los agujeros dejados por la varilla, se cierren, nivelar con la ayuda de una regla metálica, luego tapar el molde y proceder a ensayar.

ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS NORMALIZADAS DE CONCRETO NTP : 339.033 ASTM C-31

OBJETIVO: Esta norma tiene como objetivo dar a conocer la forma adecuada de elaboración y curado de probetas cilíndricas de concreto para su posterior rotura.

EQUIPOS

- Probetas normalizados de 6" de diámetro interno y 12" de altura, fabricadas con planchas de 1/4" de espesor.
- Varilla compactadora de 60 cm de longitud, de acero liso, 5/8" de diámetro y con punta semiesférica o de bala.
- Comba de goma.
- Herramientas varias.

PROCEDIMIENTO

- La muestra mínima que se debe obtener para la elaboración de probetas no debe ser menor a 30 litros (1pie³), la muestra debe ser moldeada sin exceder

los 15 minutos desde la última obtención de la muestra, hasta el inicio de la elaboración de la probeta.

- Colocar la probeta en forma vertical en un lugar libre de vibraciones, que no entorpezca el tránsito de vehículos y personas, protegido de la lluvia y de la evaporación excesiva (protegido del sol). Llenar el molde en 3 capas, compactando cada capa a razón de 25 chuceadas en forma de espiral, luego dar golpes con la comba de goma hasta que los agujeros dejados por la varilla, se cierren y una ligera capa de agua aflore a la superficie. La segunda y la tercera capa se llena de la misma forma, con la diferencia que las chuseadas deben penetrar 1" a la capa inferior, luego enrasar y dar un buen acabado superior con una plancha de albañilería.
- Dejar la probeta al curado inicial a una temperatura ambiente de 16°C a 27°C por espacio de 16 a 32 horas.
- Desmoldar la probeta dentro del lapso indicado, identificar la con la fecha indicada, la fecha de vaciado y la estructura a la que pertenece o cualquier otro dato que sea importante.
- Dentro de la media hora que ha sido desencofrada la probeta, llevarla al baño de curad, en una solución saturada de cal hidratada a razón de 2gr/Lt. de agua.
- La temperatura del curado debe estar comprendida entre 23°C □ 2°C hasta el día de rotura.

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO DE CONCRETO POR MEDIO DE SU RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

**NTP : 339.082-2001
ASTM C-403**

DEFINICIÓN: Es la velocidad de endurecimiento que experimenta una mezcla de concreto.

De este ensayo se obtiene dos resultados que son: el fraguado inicial y el fraguado final

- **Fraguado Inicial:** Es el tiempo (Horas) que se dispone para mezclar, transportar, colocar, compactar y acabar el concreto.
Es el tiempo límite en donde se puede remezclar el concreto.
Es el tiempo límite en donde se producen las juntas frías.
Se dice que el concreto llega al fraguado inicial cuando alcanza una resistencia a la penetración de 500 lb/pulg².
El fraguado inicial es el tiempo en el que la mezcla pasa de estado plástico a un estado no plástico.

- **Fraguado Final:** Es el tiempo en donde la mezcla del concreto tiene cierta rigidez y comienza el endurecimiento. Se dice que el concreto llega al fraguado final, cuando presenta una resistencia a la penetración de 4000lb/pulg².

EQUIPOS

- Penetrómetro con un dial de 200 lbF de capacidad, con un juego de agujas normalizadas de los siguientes diámetros: 1 1/8", 13/16", 9/16", 5/16", 4/16", 3/16".
- Moldes hechos de un material no absorbente, herméticos, no aceitados, con una profundidad mínima para almacenar 15cm de mezcla y con el área suficiente para que realicen 6 penetraciones con las agujas normadas. Estos recipientes pueden ser circulares o rectangulares.
- Mesa vibratoria.
- Tamiz N°4.
- Cronómetro, plancha, franelas, varilla chuceadora, etc.

PROCEDIMIENTO

- Realizar una tanda de concreto (aprox 0.020) y tomar el tiempo desde que el cemento hace contacto con el agua, mezclar y luego tamizar por la malla N°4 con la ayuda de la mesa vibratoria.
- Se toma el mortero que pasa dicha malla y se coloca en el recipiente hasta que tenga una altura de por lo menos 14cm. y luego se compacta en una sola capa con la varilla compactadora a razón de una chuceada por cada 6.5cm². luego con un badilejo o con la mesa vibratoria se nivela la superficie de la mezcla, y se cubre con una franela hasta el tiempo de ensayo.
- Realizar las penetraciones, de acuerdo a la siguiente tabla:

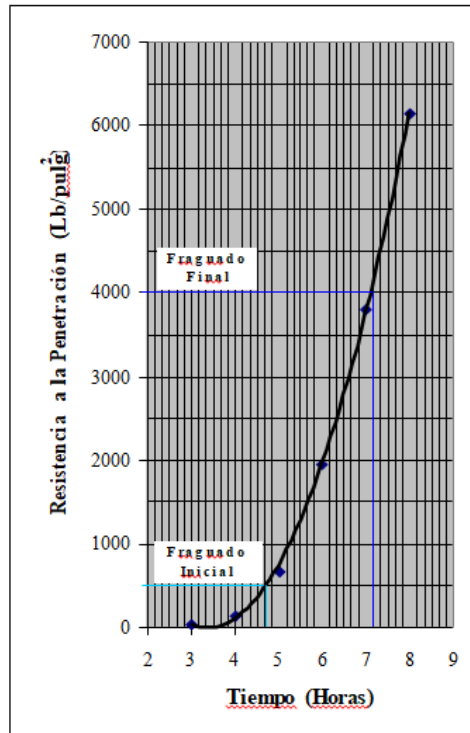
CONDICIÓN DE TEMPERATURA	Primera Penetración	Intervalos entre Penetraciones
Climas cálidos o cuando se usa Acelerante	1 – 2 Horas	Cada media hora
Clima Normal	3 – 4 Horas	Cada hora
Clima Frío o cuando se usa retardante	4 – 6 Horas	Cada hora

- Realizar un mínimo de 6 penetraciones para así poder dibujar la curva de fraguado. Cuando se realice cualquier penetración, la distancia del borde del molde a la aguja no debe ser menor de 2.5cm. (1"); la distancia de aguja a aguja no deberá ser menor de 2 veces el diámetro de la aguja a usar o 1.5cm.
- Cuando se penetre se debe hacer en 10seg y se debe penetrar una pulgada.
- Si en la primera penetración, el dial no marca fuerza alguna, la siguiente penetración se volverá a realizar con la misma aguja, si por el contrario, cuando se penetre, la fuerza excede la capacidad del dial, se usará la aguja inmediata inferior.

CÁLCULOS

- Hora inicio : 8:50
- Temperatura de la muestra : 23.5°C.
- Temperatura ambiente antes del ensayo : 22°C.
- Temperatura ambiente después del ensayo : 22°C.

Hora	Tiempo Transcurrido (Horas)	Diámetro de la Aguja (pulg.)	Area de la Aguja (Pulg)	Fuerza (lb.)	Resistencia (lb/pulg ²)
11:50	3	1 1/8"	0.994	36	36
12:50	4	13/16"	0.518	73	141
13:50	5	9/16"	0.249	142	570
14:50	6	5/16"	0.077	171	2221
15:50	7	4/16"	0.049	186	3796
16:50	8	3/16"	0.028	172	6143



Fraguado Inicial = 4.41 Horas Fraguado Final = 7.10 Horas

$$\text{Area} = \frac{(\text{Diámetro})^2}{4} \times \square$$

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Fuerza (lb)}}{\text{Area (pulg}^2)} = \text{lb/pulg}^2$$

Nota: Para determinar el tiempo de fraguado inicial y final, se tiene que interceptar la curva horizontalmente de izquierda a derecha (500 y 4000 lb/pulg²) y luego descender verticalmente y determinar el tiempo.

Cuando se realiza el ensayo el recipiente que contiene a la muestra debe permanecer cubierto con una franela húmeda, salvo que por la naturaleza de obra se especifique lo contrario.

- Antes de la primera penetración se deberá retirar el agua exudada.
- El resultado del tiempo de fraguado es el promedio de tres ensayos.

ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL EN PROBETAS CILÍNDRICAS NORMALIZADAS

NTP: 330.034 – 2002
ASTM C-39

DEFINICIÓN: Este ensayo se realiza para obtener la resistencia del concreto en probetas cilíndricas normalizadas, expresada en Kg/cm². El resultado que se obtiene es el más usado mundialmente para la aceptación del concreto. En el Perú es el único ensayo con el cual se obtiene un resultado con el se acepta o no al concreto.

EQUIPOS

- Set de capeado. Consta de 1 alineador vertical y un plato base.
- Máquina de compresión. Esta máquina debe estar permanentemente calibrada ya que de ella dependerá si se acepta o no el concreto. El fabricante recomienda calibrar el equipo en el lugar donde se va a instalar el laboratorio ya que el equipo se puede descalibrar por el transporte. Se recomienda calibrar el equipo de uso normal o cuando se tiene dudas sobre las lecturas que arroja.
- Vernier o pie de rey capaz de medir 0.1cm o 1mm

PROCEDIMIENTO

- Retirar las probetas del curado, secarlas superficialmente y refrentar las 2 caras, mantenerlas húmedas, cubiertas en un baño húmedo hasta el momento del ensayo. Colocar la probeta entre el cabezal superior e inferior de la máquina de compresión (La luz o distancia que debe haber desde el cabezal superior totalmente retraído y la parte superior de la probeta refrentada no debe ser mayor a 1”). Hacer descender el pistón superior lo más cerca posible a la probeta, centrar la probeta y aplicar la carga de ensayo. La carga de ensayo debe ser la siguiente:

- 1.4 – 3.5 Kg/cm²/seg (1.4 N.T.P y 1.16 A.S.T.M.)
- 20 – 50 lb/pulg²/seg
- 0.14 – 0.34 Mpa/seg
-

Ensayar hasta la rotura y tomar nota de la lectura o carga máxima alcanzada

NOTA: Antes de que la probeta sea sometida a compresión se tiene que medir el diámetro con aproximación a 0.1cm. esta medida se obtiene como promedio de 2 lecturas en forma de aspa en la parte central de la probeta.

CÁLCULOS

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Donde

f'c = Carga (Kg)
A = Area (cm²)

Nota: 1Kg = 2.2 lb.

Adicionalmente, se informa el tipo de falla sufrida:

Tolerancia de ensayos de compresión

Días	Tolerancia	
	Tiempo (Horas)	Porcentaje
1	± 0.5	2.1
3	± 2	2.8
7	± 6	3.6

28	± 20	3.0
90	± 48	2.2

Factores de Corrección para diferentes relaciones altura/diámetro

R h/φ	Factor de Corrección
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

Esta tabla se aplica para concretos con peso unitario de 1600 a 1920 Kg/cm² y concreto de peso normal secos o remojados al momento del ensayo.

También se aplica para concretos desde 138 hasta 414 Kg/cm².

Ejemplo:

Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (Días)	Diámetro (cm.)	Area (cm ²)	Carga (lb.)	Carga (Kg.)	f'c (Kg/cm ²)	f'c Promedio
Grupo I	31/05	28/06	28	15.2	181	114500	52045	288	287
Grupo I	31/05	28/06	28	15.2	181	113500	51591	285	
Grupo II	31/05	28/06	28	15.1	179	97500	44318	248	247
Grupo II	31/05	28/06	28	15.2	181	98000	44545	246	
Grupo III	31/05	28/06	28	15.1	179	129000	58636	328	329
Grupo III	31/05	28/06	28	15.2	181	131500	59773	330	

MÉTODO PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO MEDIANTE EL APARATO DE VICAT

10	0,04
5	0,03
2	0,02
1	0,01

ICONTEC 118

1. OBJETO

1.1 Esta norma tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat.

6. ENSAYOS

6.1 Aparatos

6.1.1 Balanza: Deben cumplir con los siguientes requisitos: el error admisible para las balanzas en uso bajo carga de 1.000g puede ser hasta de \square 1g y para balanzas nuevas puede llegar hasta la mitad de dicho valor. La sensibilidad recíproca no debe ser mayor del doble del error admisible.

6.1.2 Pesas: El error admisible de las pesas en uso, empleadas para medir el cemento, debe estar de acuerdo con los valores indicados en la Tabla 1; para pesas nuevas debe ser como máximo la mitad de dichos valores.

TABLA 1

ERROR ADMISIBLE EN LAS PESAS

MASA g	ERROR ADMISIBLE \pm g
500	0,35
300	0,30
250	0,25
200	0,20
100	0,15
50	0,10
20	0,05

6.1.3 Probetas: Para medir el agua de amasado deben tener una capacidad de 20°C, de 150 a 200ml. El error admisible debe ser hasta de \square 1ml. Las líneas de graduación principales, deben ser círculos y estar numeradas; las intermedias deben ocupar por lo menos un quinto de la longitud de las principales y las menores un séptimo. Se pueden omitir las graduaciones para los primeros 5ml en probetas de 150ml y para los primeros 10ml en las de 200ml.

6.1.4 Aparato de Vicat: Debe cumplir con los requisitos establecidos en la Norma ICONTEC 110

6.1.4.1 La pasta se debe colocar en un anillo tronco - cónico, G, el cual se colocará con su base mayor sobre una placa de vidrio. H, aproximadamente de 10cm de lado. El molde debe fabricarse de material no corrosible ni absorbente, con un diámetro interior de 70 mm en la base, 60 mm en la parte superior y de altura de 40 mm.

6.2.4.2 Además, el aparato de Vicat y el molde deben cumplir con los requisitos establecidos en el numeral 6.1.4.4 de la Norma ICONTEC 110.

6.1.4.3 La escala graduada, comparada con una escala patrón con exactitud de 0,1 mm en todos los puntos, no debe indicar en ninguna parte una desviación mayor de 0,25 mm.

6.1.4 6.1.5 Reloj: Que permita lecturas en segundos.

6.2 Condiciones ambientales: Son las mismas establecidas en la Norma ICONTEC 110

6.3 Cámara húmeda: Debe tener las dimensiones adecuadas para que las muestras puedan almacenarse con facilidad. Además de mantenerse a una temperatura de $23 \pm 1,7^\circ\text{C}$ y a una humedad relativa no menor de 90%.

6.4 Preparación e la pasta de cemento: Deben mezclarse 500g de cemento con el porcentaje de agua de amasado (numeral 6.4.1) requerido para la consistencia normal, siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 6.4 de la Norma ICONTEC 112.

6.4.1 En todos los ensayos debe usarse agua destilada.

6.5 Procedimiento.

6.5.1. Moldeo de la muestra de ensayo: A la pasta preparada como se describe en el 2.4, rápidamente debe dársele forma esférica con las manos enguantadas, y lanzarse de una mano a la otra por seis veces estando éstas a una distancia de 15 cm aproximadamente. Se toma el molde en una mano y con la otra se presiona la bola hasta llenar el molde completamente por la base mayor. Quitar el exceso en esta base con un solo movimiento de la palma de la mano. El molde debe colocarse con su base mayor sobre la placa de vidrio y el exceso de pasta que aparezca en la base menor debe retirarse pasando el palustre oblicuamente de modo que forme un ángulo pequeño con el borde superior del molde. La parte superior de la muestra, debe alisarse si es necesario, con una o dos pasadas del borde del palustre. Durante las operaciones para retirar el exceso de pasta y para alisarla, debe tenerse cuidado de no ejercer presión alguna sobre ésta. Inmediatamente después de terminado el moldeo, debe colocarse la muestra en el cuarto o cámara húmeda, de donde debe sacarse únicamente para las determinaciones de tiempo de fraguado. La muestra debe permanecer en el molde, soportada por la placa de vidrio, durante todo el período de ensayo.

6.5.2. Determinación del tiempo de fraguado: La muestra usada para determinar el tiempo de fraguado debe mantenerse dentro de la cámara húmeda durante 30 minutos después del moldeo sin que sufra ninguna alteración. Debe determinarse la penetración de la aguja de 1 mm en ese instante y luego debe repetirse cada 15 minutos (para cementos tipo 3 debe repetirse cada 10 minutos), hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menos. Para el ensayo de penetración, debe hacerse descender la aguja D del vástago B hasta que su extremo haga contacto con la superficie de la pasta de cemento. Debe apretarse el tornillo de sujeción E y ajustarse el índice F, en el extremo superior de la escala o

anotarse una lectura inicial. Se suelta el vástago rápidamente aflojando el tornillo de sujeción E y dejando que la aguja penetre 30 segundos, momento en el cual debe tomarse la lectura para determinar la penetración. (Si durante las primeras lecturas la pasta se mantiene blanda, el descenso del vástago, se puede hacer lentamente para evitar la deformación de la aguja de 1 mm, pero las determinaciones de penetración para el tiempo de fraguado se deben hacer aflojando el tornillo).

6.5.2.1 Las penetraciones deben estar separadas por lo menos 6 mm entre sí y 10 mm del borde interior del molde. Se anotan los resultados de todas las penetraciones y pos interpolación debe determinarse el tiempo obtenido para una penetración de 25 mm, el cual indica el Tiempo de Fraguado.

9. APÉNDICE

9.1 Indicaciones complementarias: El aparato no debe estar sometido a vibraciones durante la penetración, la aguja, de 1 mm de diámetro debe ser recta y estar limpia, pues la acumulación de pasta en su periferia puede retardar la penetración, así como la pasta en la punta puede aumentar la misma, esta determinación es solo aproximada puesto que no solo la temperatura y la cantidad de agua de amasado influyen en el resultado, sino también la temperatura y humedad del aire.

9.2 Normas que deben consultarse.

9.2.1 ICONTEC 110. Método para determinar la consistencia normal del cemento.

9.2.2 ICONTEC 112. Mezcla mecánica de patas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica.

9.3 Antecedentes: ASTM C 191 Time of setting of hydraulic cement by Vicat needle.

DESGASTE POR ABRASIÓN (Máquina de los Ángeles)

Tamaños Mayores: NTP: 400.020 - ASTM C-535

Tamaños Menores: NTP: 400.019 - ASTM C-131

DEFINICIÓN: Este ensayo se realiza para determinar la resistencia mecánica que posee al desgaste una muestra de agregado grueso. La muestra puede ser de tamaños menores (1 ½” Hasta N°8) o tamaños mayores (3” hasta 3/4”)

EQUIPOS

- Una máquina de los Ángeles con sus respectivas esferas de acero (cada esfera con un peso de 390 a 445gr.)
- Tamices.
- Horno capaz de mantener la temp. 110± 5 °C.
- Una balanza con aprox. a 1 gr. con capacidad de 20Kg.
- Tamiz N°12
- Un cronómetro.
- Herramientas varias

PROCEDIMIENTO

Realizar un análisis granulométrico y determinar el método a usar de acuerdo a la siguiente tabla

TAMAÑOS MAYORES

TAMIZ		GRADACIÓN		
Pasa	Retiene	1	2	3
3”	2 ½”	2500 ± 50 gr.		
2 ½”	2”	2500 ± 50 gr.		
2”	1 ½”	5000 ± 50 gr.	5000 ± 50 gr.	
1 ½”	1”		5000 ± 25 gr.	5000 ± 25 gr.
1”	¾”			5000 ± 25 gr.
TOTAL		10000 ± 100 gr.	10000 ± 75 gr.	10000 ± 50 gr.

TAMAÑOS MENORES

TAMIZ		GRADACIÓN			
Pasa	Retiene	A	B	C	D

1 ½”	1”	1250 ± 25			
1”	¾”	gr.			
¾”	½”	1250 ± 25	2500 ± 10		
½”	¾”	gr.	gr.		
¾”	¼”	1250 ± 10	2500 ± 10	2500 ± 10	
¼”	N°4	gr.	gr.	gr.	
N°4	N°8	1250 ± 10		2500 ± 10	5000 ± 10
		gr.		gr.	gr.
TOTAL		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10
		gr.	gr.	gr.	gr.

Luego de obtener una muestra compuesta con los pesos indicados y aproximados en las tablas. El material es lavado y secado al horno por 24 horas hasta peso constante para verificar los tamaños de las partículas (por tamizado). Se compone finalmente la muestra, se toma el peso inicial seco (en gramos), se vierte el material dentro de la máquina de abrasión y se le coloca la carga abrasiva (esferas de acero), de acuerdo a la siguiente tabla:

GRADACIÓN	N° DE ESFERAS
1	12
2	12
3	12
A	12
B	11
C	8
D	6

Hacer girar la máquina a las revoluciones indicadas de acuerdo a los tamaños de los agregados:

- Tamaños mayores : 1000 revoluciones
- Tamaños menores : 500 revoluciones

Esta máquina gira a una velocidad de 33 revoluciones por minuto, completando las 1000 revoluciones en aproximadamente 30 minutos y las 500 revoluciones en aproximadamente 15 minutos.

Luego del total de las revoluciones, extraer el material de la máquina de los Ángeles en un recipiente (accesorio de la máquina) y tamizar el material por la malla N°12, lavar el material retenido, llevarlo al horno hasta peso constante volver a tamizar por la malla N°12 y pesar.

CÁLCULO:

$$\% \text{ de Abrasión} = \frac{\text{PIs} - \text{PFs}}{\text{PIs}} \times 100$$

Donde:

PIs = Peso Inicial Seco (gr.).

PFs = Peso final seco, luego del total de revoluciones y retenido en la malla N°12 (gr.).

Nota: Si se desea obtener la uniformidad de desgaste del agregado, parar la máquina al 20% del total de las revoluciones y extraer la muestra, tamizar por la malla N°12 y pesar lo retenido sin lavarlo, introducir de nuevo el material a la máquina, incluyendo el polvillo que pasa la malla N°12 y completar las revoluciones.

$$\text{Uniformidad} = \frac{\text{PIs} - \text{P20\%Rv}}{\text{PIs} - \text{PFs}}$$

Donde:

P20%Rv = Peso del material al 20% del total de las revoluciones.

NOTA: El porcentaje de abrasión se reporta al entero más cercano, y la uniformidad con 2 decimales (este resultado no tiene unidades).

DETERMINACIÓN DE UN ÍNDICE DE CONSISTENCIA DE HORMIGONES FRESCOS, POR EL MÉTODO DE LA MESA DE SACUDIDA

NTP : 339.085

OBJETO

La presente norma describe el método de ensayo para la determinación de un índice de consistencia de los hormigones frescos, mediante el uso de la mesa de sacudidas.

NOTA.- Este método se considera aplicable a hormigones plásticos que tienen agregado grueso hasta 38 mm (1 ½"). Si el agregado grueso es mayor que 38 mm (1 ½"), el método es aplicable cuando se realiza sobre la porción de hormigón que pasa el tamiza ITINTEC 38 mm (1 ½") después de haber eliminado los agregados mayores de acuerdo como se indica en la norma ASTM C-172.

Este método no se considera aplicable a hormigones no plásticos y no cohesivos.

DEFINICIONES

Consistencia.- Es el grado de fluidez de una mezcla, determinada de acuerdo a un procedimiento prefijado.

PRINCIPIO DEL MÉTODO

Se determina el aumento del diámetro que experimenta la base inferior de un tronco de cono de masa de hormigón fresco, sometido a sacudidas sucesivas.

APARATOS

Molde.- Construido de acero liso. Su forma debe ser la de un tronco de cono, con un diámetro de 250 mm en la base inferior, 170 mm en la base superior y una altura de 130 mm. Ambas bases deben formar un ángulo recto con el eje del cono. El molde debe estar provisto de asas laterales.

Mesa de sacudidas.- La mesa de sacudidas debe tener la forma y medidas estándares. No debe pesar menos de 135Kg y debe ir montada sobre una base de hormigón que tenga una altura de 380 mm a 510 mm.

Varilla compactadora.- Recta de acero liso, de 16 mm (5/8") de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud, terminada en punta semiesférica.

MUESTRAS

Las muestras deben ser representativas del hormigón que se está preparando y deben tomarse de acuerdo a la Norma Técnica ITINTEC 334.004.

PROCEDIMIENTO

Inmediatamente después de extraer la muestra, se limpia y se moja la mesa de sacudidas, quitando el exceso de agua con una esponja de goma. Se centra el molde sobre la mesa, se sujeta firmemente y se agrega un volumen de hormigón suficiente para llenar la mitad del molde. Con la barra compactadora se aplican veinticinco golpes distribuidos uniformemente por toda la sección de la masa.

Se procede luego a llenar el molde con exceso y se aplica otros veinticinco golpes con la varilla, procurando que penetre hasta la capa inferior y que la masa rellene todos los huecos.

Se retira el hormigón sobrante y se limpia la mesa, si es necesario. Se saca el molde levantándolo con cuidado en dirección vertical, lo más rápidamente posible. Luego la mesa se eleva y se deja caer durante quince veces, desde una altura de 12.5 mm en 15 segundos girando la manivela con una velocidad uniforme.

EXPRESIÓN DE RESULTADOS

Se determina un índice de consistencia calculando el tanto por ciento del aumento del diámetro, expresado en centímetros, de la base inferior del tronco de cono.

Se toma como diámetro medio del hormigón extendido, la media aritmética de seis mediciones del diámetro, distribuidas simétricamente. Las medidas se hacen con una aproximación de 5 mm.

DETERMINACIÓN DE LA FLUIDEZ DE UN MORTERO DE CONSISTENCIA PLÁSTICA

ASTM C-230

OBJETIVO: Determinar la fluidez en una mezcla plástica de mortero.

EQUIPOS

- Un cronómetro.
- Una probeta con aproximación a 1 ml.
- Mesa de fluidez
- Cono y pizón.
- Calibrador o regal

PROCEDIMIENTO

- Colocar la mesa de fluidez sobre una superficie totalmente plana, el cual debe estar aceitado en la parte inferior.
- Humedecer la superficie de la mesa y el cono el cual debe estar centrado dentro las marcas de la superficie de la mesa.
- Llenar el molde en 2 capas, compactar cada capa con 20 golpes, la última capa se llena en exceso y se nivela con ayuda de una espátula.
- Retirar cuidadosamente en forma vertical el cono, limpiar los bordes de la mesa dejado por el mortero, teniendo cuidado de eliminar el agua de la mezcla que se encuentra en la parte central.
- Dar o realizar 25 golpes en 15 segundos y medir la extensibilidad de la mezcla.

CÁLCULOS

$$\% \text{ Fluidez} = \frac{\text{Diámetro promedio (mm)} - 101.6 \text{ (mm)}}{101.6 \text{ mm}} \times 100$$

MÉTODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL MORTERO DE CEMENTO HIDRÁULICO USANDO CUBOS DE 50.8mm DE LADO

ASTM C-109
NTP 334.051

OBJETIVO

Determinar la resistencia del cemento mediante un mortero moldeado en cubos de 2" x 2".

APARATOS

- Una mezcladora de morteros.
- Tamices: N°16, N°30, N°40, N°50, N°100.
- Probetas con precisión a 1 ml.
- Cámara de curado.

- Mesa de Flujo
- Máquina o prensa para ensayo a compresión.
- Termómetros.
- Moldes para cubos de 2" x 2".
- Herramientas varias.

ARENA: La arena a utilizar debe cumplir la norma ASTM C-788 previamente de debe cuartear de 700gr de muestra reduciéndola a 100gr y realizar el ensayo granulométrico.

MALLA	ESPECIFICACIÓN (Porcentaje que pasa)
Nº16	100
Nº30	96 - 100
Nº40	65 - 75
Nº50	20 - 30
Nº100	9 - 4

Nota: Se utilizará arena de OTAWA o arena sílice

PROPORCIONES DE CONSISTENCIA

La dosificación para el mortero de cemento se realiza en peso en relación 1 : 2.75

TABLA

MATERIAL	Para 6 Cubos	Para 9 Cubos
Cemento	500 gr.	740 gr.
Arena	1375 gr.	2035gr.
Agua	Para cementos Puzolánicos: 110% ± 5% ASTM C-230 "Especificaciones para mesa de fluidez"	
	Para cementos normales: $\frac{a}{c} = 0.485$	

REPARACIÓN DE LOS MOLDES

Lo moldes deben estar limpios, aceitados y totalmente ajustados.

LLENADO DE LOS MOLDES

Se llenan en 2 capas con un total de 32 golpes.

Cada capa tiene cuatro etapas de 16 golpes.

1	2	3	4
8	7	6	5

12	13
11	14
10	15
9	16

La última capa se adiciona en exceso y con la ayuda de los dedos el material sobrante se incorpora hacia adentro y se nivela con una espátula.

CÁMARA DE CURADO

La temperatura ambiente debe estar entre 20 y 27°C.

La temperatura de curado (cámara) debe estar en $23 \pm 1^\circ\text{C}$. La humedad relativa debe ser mayor del 90 %

TIEMPO DE ROTURA TOLERABLE

EDAD (Días)	HORAS PERMISIBLES
1	± 1/2 Hora
3	± 1Hora
7	± 3 Horas
28	± 12 Horas

- Cuando se va a ensayar cubos a 24 Horas se debe extraer la muestra del molde con mucho cuidado, la cual debe estar en el cuarto de curado y envuelto en un paño húmedo hasta el momento del ensayo a compresión
- Si se ensaya a otra edades debe permanecer la muestra saturada de agua a $23 \pm 1^\circ\text{C}$ hasta la fecha de su rotura.

RESULTADOS

Los cubos deben ensayarse por la cara opuesta de donde han sido vaciados, determinar el área en cm².

La carga es expresada en Kg.

Se necesita por ensayo 3 muestras de las cuales el promedio no debe diferir cada una de ellas en 10 %.

Ejemplo:

- 1 ----- 40 Kg/cm²
 - 2 ----- 45 Kg/cm²
 - 3 ----- 42 Kg/cm²
- 10% 42 ± 4

**REFERENCIA EN EL TIEMPO DE MEZCLADO
ASTM C-305**

**TIEMPO DE MEZCLADO DE MORTEROS Y PASTA DE CEMENTO DE
CONSISTENCIA PLASTICA**

MEZCLADO	
Pasta de Cemento	Mortero de Cemento
1) Agua.	1) Agua
2) Cemento, 30 segundos de absorción.	2) Cemento, 20 segundos de absorcio.
3) 30 segundos de mezclado a velocidad 1.	3) En 30 se añade la arena en velocidad 1.
4) Detener 15 segundos y utilizar espátula para colocar al centro el mortero adherido al recipiente de mezclado.	4) Cambiar a velocidad 2 por 30 segundos.
5) 1 minuto de mezclado a velocidad 2.	5) Reposar 1 min con 30 segundos y utilizar espátula.
	6) Prender a velocidad 2 por 1 minuto.

DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO

ASTM C-191 NTP: 334.006

DEFINICIÓN

Consistencia normal se define como la cantidad mínima de agua (Expresada en porcentaje con respecto al peso del cemento), con la cual el cemento se hidrata totalmente.

El rango aproximado en el cual se encuentra la consistencia de los cementos es de 30 % o $R_{A/C} = 0.3$.

Se dice que una pasta de cemento tiene consistencia normal cuando presenta una penetración de 10 ± 1 mm con la parte posterior de la aguja de Vicat (La sonda pesa 300gr).

EQUIPOS

- Aguja de Vicat.
- Cono de plástico endurecido normalizado.
- Balanza con aproximación a 0.1gr y con capacidad de por lo menos de 2000gr.
- Probeta graduada de 100ml.
- Batidora para pasta normalizada.
- Cronómetro.
- Herramientas varias.

Procedimiento:

1. Preparar una pasta de cemento, retirar la pasta adherida en las paredes del recipiente de mezclado (con la mano) y hacer una bola.
2. Bolear 6 veces entre las manos a una distancia de 6" o 150 mm. e introducir la pasta por la parte inferior del molde cónico y colocarlo sobre un vidrio, enrasar el exceso con la ayuda de una espátula y darle un acabado plano.
3. luego se coloca la muestra centrada debajo del vástago de la aguja de Vicat de tal forma que haga contacto con la superficie de la muestra y se deja caer por espacio de 30". Tiempo en el cual debe penetrar 10 mm, 1mm. Para que sea considerada una pasta de consistencia normal.

Nota: Los pasos 2 y 3, se deberán realizar antes de 30 segundos, tiempo que se controla desde el momento que se apaga la máquina de mezclado una vez finalizada de mezcla.

Si se obtuvieran lecturas fuera del rango, se realizarán otras pastas con menos o mayor cantidad de agua, según sea el caso.

Expresión del resultado:

Se informará el porcentaje de agua (al décimo), con lo cual se obtuvo una penetración de $10\text{mm} \pm 1\text{mm}$ (sin decimales).

Nota: La muestra necesaria de cemento para el ensayo es de 500gr o 650gr.

Ejemplo:

Cemento	Pacasmayo
Peso (gr)	500.0
Agua (ml)	150.0
Penetración (mm)	10
Consistencia (%)	30.0

CÁLCULO

$$\begin{array}{l} \text{Si: } 500.0 \longrightarrow 100 \\ 150.0 \longrightarrow X \end{array}$$

$$X = \frac{150.0 \times 100}{500.0}$$

$$X = 30.0\%$$

REFRENTADO DE PROBETAS CILINDRICAS

NTP : 339.037

DEFINICION

Se conoce como refrentado al procedimiento que se sigue para obtener que las dos áreas (superior e inferior) queden paralelas y totalmente plana para que la carga que se le aplique del ensayo se reparta uniformemente en ésta. Adicionalmente la probeta cilíndrica quedará alineada verticalmente.

Dentro de los materiales que se utiliza para el refrentado tenemos:

- *Refrentado en yeso*, de alta resistencia con relación de 0.26 a 0.30.
- *Mortero de baja relación $a/c = 0.29$* , que viene a ser cemento y agua únicamente.
- *Mortero de Azufre*: Es azufre fundido a una temperatura de 130°C a 143°C. Este mortero de azufre es reciclable y se utiliza hasta 5 veces. Este es el sistema de refrentado y ampliamente usado, ya que una de las condiciones más importantes de un refrentado es que alcance una resistencia a la compresión de 350Kg/cm² desde el momento que se coloca a la probeta hasta el momento que se desea ensayar. Mientras el refrentado de yeso y cemento llegan a esta resistencia en varios días, el azufre lo hace en horas.
- *Refrentado de Neopreno*: Este procedimiento se usa siempre y cuando se encuentre con una máquina amoldadora de concreto, la cual alinea la probeta verticalmente y hace que las áreas superior e inferior queden planas y paralelas entre sí.

IMPUREZAS ORGÁNICAS

NTP : 400.013

ASTM C-40

DEFINICIÓN

Las impurezas orgánicas son sustancias de origen animal o vegetal que contamina los agregados. Este ensayo se realiza generalmente en el agregado fino. Es un ensayo cualitativo que nos va a alertar sobre la posible contaminación del agregado, ya que si se encuentra contaminado, cuando se mezcla con el cemento, puede producir un retardo de fraguado (endurecimiento) que va a reaccionar con el concreto durante la hidratación de este, reduciendo la resistencia.

EQUIPOS

- 1 Patrón GARDNER (Clorímetro)
- Botella transparente de 16 onzas de capacidad.
- Balanza con aproximación al 0.1gr y de por lo menos de 2000gr de capacidad.
- Horno
- Reactivo: Hidróxido de Sodio al 3 %.

PREPARACIÓN

Pesar 500gr del agregado a ensayar aparentemente seco (si el agregado se encontrara saturado o húmedo que dificulte la introducción de este a la botella, secar al horno hasta que este superficialmente seco) introducir a la botella de vidrio de 16 onzas con ayuda de un embudo y adicionarle la solución de hidróxido de sodio al 3% hasta un volumen total de 16 onzas aproximadamente. Tapar la botella y agitar y dejar por 24 horas. Compararlo con el patrón GARDNER y calificarlo con el color que más se le aproxime.

RESULTADO

COLOR GARDNER	CLASIFICACIÓN
1	No presenta impurezas orgánicas.
2	Presenta trazas de impurezas orgánicas. N°16.
3	Contiene impurezas orgánicas.
4	Alto contenido de impurezas orgánico
5	Alto contenido de impurezas orgánico

Si el agregado fino ensayado supera el color N°3 se deberá realizar ensayos de compresión en cubos de mortero, uno con arena en cuestión y otro con una arena “buena”, si la resistencia a compresión del mortero preparado con el agregado en cuestión supera por lo menos el 95% de la resistencia alcanzada por el mortero hecho con el agregado bueno, es aceptada.

TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS FRIABLES

ASTM C-142
NTP : 400.015

DEFINICIÓN

Este ensayo tiene por objeto determinar el porcentaje de partículas frágiles o friables y terrones de arcilla en los agregados.

EQUIPOS

- Horno capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balanza con aproximación a 1gr para el Agregado Grueso.

- Balanza con aproximación al 0.1gr para el Agregado Fino.
- Tamices: N°4, N°8, N°16 y N°20 para el Agregado Fino.
- Tamices: N°8, N°4, 3/8”, 3/4”, 1 1/2” para el agregado Grueso.
- Agua Destilada y recipientes varios.

PROCEDIMIENTO

Se usa el material remanente (sobrante⁹ del ensayo malla N°200.

A) AGREGADO FINO: Componer una muestra de 100gr de la siguiente forma:

- 50gr de material lavado seco que pasa la malla N°4 y retiene la malla N°8 y;
- 50 gr de material lavado y seco que pasa la malla N° 8 y retiene la malla N°16

Colocar en un envase y agregarle agua destilada hasta que cubra los agregados y dejarlo 24 horas-

Luego tamizar vía húmeda por la malla N°20 presionando ligeramente cada grano de material, contra la malla con ayuda únicamente de la yema de los dedos.

El material se extrae de la malla, se coloca el recipiente y se lleva al horno hasta peso constante.

B) AGREGADO GRUESO: De acuerdo a su granulometría se toman las siguientes mallas y se ensaya por separado.

Mallas		Peso a ensayar (gr.)	Malla para el Tamizado Húmedo
Pasa	Retiene		
3/8”	N°4	1000	N°8
3/4”	3/8”	2000	N°4
1 1/2”	3/4”	3000	N°4
Mayor	1 1/2”	5000	N°4

Proceder de la misma forma que el agregado fino.

CÁLCULOS

$$\% \text{ Terrones de arcilla y partículas friables} = \frac{\text{PIs} - \text{PF Tamizado}}{\text{PIs}}$$

Donde:

PIs = Peso Inicial Seco (gr)

PF = Peso final seco.

Nota: Para obtener el resultado en el caso del agregado grueso, el resultado es el promedio ponderado de las mallas que intervienen. Si el resultado no supera el 10% se aproxima al 0.01% y si fuera mayor al 10%, se aproxima al entero más cercano

DURABILIDAD

NTP : 400.016

ASTM C-88

DEFINICIÓN

Este ensayo se realiza para determinar la durabilidad del agregado cuando es sometido a sitios de congelamiento y deshielo.

Este ensayo se conoce también con los nombres de:

- Desgaste por intemperismo.
- Inalterabilidad.
- Estabilidad del Agregado.

Las soluciones que se pueden usar son de Sulfato de Sodio (SO₄Na) o Sulfato de Magnesio (SO₄Mg). Este ensayo se realiza exclusivamente cuando los agregados utilizados en la elaboración del concreto van a estar expuestos a cambios volumétricos constantes como consecuencia de la temperatura.

NOTA: Este ensayo se realiza al agregado grueso, independiente al fino. Si se requiere hacer el ensayo en Agregado Global, separar por la malla 3/8" el fino del grueso y ensayar por separado.

EQUIPOS

- Serie de tamices para el agregado fino y grueso:
Agregado Grueso: 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4.
Agregado Fino: N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100.
- Adicionalmente las mallas: 1 1/4", 5/8", 5/16" y N°5.
- Balanza con aproximación al 0.1 gr.

- Horno capaz de mantener la temperatura de 110 ± 5°C.
- Recipientes varios.

REACTIVOS

- SO₄Na → Sulfato de Sodio
- SO₄Mg → Sulfato de Magnesio
- Agua destilada

Preparación de las soluciones:

A) Solución de Sulfato de Magnesio SO₄Mg.

Esta solución debe tener una densidad comprendida entre 1.295 y 1.308 gr/cm³. Para lograr esta densidad basta disolver aproximadamente 350gr de Sal Anhidra o 1400gr de Sal Heptahidratada. Dejar saturar 48 horas antes de ser usada, comprobar la densidad y usar.

B) Solución de Sulfato de Sodio SO₄Na.

Esta solución debe tener una densidad entre 1.151 y 1.174 gr/cm³. Esta densidad se logra, disolviendo 250gr de Sal Anhidra o 750gr de decahidrato por litro de agua. Dejar en reposo la solución por 48 horas, controlar la densidad y usar.

Nota: Si la densidad de la solución preparada está fuera del rango, adicionar agua destilada si se quiere bajar la densidad, añadirle sal si se quiere incrementar la densidad. La solución se almacena en un recipiente de plástico. (Sal = SO₄Na ó SO₄Mg).

PROCEDIMIENTO

Realizar una granulometría al agregado a ensayar, ya que en el ensayo intervendrán solamente las mallas que retengan el 5%. Tamizar la muestra, lavar la muestra, secar la muestra, volver a retamizar la muestra y pesar solo los granos que retiene la malla a ensayar (no intervienen los granos que están atrapados en la malla), de acuerdo a la siguiente tabla:

Agregado Fino:

Malla N°	Peso a ensayar Lavado y Seco
-------------	---------------------------------

	(gr.)
4	100.0
8	100.0
16	100.0
30	100.0
50	100.0

Agregado grueso

Mallas		Peso a Ensayar Lavado y Seco (gr)	COMPOSICIÓN			TOTAL
Pasa	Retiene		Pasa	Retiene	Cantidad	
2 ½"	1 ½"	5000	2 ½"	2"	3000	5000
			2"	1 ½"	2000	
1 ½"	¾"	1500	1 ½"	1"	1000	1500
			1"	¾"	500	
¾"	⅜"	1000	¾"	1/2"	670	1000
			1/2"	⅜"	330	
⅜"	Nº 4	300	⅜"	Nº 4	300	300

La muestra que va a intervenir en el ensayo es sometida a 5 ciclos en Solución de SO4Na o SO4Mg. Cada ciclo consta de 24 horas, dividido en

- 17 horas de Saturación
- 1 horas de Decantación
- 4 horas al Horno
- 2 horas de descanso

Luego de terminado los 5 ciclos; lavar la muestra con agua hasta eliminar todo el sulfato, dar un enjuague final con agua destilada y adicionarle solución de CIB a (Cloruro de Bario) al 105 para determinar la presencia de sulfato, si la presencia del sulfato persiste, seguir lavando hasta que la solución de Cloruro de Bario al 10% no reaccione. Llevarla muestra al horno y secar. Luego extraer la muestra y tamizar el agregado fino por sus mallas originales y el agregado grueso de acuerdo a la siguiente tabla:

Mallas		Malla a utilizar para el tamizado final
Pasa	Retiene	

2 ½"	1 ½"	1 ¼"
1 ½"	¾"	5/8"
¾"	⅜"	5/16"
⅜"	Nº 4	Nº 5

Nota: En el agregado grueso, cuando se ensaya material mayor de ¾" adicionalmente del peso inicial y final, se cuentan las partículas iniciales y finales.

Mallas	Porcentaje Retenido	Peso Inicial (gr.)	Peso Final (gr.)	Peso Pérdida (gr.)	% Pérdida	% Pérdida Corregido
2 ½"	-----	-----	-----	-----	-----	-----
1 ½"	-----	-----	-----	-----	-----	-----
¾"	26.1	1500	1430	70.20	4.67	1.22
⅜"	60.5	1000	980	45	2.00	1.21
Nº 4	5.2	300	255	-----	15.00	0.78
Nº 4	1.2	-----	-----	19.7	19.7	0.24
Nº 8	23.5	100.0	80.3	14.1	19.7	4.63
Nº 16	20.3	100.0	85.9	1.6	14.1	2.86
Nº 30	18.5	100.0	98.4	4.5	1.6	0.30
Nº 50	23.4	100.0	95.5	-----	4.1	1.05

Peso Pérdida = Peso Inicial - Peso Final (gr.)

%Pérdida = $\frac{\text{Peso Pérdida (gr.)}}{\text{Peso Inicial (gr.)}} \times 100$

%Pérdida Corregido = $\frac{\%Pérdida \times \%Retenido}{100}$

Como el material de la malla Nº 4 no se ensayó, se asume el porcentaje de pérdida ya sea inmediato superior o inferior, sólo para fines de cálculo.

EXAMEN CUANTITATIVO

Agregado Grueso

Malla		% Pérdida Corregido
Pasa	Retiene	
2 1/2"	1 1/2"	-----
1 1/2"	3/4"	1.22
3/4"	3/8"	1.20
3/8"	N° 4	0.78
Total		3%

Agregado Fino

Malla		% Pérdida Corregido
Pasa	Retiene	
N° 30	N° 50	1.05
N° 16	N° 30	0.30
N° 8	N° 16	2.86
N° 4	N° 8	4.63
3/8"	N° 4	0.24
Total		9%

EXAMEN CUALITATIVO

Sólo se realiza al A. Grueso y a partículas mayores de 3/4"

Tamiz		Rajadas		Desmoronadas		Astilladas		Fracturadas		N° de partículas iniciales
Pasa	Retiene	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%	
2 1/2"	1 1/2"	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	48
1 1/2"	3/4"	-	-	-	-	-	-	-	-	
		4	8	-----	-----	-----	-----	2	4	

TOMA DE UNA MUESTRA DE CONCRETO FRESCO

La muestra de concreto debe ser compuesta, esto quiere decir que se deben obtener varias porciones de muestras individuales y formar una sola para que de ésta forma sea una representativa. El volumen de esta muestra no debe ser menor de 30Lt o 1 pie³ para los ensayos completos de calidad. Se permitirá muestras menores cuando se realice únicamente ensayos de control que son:

- -A Asentamiento
- _s Contenido de aire
- _n Temperatura

El tiempo que debe transcurrir desde la obtención de la primera muestra y la última parte de ésta no será mayor de 15 minutos.

El ensayo de moldeado de probeta no deberá exceder de los 15 minutos posteriores de la obtención de la última parte de la muestra y no deberá exceder los 5 minutos en los demás ensayos.

FRECUENCIA DE ENSAYOS (Elaboración de probetas)

Para moldear probetas, que luego serán ensayadas a compresión, se deberá obtener una muestra (dos probetas) para ser ensayadas a los 28 días de acuerdo a la siguiente frecuencia (Muestras mínimas).

- Una muestra cada 50m³ de concreto colocado.
- Una muestra cada 300m² de concreto colocado.
- Una muestra cada 5 mixer.
- No menos de 1 muestra al día si es que el volumen del concreto colocado es menor a lo de arriba especificado.

ELABORACIÓN DE VIGUETAS

Equipos:

- Moldes prismáticos.
- Varillas compactadoras o chuceadoras de 3/8" de diámetro (16mm) y varilla de 10mm.
- Comba de goma de 600 □ 200gr.
- Vibrador
- Herramientas varias.

Procedimiento:

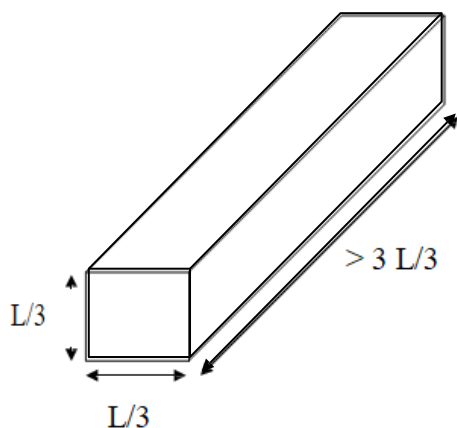
- Llenar el prisma de acuerdo a la siguiente tabla:

Area Superior cm ²	Diametro de Varilla a usar (mm)	N° de Capas	Golpes o chuceo por capa
-------------------------------	---------------------------------	-------------	--------------------------

<	1	3	25
160 – 320	1	3	1 por cada 6.5cm ²
>	1	3	1 por cada 13cm ²

Nota:

- Si el concreto tiene asentamiento menos a 1", se tendrá que confinar por vibración externa o interna.
- Si el Slump se encuentra entre 1" y 3" se podrá confinar por vibración o chuceo.
- Si el Slump es mayor de 3", la muestra se confinará por chuceo.



Tipos de prismas:

- ❖ 10 x 10 x 40cm; para agregados de hasta 1" de ϕ de T.M.N. Se chucea con la varilla de 16mm de ϕ .
- ❖ 15 x 15 x 65cm; para agregados de hasta 2" de ϕ de T.M.N. Se chucea con la varilla de 16mm de ϕ .
- ❖ 20 x 20 x 75cm; para agregados de hasta 3" de ϕ de T.M.N. Se chucea con la varilla de 16mm de ϕ .

DETERMINACIÓN DE LA EXUDACIÓN EN UNA MEZCLA DE CONCRETO FRESCO

NTP : 339.077

ASTM C-232

DEFINICIÓN

Es el afloramiento del agua a la superficie del concreto como consecuencia de la sedimentación de los agregados.

Todo concreto exuda, unos más que otros. Son muchos los factores que contribuyen a la exudación (granulometría de los agregados, P.E. de los agregados, dosificación de la mezcla, cantidad de agua usada en la mezcla, etc).

- Se dice que una mezcla de concreto exuda cuando la velocidad de exudación supera la velocidad de evaporación.
- Se dice que una mezcla de concreto no exuda cuando la velocidad de evaporación supera a la velocidad de exudación.

Algunos investigadores han determinado la exudación máxima, la cual si es sobrepasada, se considera peligrosa, equivalente a 0.5Kg/m²/hora ó 0.0083gr/cm²/min.

EQUIPO

- Un molde metálico de 1/2pie³ o 1/4pie³.
- Un cronómetro
- Una probeta graduada de 100ml.
- Herramientas necesarias para obtener una mezcla de concreto fresco.
- Una balanza con aproximación a 1gr y de por lo menos 30Kg de capacidad.
- Un termómetro.
- Una taca de madera de 5 x 5 x 5cm.
- Un succionador de agua.
- Una franela.

PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

- Existen dos métodos:

- A) El método de compactación o varillado o chuceado.
- B) El método de compactación por vibrado.

En ambos casos se debe utilizar concretos cuyo tamaño máximo del agregado grueso no exceda de 2"; si excediera de 2". Tamizar por la malla de 1 1/2" y realizar el ensayo con el material que pase dicha malla

La temperatura de ensayo en laboratorio (temperatura ambiente) debe estar comprendida entre 18°C – 24°C.

[Cuando se hace este ensayo en obra, este ensayo se debe acomodarse a la obra, es decir a su temperatura ambiente, calor, viento, etc].

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

- Realizar una tanda de concreto y llenar el molde en tres capas, cada capa con 25 chuceadas y golpes con el mazo de goma para que se cierren los agujeros, la última capa debe quedar a 1cm. apróx debajo de la superficie del molde luego pesar y enrasar la superficie, inmediatamente después del enrasado se controla el tiempo de ensayo y se toma lecturas cada 10 minutos las primeras cuatro y luego cada 30 minutos, hasta que el concreto ya no exude.
- Dos minutos antes de cada lectura inclinar el molde poniendo el taco de 5cm en un costado.
- Cada lectura consiste en recolectar el agua exudada con ayuda del succionador y medirlo en una probeta graduada.
- Durante todo el ensayo la muestra debe mantenerse cubierta con una franela húmeda para evitar la evaporación, excepto cuando se toman las medidas.

CALCULOS

Tanda : 0.019m³

Cemento = 7.486
 Agua = 4.047
 Agregado fino = 14.079
 Agregado grueso = 18.658
 Peso Tanda = 44.270

ENVASE = 1/2pie³
 Diámetro = 25.4cm.
 Área = 506.7cm²

Peso del molde = 9.814Kg.
 Peso del molde + concreto – 1" = 40.078
 Peso del concreto – 1" = 30.259
 Temperatura ambiente = 23°C.

Hora de inicio del ensayo = 12:31 pm.

Agua Exudada = $\frac{\text{Volumen de agua parcial (ml)}}{\text{Area del envase (cm}^2\text{)}}$

Velocidad de Exudación = $\frac{\text{Agua exudada (ml/cm}^2\text{)}}{\text{Tiempo parcial (minutos)}}$

Agua acumulada total = 64ml

Factor R = (Agua tanda / Peso tanda) x Peso del Concreto – 1".

Porcentaje de Exudación = $\frac{\text{Agua acumulada x 100}}{1000 \times R}$

Ejemplo:

Hora de Ensayo	Tiempo Transcurrido (minutos)	Tiempo Parcial (minutos)	Volumen de Agua Parcial (ml)	Volumen de Agua Acumulada (ml)	Agua Exudada (ml/cm ²)	Velocidad de Exudación (ml/cm ² /min)
12:41	10	10	0	0	0	0
12:51	20	10	6	6	0.0118	0.00118
13:01	30	10	5	11	0.0098	0.00098
13:11	40	10	6	17	0.0118	0.00118
13:41	70	30	19	36	0.0375	0.00125
14:11	100	30	17	53	0.0336	0.00112
14:41	130	30	10	63	0.0197	0.00066

3:11	160	30	1	64	0.0197	0.00007 -
3:41	190	30	0	64	0	

TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL (TIPO BRASILEIRO)

NTP : 339.084
ASTM C-496-96

DEFINICIÓN

Este ensayo se realiza para determinar la resistencia a la tracción indirecta de un concreto

Este ensayo es realizado en probetas cilíndricas normalizadas de 6" x 12" y testigos diamantinos.

Es también utilizado para evaluar la resistencia al corte del concreto armado con agregado ligero.

EQUIPO

- Una máquina de compresión.
- Dos platinas de apoyo o vigas de acero de por lo menos 1" de ancho y longitud superior al espécimen y un espesor no menor que la distancia desde el borde del soporte esférico o rectangular al extremo del cilindro.
- Unos listones de madera o de cartón de 3.2mm ó 1/8" de espesor, 25mm de ancho y longitud igual o superior del espécimen.
- Un vernier con aproximación a 1mm y con capacidad de medir la longitud mayor de la probeta.

PROCEDIMIENTO

- La probeta debe estar húmeda hasta el momento de ensayo.
- Colocar una de las vigas metálicas en la parte inferior de la máquina, colocar el listón (de madera o ce cartón) y sobre ésta colocar la probeta, el otro listón y luego la otra viga de acero.

- Si el espacio del cabezal superior de la máquina hasta la viga superior es mayor de 1", adicionarle los planares metálicos para ganar altura.
- Aplicar la carga constante comprendida entre:
 - 7 daN/m²/min y 15daN/cm²/min.
 - 7 x 15 Kg/cm²/min.
 - 5000 a 10000 kg/min.
 - 5000 a 10000 daN/min
 en cilindros normales de 6" x 12" a una velocidad de 689KPa/min a 1380KPa/min (100-200lb/pulg/min) hasta la rotura.
- Primeramente, al ensayo, se determina las dimensiones de la probeta, el diámetro como promedio de 3 medias con aproximación a 1mm, una medida central y las otras 2 medidas a los bordes de las probetas. La longitud se determina como promedio de 2 medidas opuestas con aproximación a 1mm.

CÁLCULOS

$$T = 2P/\square DL$$

En donde:

- T = Resistencia a la tracción (Kg/cm²).
- P = Carga (Kg).
- \square = 3.1416
- D = Diámetro (cm).
- L = Longitud (cm).

Ejemplo:

- L = 30.4
- D = 15.2
- P = 41000Lb.

$$T = 2(41000/2.2) / 3.1416 \times 15.2 \times 3.4 = 26\text{Kg/cm}^2$$

INFORME

Registrar lo siguiente:

- Identificación.
- Edad.
- Tipo de espécimen.
- Proporción de agregado estimado.

- Curado.
- Tipo de fractura.
- Diámetro.
- Longitud.
- Máxima carga.
- Resistencia a la tracción con precisión a 5Psi.

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN VIGAS DE CONCRETO ENDURECIDO CON CARGA A LOS TERCIOS DE LUZ

**NTP : 339.078 – 2001
ASTM C-78-94**

EQUIPOS

- Máquina para flexionar vigas con un manómetro capaz de registrar 50Lb de aprox.
- Una wincha o vernier.
- Herramientas varias.

PROCEDIMIENTO

- Extraer la viga de la cámara de curado y con ayuda de una espátula, quitarle todas las rebabas que pudieran tener.
- Medir la viga y marcar el centro y los tercios de luz.
- Colocar cualquier lado de la viga sobre los rodillos, y hacer que haga contacto completamente entre la viga y los rodillos de aplicación de carga. Si no se logra contacto completo, será necesario recubrir, lijar o suplementar con tiras de cuero. Se podrá utilizar tiras de cuero solamente las superficies de las probetas en contacto con las placas o rodillos difieren en no mas de 0.5mm. las tiras de cuero serán de un espesor uniforme de 6mm, de 25 a 50mm de ancho y se extenderán a todo lo ancho de la probetas.
* Antes de iniciar el ensayo se determina las dimensiones de la probeta prismática con aproximación a 1mm ó 0.1cm (luz, ancho, altura). Tomar 3 medidas a lo largo de cada dimensión. (Una cada extremo y una al medio).
Se ensaya la probeta con carga constante a una velocidad de 0.86 – 1.21Mpa/min. Suavemente suave hasta la rotura.
- La probeta tendrá luz libre lo más cerca de lo posible a 3 veces su altura.

- Tomas las medidas a lo largo de cada dimensión (una en cada extremo y al centro), con aproximación a 1mm, para determinar el ancho promedio y altura promedio.

CÁLCULOS

$$Mr = PL / bh^2$$

En donde:

Mr = Módulo de Rotura Kg/cm² (Norma Mpa).

P = Carga (Kg).

L = Luz (cm).

b = Ancho promedio (cm).

h = Altura promedio (cm)

Aplicar la carga a una velocidad que incremente constantemente la resistencia de la fibra extrema, entre 0.86Mpa/min y 1.21Mpa/min (125-175Psi/min). Hasta producir la rotura de la viga.

Nota: Esta fórmula se aplica cuando la falla ocurre dentro del tercio central. Si la falla ocurre fuera del tercio central, per o no mayor del 5 % de la luz libre, el MR se calcula como sigue:

$$Mr = 3Pa/bh^2$$

En donde:

a = Distancia entre la línea de falla y el apoyo más cercano medido sobre el largo de la línea central de la superficie inferior de la viga (cm).

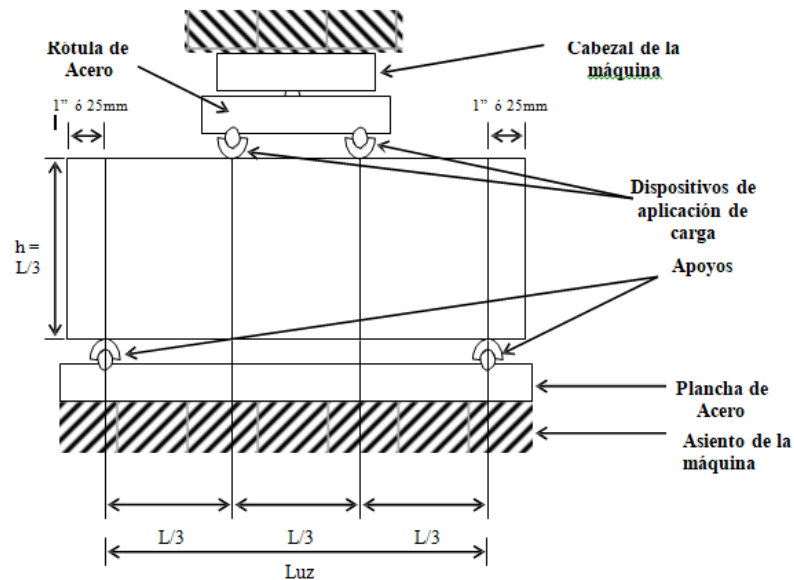
Si la falla ocurre fuera del tercio central y a una distancia mayor de 5 % de la luz libre, se descarta en ensayo.

INFORME

- Promedio del largo, ancho y altura con precisión a 0.1cm.

- Luz Libre, en (cm).
- Carga máxima (Kg.).
- Módulo de Rotura (Mpa.) aproximación a 0.05Mpa.
- Condiciones de humedad en momento del ensayo.
- Edad.
- Defectos del prisma
- Tipo de recubrimiento.

Diagrama de un dispositivo para ensayar la viga simple con carga a los tercios



ESCLEROMETRÍA

NTP : 339.181 - 2001

ASTM C-805 - 1994

Este ensayo no se utiliza como base para la aceptación o rechazo del hormigón.

DEFINICIÓN

Este ensayo se realiza generalmente para determinar la uniformidad del concreto, puntos críticos o de baja calidad en una estructura, y conjuntamente con otros ensayos no destructivos, contribuir a la evaluación de una estructura. (estimar el desarrollo de resistencia in situ con una correlación esfuerzo vs rebote).

Este ensayo no debe ser usado para determinar la calidad del concreto por muchos factores que inciden en la prueba temperatura del cemento, humedad del concreto, temperatura del equipo, tipo de encofrado, tipo de cemento, carbonatación superficial del concreto, tipo de agregado, etc), ya que se encuentra una deserción muy grande

Existen tres tipos de esclerómetro:

- El **N**, que se utiliza para obras civiles normales (puentes, losas, columnas, etc).
- El **L**, que se utiliza para concreto de dimensiones reducidas y sensibles a los golpes.
- El módulo **M**, que se utiliza para estructuras masivas de gran volumen.

Un esclerómetro (Tipo **N**), viene con una piedra abrasiva.

EQUIPOS

- Martillo de rebote.
- Piedra abrasiva.
- Yunque de ensayo.

PROCEDIMIENTO

- Preparar un área de 6" de diámetro en el elemento que se desea ensayar.
- Desgastar con la piedra abrasiva de Carburo de Silicio por lo menos 5mm de concreto.
- Realizar 10 disparos con una separación de por lo menos 1" de disparo a disparo.

- Sacar el promedio de 10 lecturas y si una o nos lecturas individuales difieren en más de 6 unidades del promedio, se descarta estas lecturas y se obtiene el nuevo promedio, si son lecturas que difieren en 6 unidades del promedio, e descarta la prueba.

Nota:

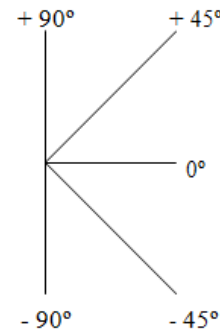
- * La edad mínima recomendada para realizar el ensayo es 14 días.
- * El elemento que se desea ensayar, debe tener una dimensión mínima de 4" de espesor .
- * Si se desea realizar el ensayo en probetas cilíndricas, fijarlas e los cabezales de l máquina se compresión (con aproximación a 5000 lb).
- * Esta prueba no es muy recomendada realizarlo en concreto con una resistencia menos a 140Kg/cm² y en concretos que tengan agregado grueso que tengan TM > 2".
- * Descartar las lecturas que difieran del promedio de las 10 lecturas en más de 6 unidades y determinar el promedio de las lecturas restantes.
Si maás de 2 lecturas difieren de este promedio por 6 unidades, deshechar todas las lecturas y determinar el número de rebote en 10 nuevas ubicaciones dentro del área de ensayo

Calibración del Equipo:

- Se aconseja calibrar el equipo cada 200 determinaciones o cuando se presenta lecturas erróneas. Se dará mantenimiento cada 6 meses.
- Se dice que el esclerómetro está calibrado cuando tiene una lectura de 80 ± 2 determinado en el yunque de calibración que tiene un área de impacto con una dureza Brinell o Rockwell 52°C de 500Kg/mm², el disparo se da de arriba hacia abajo (promedio de 10 lecturas).

FORMATO

Elemento	Ángulo a Disparar	Ubicación	Disparos										Promedio	Promedio Corregido	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			



- + 90° : Si está arriba de la losa.
- + 45° : Si es pavimento.
- 0° : Columna o paredes.
- 45° : Bajo una escalera.
- 90° : Bajo las vigas.

INFORME

- Reportar la siguiente información para cada área de ensayo:
- Fecha y hora de ensayo.
- Identificación de la ubicación de la estructura a ensayar.
- Descripción de las proporciones de la mezcla, si se conoce.
- Resistencia.
- Descripción del área ensayada: Características de superficie (Superficie, Textura, etc).
- Identificación del martillo y número de serie
- Temperatura del Aire.
- Orientación del martillo durante el ensayo.
- Número de rebote promedio para cada área.
- Edad.
- Tipo de encofrado usado.
- Tipo de exposición al ambiente.

EXTRACCIÓN Y ENSAYO DE CORAZONES DIAMANTINOS Y VIGAS CORTADAS DE HORMIGÓN

NTP : 339.059 / 2001
ASTM C - 42 / 94 / 96

DEFINICION

La extracción de testigos diamantinos se realiza generalmente cuando la calidad del concreto entre en duda como consecuencia de la obtención de resistencia es menor que el f_c especificado, en probetas normalizadas y curado (bajo condiciones de laboratorio). También se realiza cuando no se cuenta con la información sobre la resistencia del concreto, cuando una estructura ha sufrido incendio, cuando a una estructura del concreto se le ha aplicado carga a edades tempranas, cuando se desea saber la resistencia del concreto in situ, etc.

Este es el ensayo adicional a la tortura de probetas normalizadas, para determinar la calidad del concreto.

EQUIPOS

- Taladro diamantino.
- Cortadora.
- Prensa.
- Refrentado

De la Geometría de la Probeta

El espécimen extraído, el cual se va a comprimir y determinar la resistencia del concreto debe tener una relación altura diámetro (h/ϕ) de 1.9 a 2.1, pero en ningún

Si el concreto tiene un T.M.N. mayor a 1 1/2", deberá ser preferentemente 3 veces el T.M.N. pero nunca menor de 2 veces el T.N.M.

Para extracciones con T.M.N menor a 1 1/2" se deberá usar brocas de 3 3/4" de diámetro (3.75"), no se permitirá el uso de brocas de menor diámetro, salvo en el concreto que no se puedan penetrar con más brocas arriba estipulada.

La longitud ideal será de 1.9 a 2.1 veces el diámetro.

De la extracción

La extracción debe ser realizada por personal calificado, y extraído el testigo de la parte central del elemento, evitando chocar con el acero de refuerzo.

La edad mínima para la extracción de un testigo debe ser 14 días, para evitar que los agregados se adhieran de pasta . A menos que se estipule lo contrario, se podrá extraer testigos a edades menores.

Del Ensayo:

Una vez extraído, el testigo se procede al tallado o aserrado, de tal forma que el testigo quede alineado verticalmente y las áreas estén paralelas entre si.

Para la rotura del espécimen se tendrá en cuenta los siguientes criterios:

- a) Criterio ACI: La edad mínima recomendable de ensayo es 14 días, si se desea ensayar a edades más tempranas se deberá obtener la muestra sin el desprendimiento de agregado grueso de la matriz.
Si la estructura del servicio va a estar seca, airear la probeta por 7 días a una temperatura ambiente entre 15 a 30°C y una humedad relativa menor del 60 %.
Luego refrentar y ensayar.
Si la estructura en servicio va a estar húmeda, sumergir los testigos por lo menos 48 horas en agua, refrentar y ensayar húmedas.
- b) Criterio NTP: Los especímenes de prueba deberán ser ensayados en condiciones representativas de humedad de la obra o según lo exija la autoridad responsable de la supervisión.

Si la condición de servicio es seca, pueden ser ensayados en la “condición de recepción”, que consiste en trasportar los corazones diamantinos al laboratorio dentro de las 24 horas.

Secar al aire durante 12 a 24 Horas a una temperatura ambiente comprendida entre 16 a 27°C. y una humedad relativa menor al 50 %. Refrentar o tallar los especímenes y ensayarlos dentro de las 48 horas de recibidos.

Antes del ensayo determinar la geometría de las probetas con aproximación a 0.1cm, el área con aproximación a 0.5cm² y en la relación altura/diámetro al 0.001.

Cuando la relación altura /diámetro es menor de 2 y mayor que 1, se tendrá que corregir por los siguientes factores.

Ratio Relación altura/diámetro (L/D)	Factor de corrección de Resistencia
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

Si la relación altura/diámetro obtenida está intermedia entre los valores de la tabla, se tendrá que interpolar linealmente y multiplicar el factor por la resistencia obtenida

Nota: La altura del espécimen se mide una vez refrentado (con todo capin).

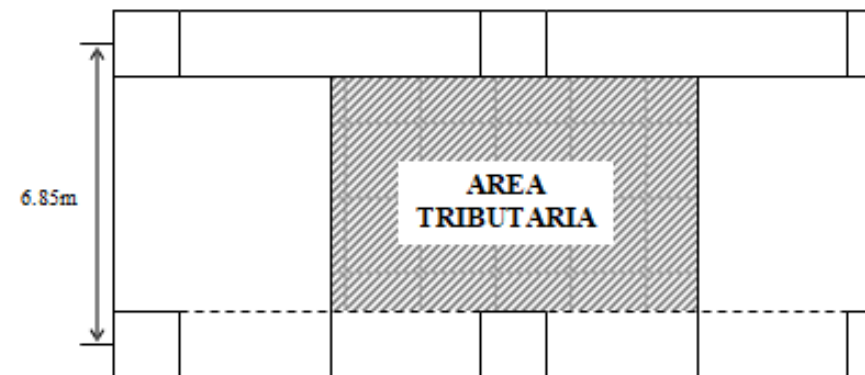
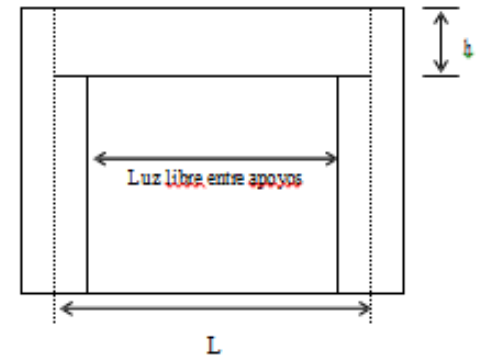
INTERPRETACIÓN DEL RESULTADO

El resultado se obtiene como promedio de 3 testigos y se dice que la resistencia a la compresión del concreto es satisfactorio si supera el 85 % del f'c especificado y ningún testigo individual esté por debajo del 75 % del f'c especificado. Si algún testigo está por debajo del 75 % del f'c especificado se podrá extraer otro más a fin de tratar de promediar. El 85 % es aceptable por que el curado en laboratorio es más intenso que el curado en obra

Nota: Los testigos que van a ser sometidos a tracción no deberán tener acero de refuerzo embebidos en él.

Se puede obtener vigas para el ensayo de flexión los cuales deben sumergirse por lo menos 40H en agua, refrentarlos y ensayarlos a una temperatura ambiente de 23° ± 1.7°C.

PRUEBAS DE CARGA EN ESTRUCTURA DE CARGA



$$\text{Luz libre entre apoyos } \times h \text{ (peralte)} = 7.00 + 0.50 = 2000 \times 500$$

$$\text{Deflexión máxima} = 5.476\text{mm.}$$

3.425m

1) Área tributaria

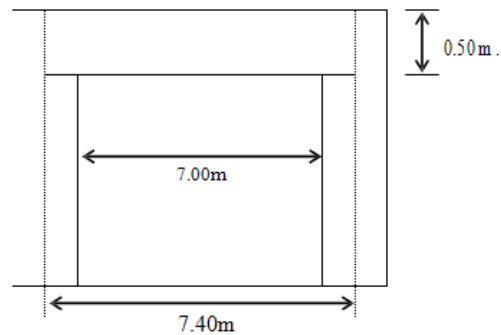
$$\begin{aligned} \text{Área Tributaria} &= 23.5\text{m}^2 \quad 1.7 \text{ es constante Carga Prueba} \quad = C \times V \times 1.7 \quad 23.5\text{m}^2 \\ &= (6.85\text{m} \times \\ &3.425\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Carga prueba} &= 300 \times 1.7 = 510\text{Kg/cm}^2 \\ &= 510\text{Kg/cm}^2 \times 23.8\text{m}^2 = 12160\text{Kg} \end{aligned}$$

$$\text{Taras de } 40\text{Kg} = 12160 / 40 = 304 \text{ Sacos}$$

Esta prueba se realiza para determinar la calidad de la estructura

2) Deflexión máxima



$$\frac{L^2}{20000h}$$

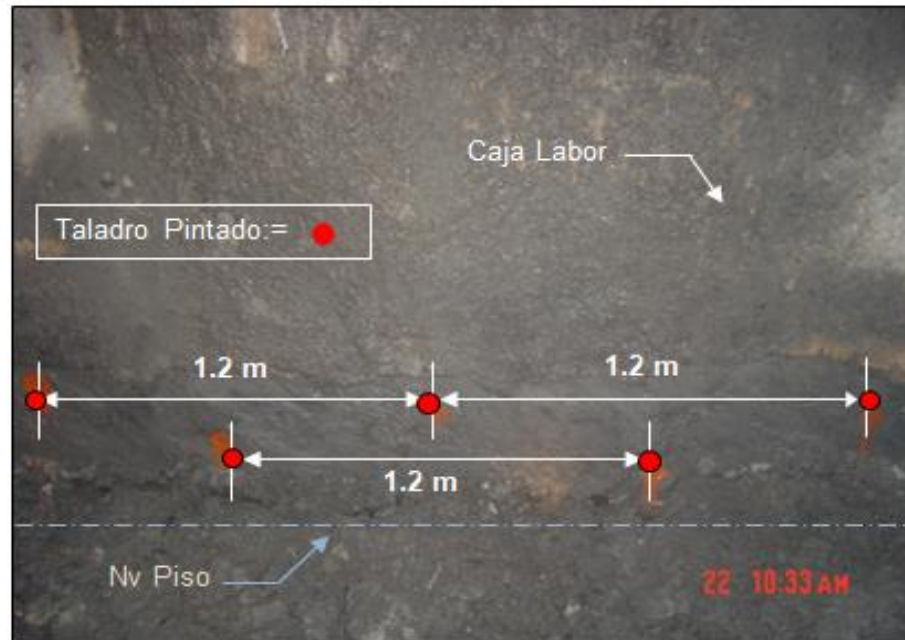
$$\begin{aligned} L &= 7.40\text{m} = 7400\text{mm} \\ L &= 7.00 + 0.50 = 7.50\text{m} \end{aligned}$$

$$D_m = \frac{(\text{Distancia entre ejes de apoyo})^2}{20000h} = 7.40\text{m} \quad = (7400\text{mm})^2$$

ANEXO



PINTADO DE HASTIALES



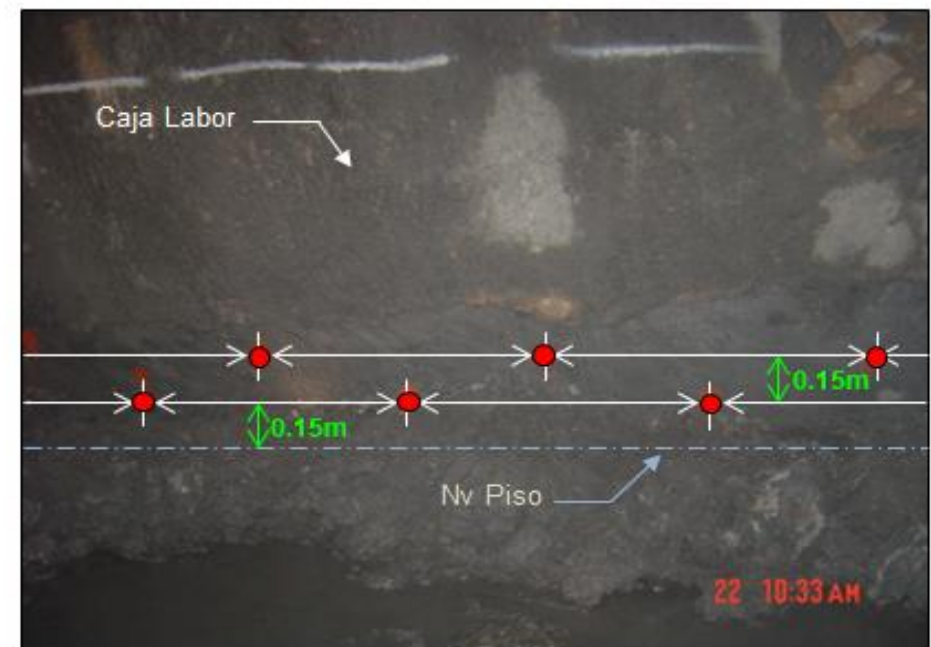
Distancia Nv. Piso y 1º Malla = 0.15m

Distancia 1º Malla y 2º Malla = 0.15m

Si: el ancho del tajo < 6 → 1 malla

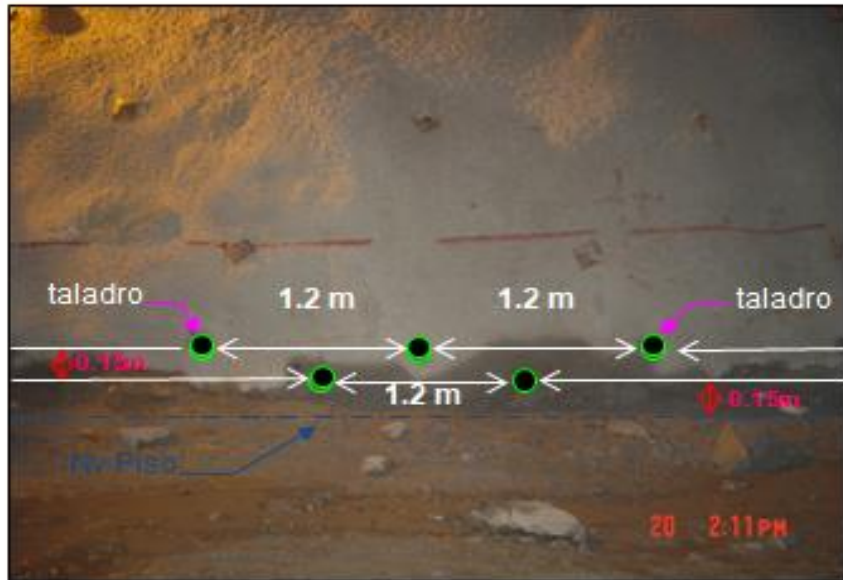
Si: el ancho del tajo > 6 → 2 mallas

La distancia de taladros de la misma malla es de 1.2m.





PERFORACIÓN DE TALADROS



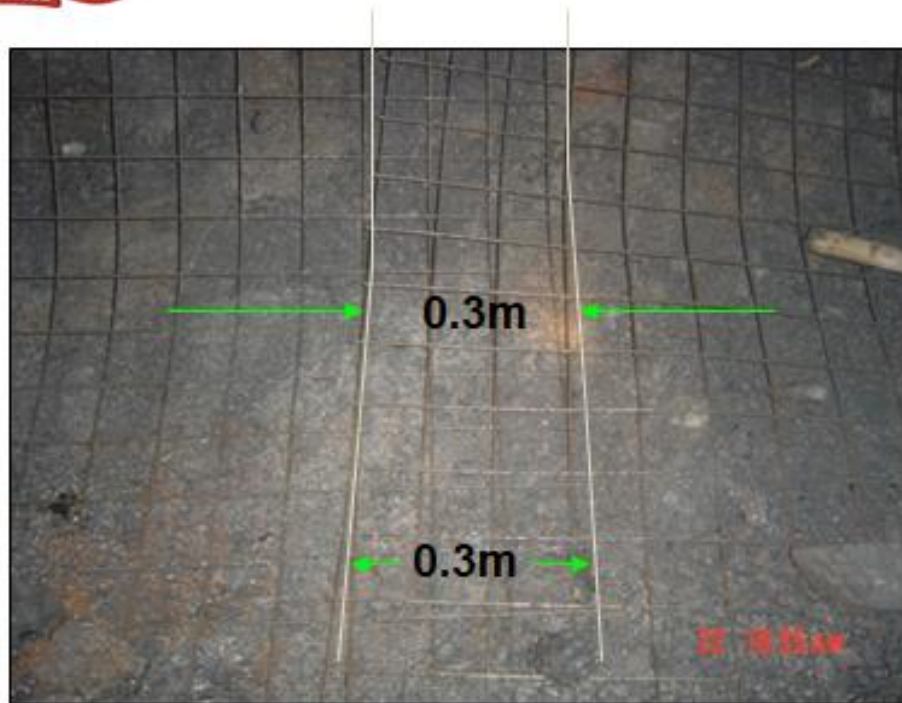
Se perfora manteniendo las distancias de 1.2m de separación entre taladros de la misma malla y los 0.15m de separación entre la 1º y 2º malla

En el momento de iniciar la perforación se debe de respetar la ubicación de los taladros que se pinto.



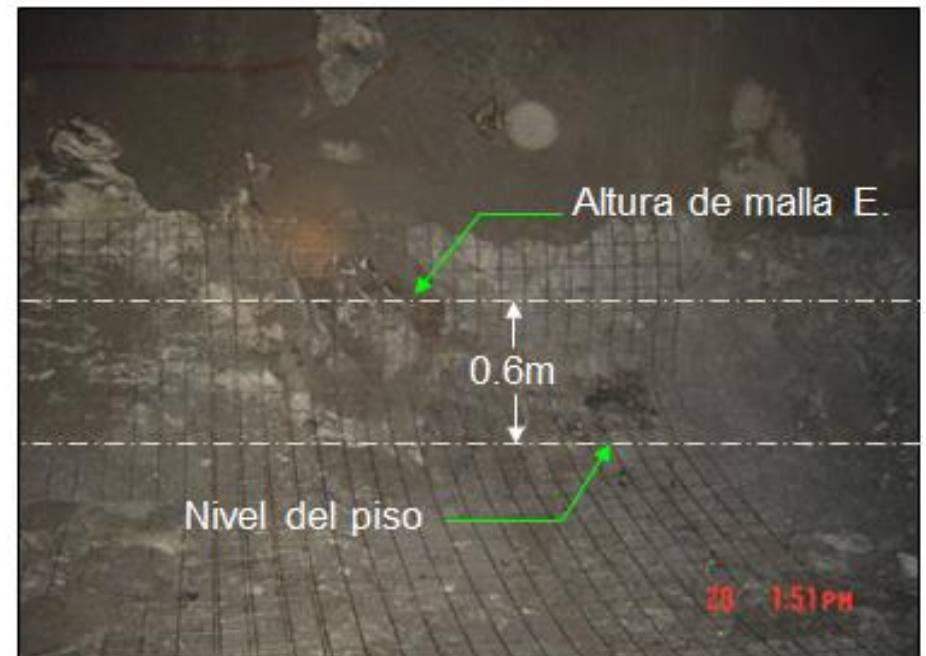


TENDIDO DE MALLA ELECTROSOLDADA



El traslape de entre malla y malla es de 0.3m y la altura de malla en las cajas es de 0.6m.

Teniendo un piso nivelado libre de lodo y agua, procedemos al tendido de malla electrosoldada.





TENDIDO E INYECTADO DE FIERROS A LAS CAJAS



Tendida la malla electrosoldada, el siguiente procedimiento es el inyectado de fierro inyectado de 1" de diámetro en los taladros perforados con 1.2m de separación cuya profundidad es de 3m ó 10'.

La separación de fierro inyectado a fierro inyectado es de 1.2m, y la distancia del nivel del piso a la 1º malla es 0.15m como también la distancia entre la 1º malla y la 2º malla.





TENDIDO DE ELES EN FORMA INTERCALADA



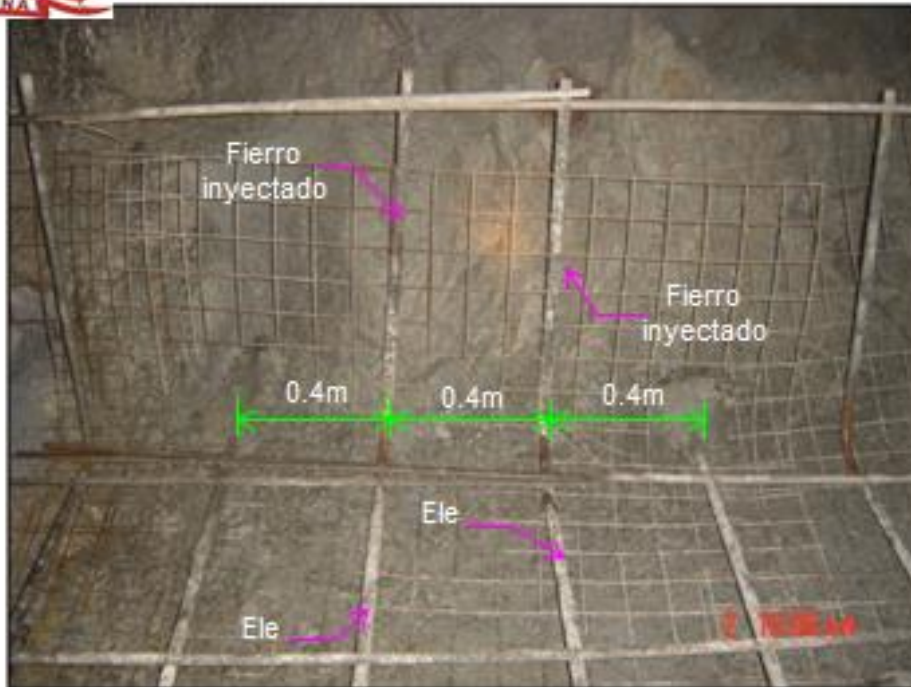
Luego procedemos al tendido de Eles cuya separación de fierro inyectado a Ele y de Ele a Ele será de 0.6m.

La secuencia es como sigue: Fierro inyectado, Ele, Ele y Fierro inyectado. Repitiendo la secuencia en todo el paño.



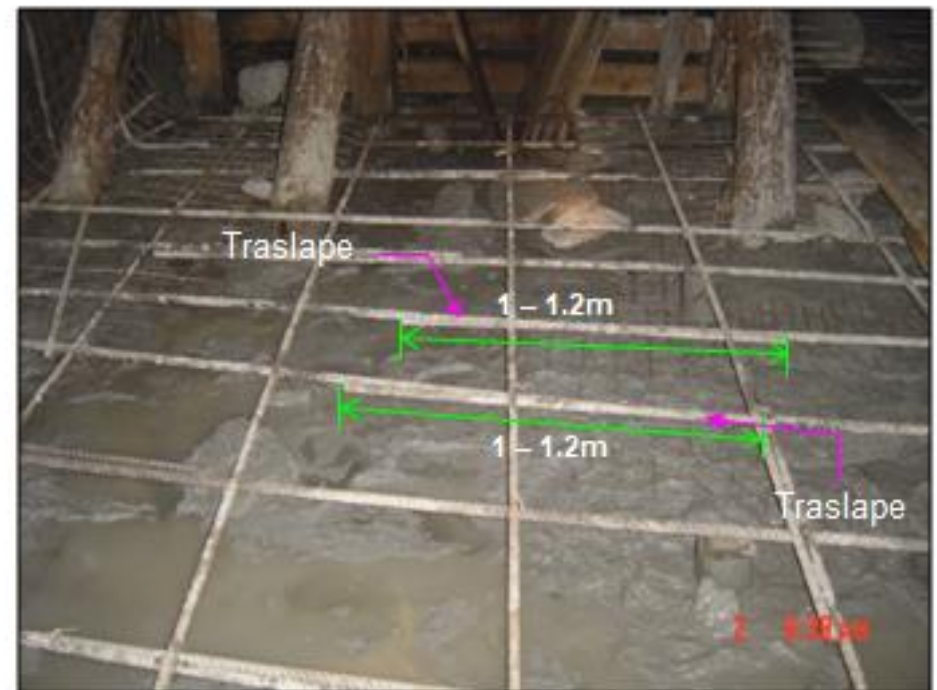


AMARRE DE ELES



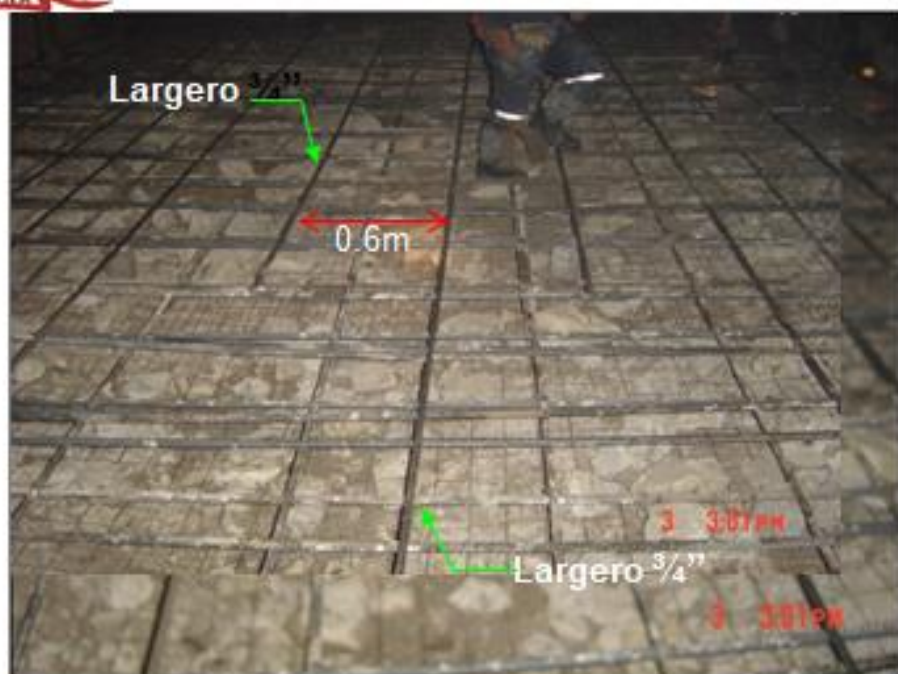
La secuencia es como sigue: Fierro inyectado, Ele, Ele y Fierro inyectado. Repitiendo la secuencia en todo el paño.

Acabando la distribución de Eles se procede al amarre de Eles, guardando distancias



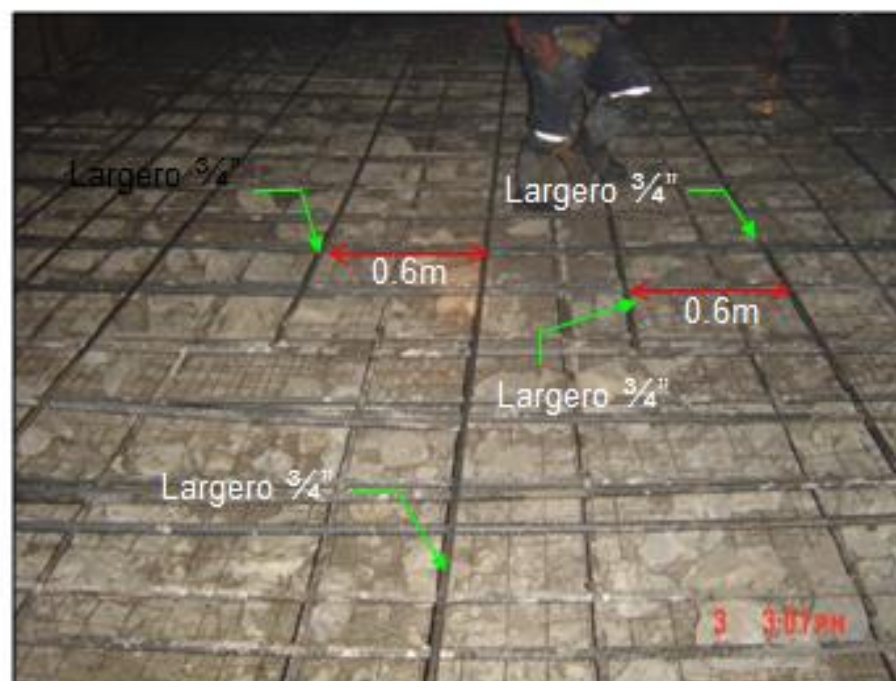


TENDIDO DE LARGEROS



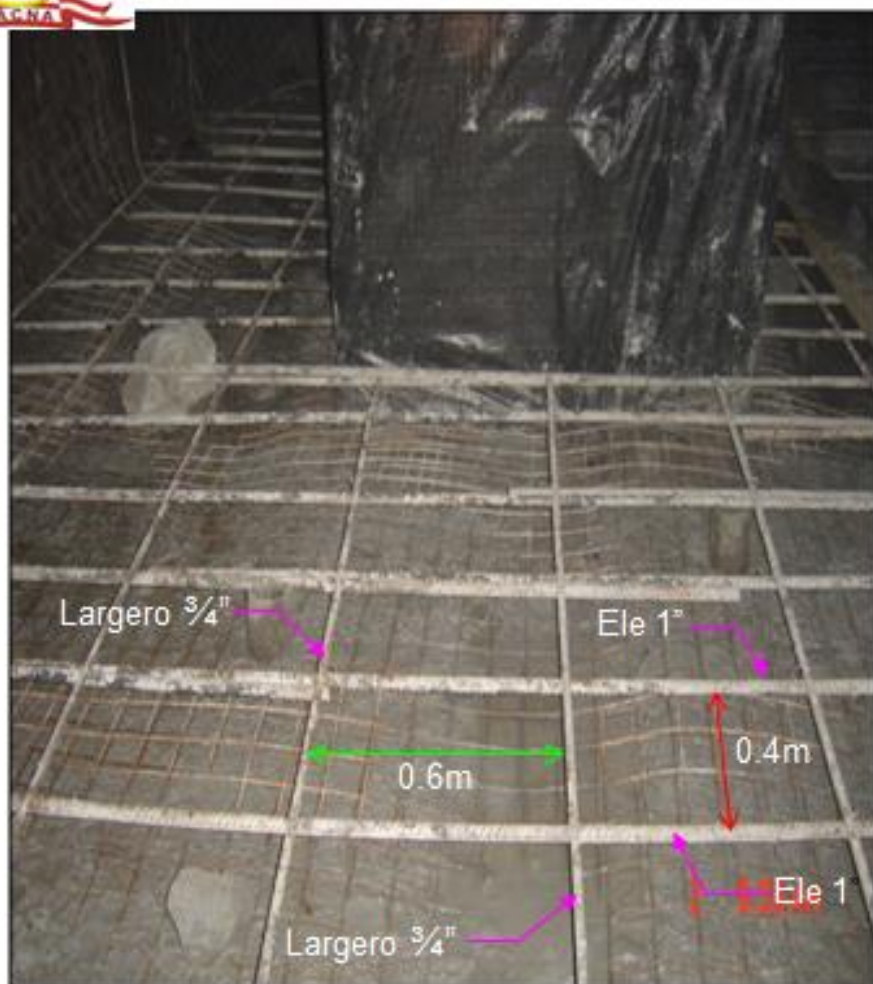
Los largeros son fierros corrugados de $\frac{3}{4}$ " que van colocados perpendicularmente y sobre las eles y los fierros inyectados de cada malla

El tendido de largeros se hace guardando distancias de 0.6m entre ellos





AMARRE DE LARGEROS



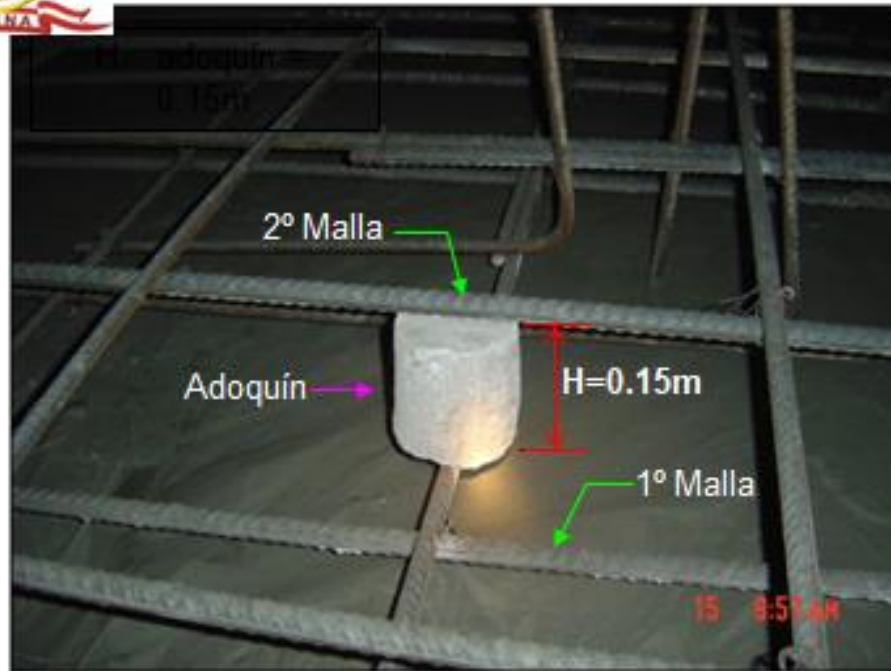
El amarre de largeros se realiza guardando distancias de 0.6m de largero a largero, para así formar cocadas de 0.4m x 0.6m.



Los largeros van sobre las Eles y los fierros inyectados tanto en la 1° malla como en la 2° malla.

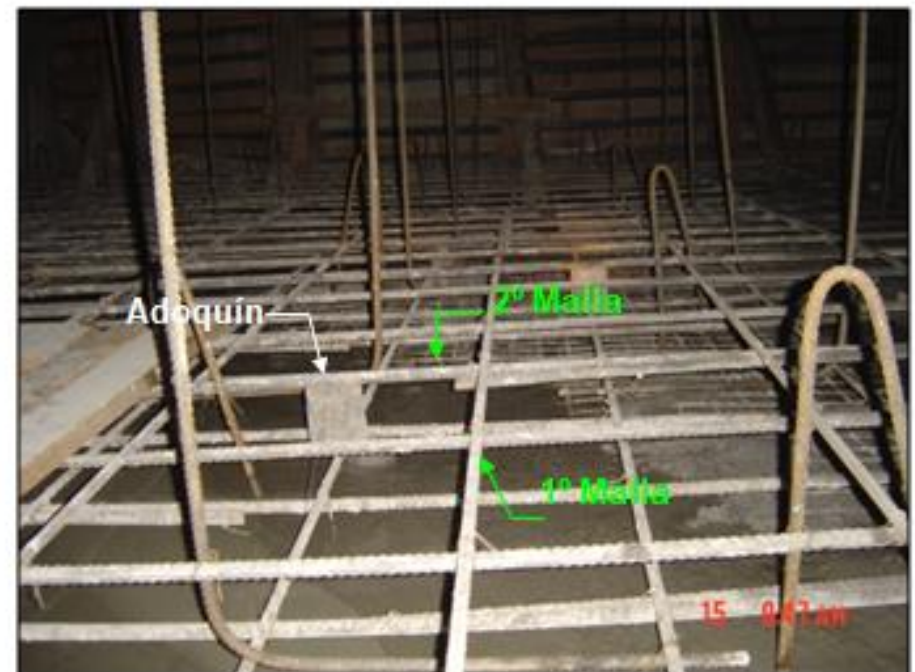


COLOCADO DE ADOQUINES



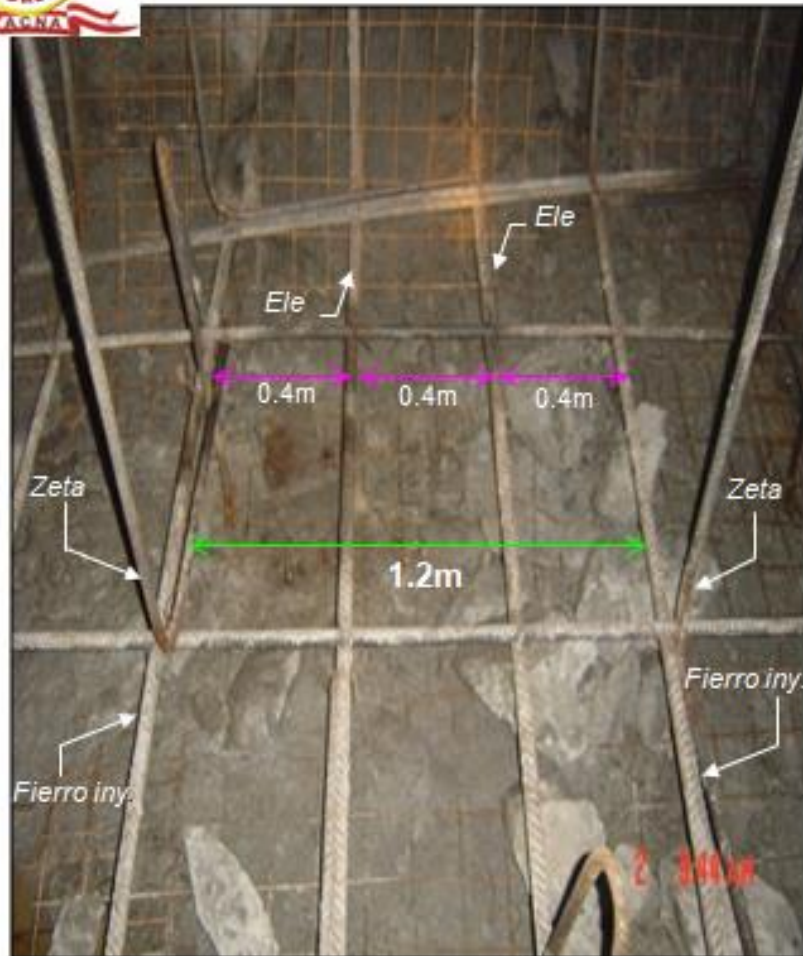
El adoquín va ubicado entre el piso de la labor y la 1º malla, de modo que mantiene la separación de 0.15m entre el nivel del piso y la 1º malla.

El adoquín también permite mantener el espacio de 0.15m entre la 1º y la 2º Malla.

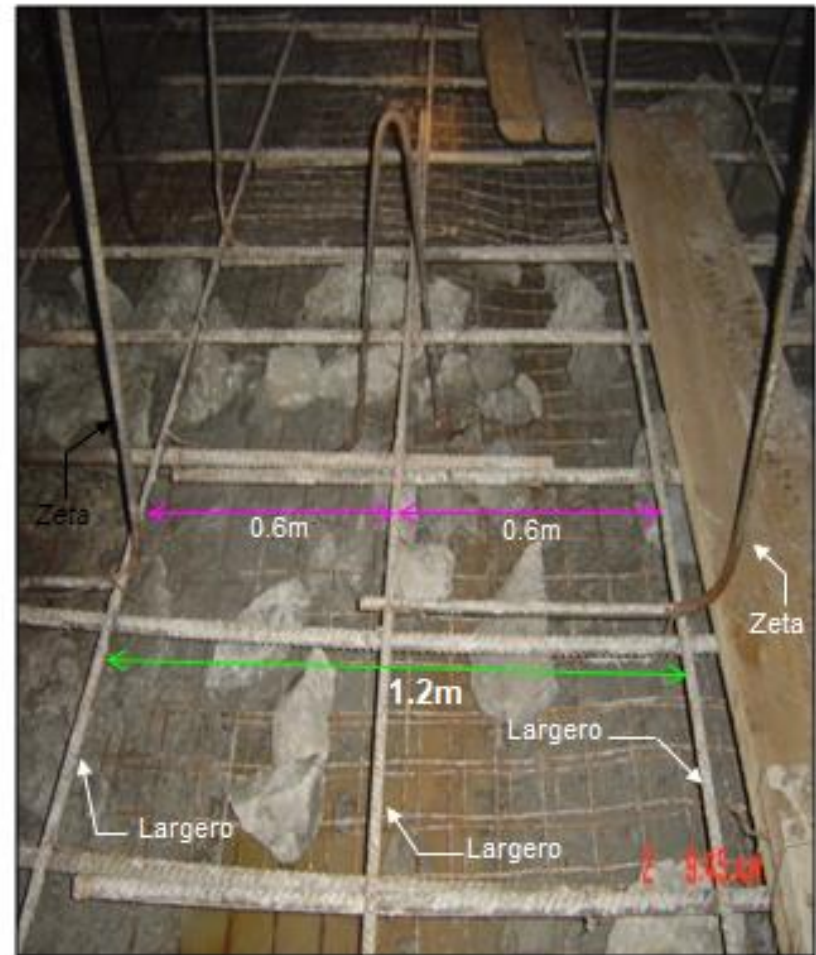




COLOCADO DE ZETAS

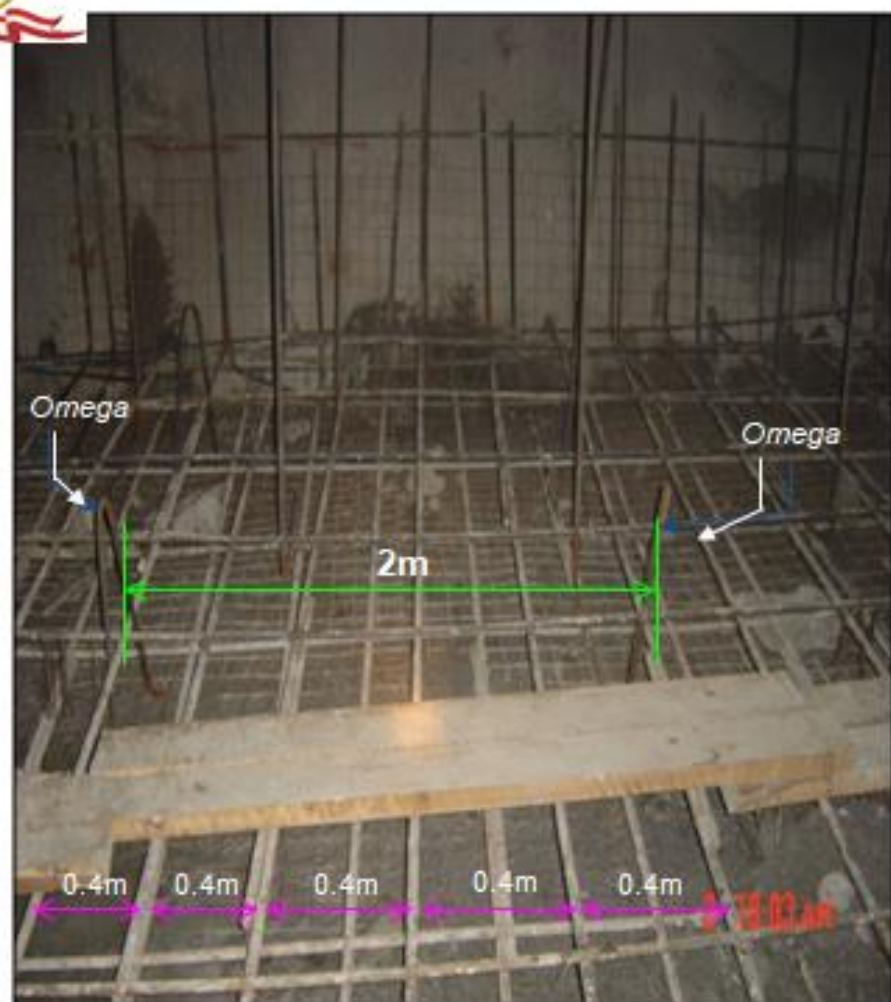


Las Zetas van colocadas distanciadas 1.2m de modo que en un área de $1.2m^2$ vayan 4 Zetas.



Las Zetas son colocadas en direcciones opuestas tanto en las filas como en las columnas de modo que formen una "U" las Zetas que son opuestas.

COLOCADO DE OMEGAS



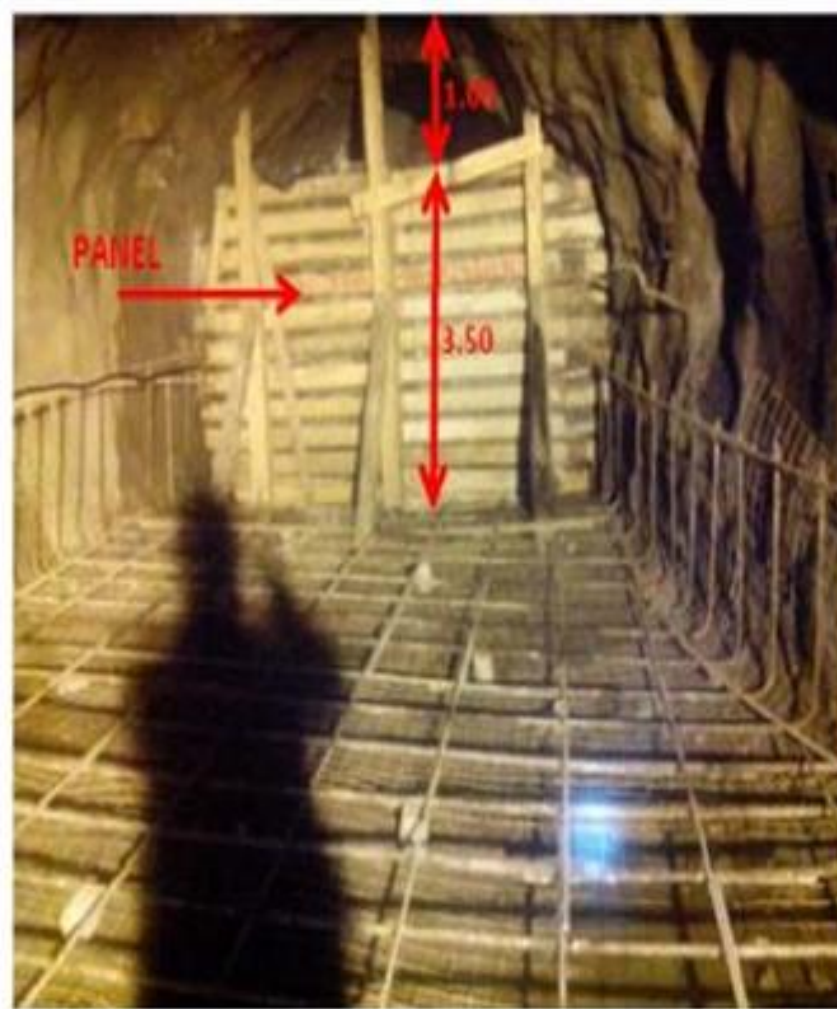
Las Omegas van distanciadas cada 2 m. de modo que la separación entre estos elementos son separados cada 5 cocadas con distancias de 0.4m c/u.



Las omegas van colocadas en medio de las líneas donde se encuentran las Zetas.

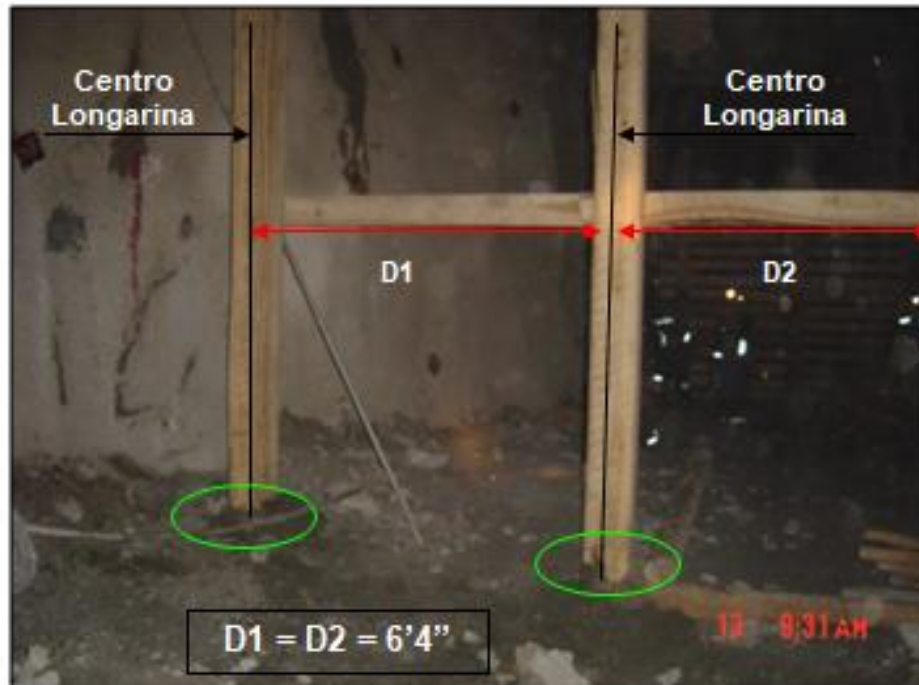


Encofrado o tabique actual de las losas





- La distancia de 6' 4", de centro a centro es para tener una distancia de 7 Pies de extremo a extremo de los postes, el cual será el espacio donde serán colocadas las tablas de 7 pies.



- La distancia de centro a centro de cada poste es de 6' 4", además deben guardar un alineamiento homogéneo.



CEMENTADO DE PATILLAS



Luego del parado de postes se procede al cementado de patillas

El cementado se realiza con una mezcla rica de cemento y detritus.





ENREJADO



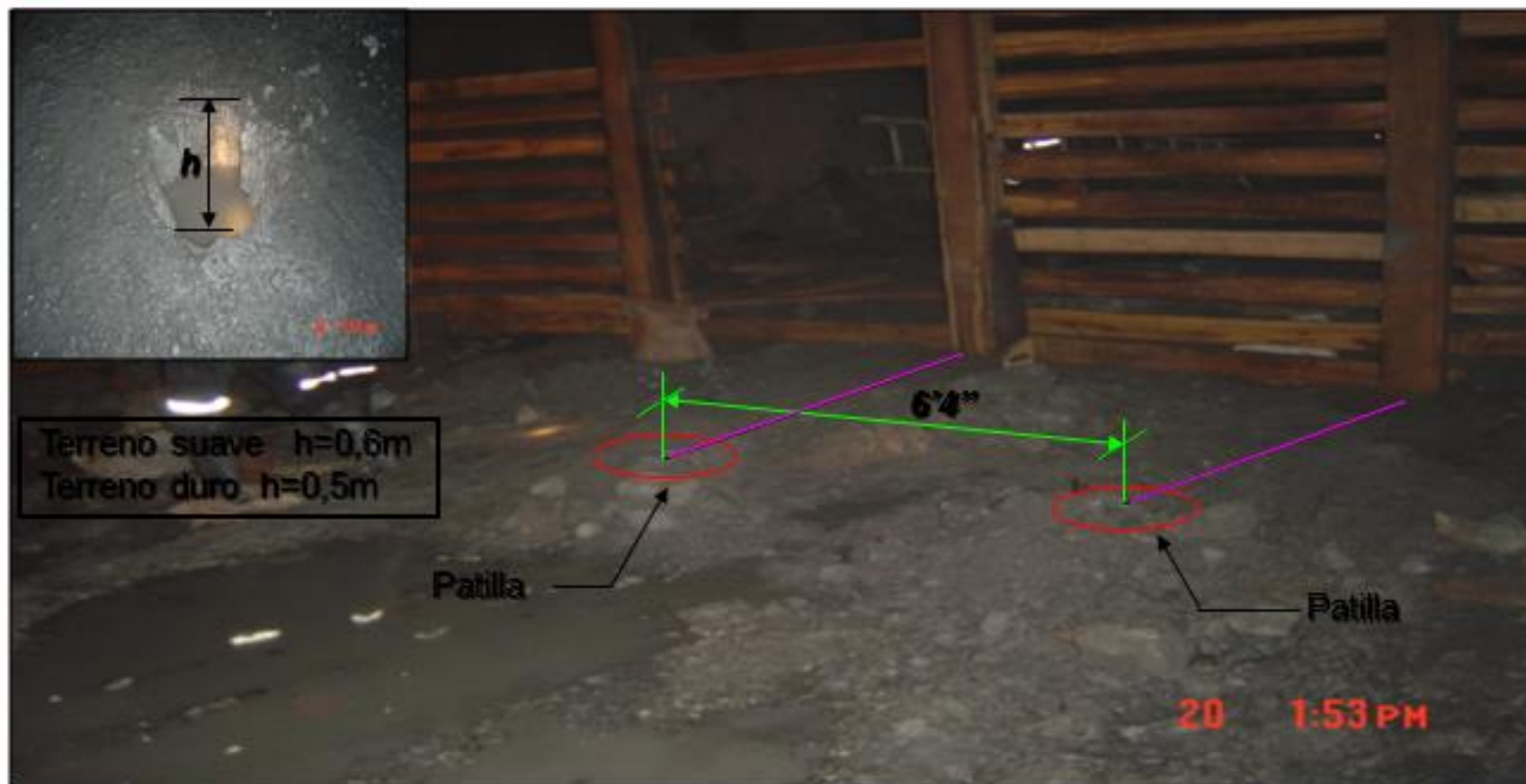
La distancia estándar de separación de tabla a tabla es de 3''.

- El traslape no debe sobrepasar el ancho de la longarina, el traslape es de 8''.





ELABORACIÓN DE PATILLA PARA ÁNGULOS

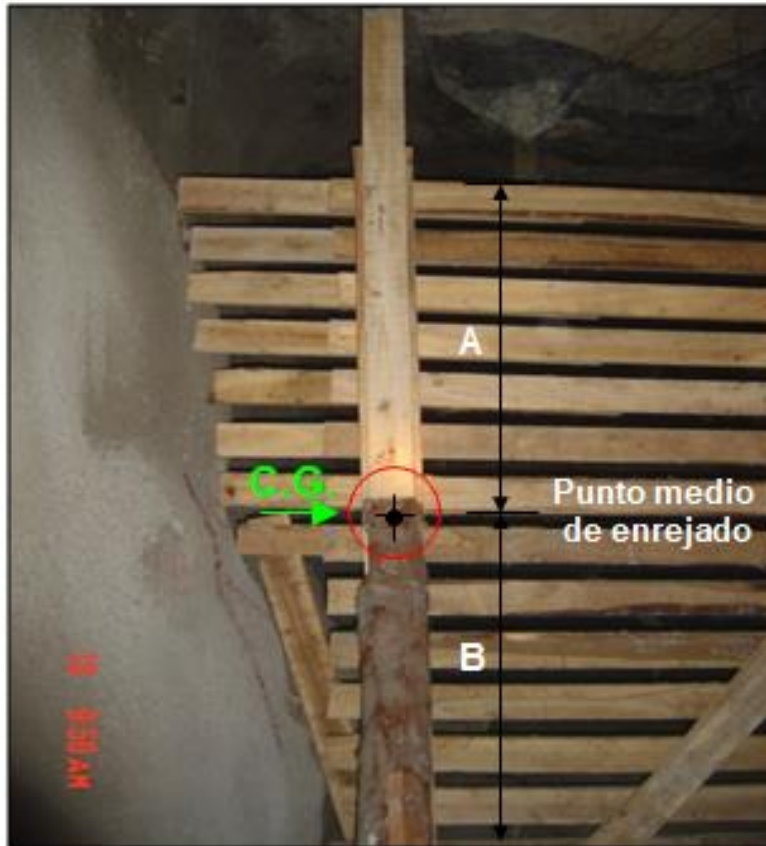


- El diámetro de las patillas para ángulos no debe sobrepasar de 0.4 m.
- La profundidad de patillas depende de la dureza del terreno:

Terreno suave $H=0.6m$
Terreno duro $H=0.5m$.



COLOCADO DE ÁNGULOS DE 45°



- El ángulo debe estar colocado en el CG, cuya ubicación es en el punto medio del enrejado, la altura del enrejado es la distancia que existe entre la 1° y la 14° tabla.



- La inclinación del redondo debe ser de 45°, dicha inclinación hace que los ángulos trabajen eficientemente.



CEMENTADO DE PATILLAS DE ÁNGULOS

- En el cementado de patillas se mezclan el cemento con material detrítico fino que se encuentran en las labores.



- En la figura se observa el instante que se cementan las patillas.



COLOCADO DE PLANTILLAS DE 7 PIES (CHAPAS)



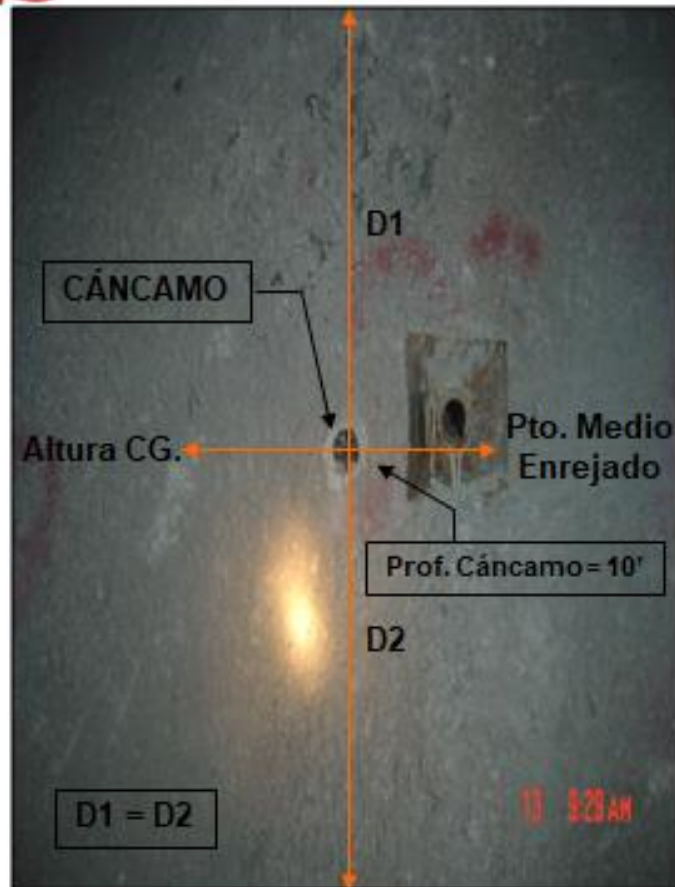
Las plantillas que se utilizan son tablas de 2"x6"x7", que son colocadas en la parte superior de los ángulos



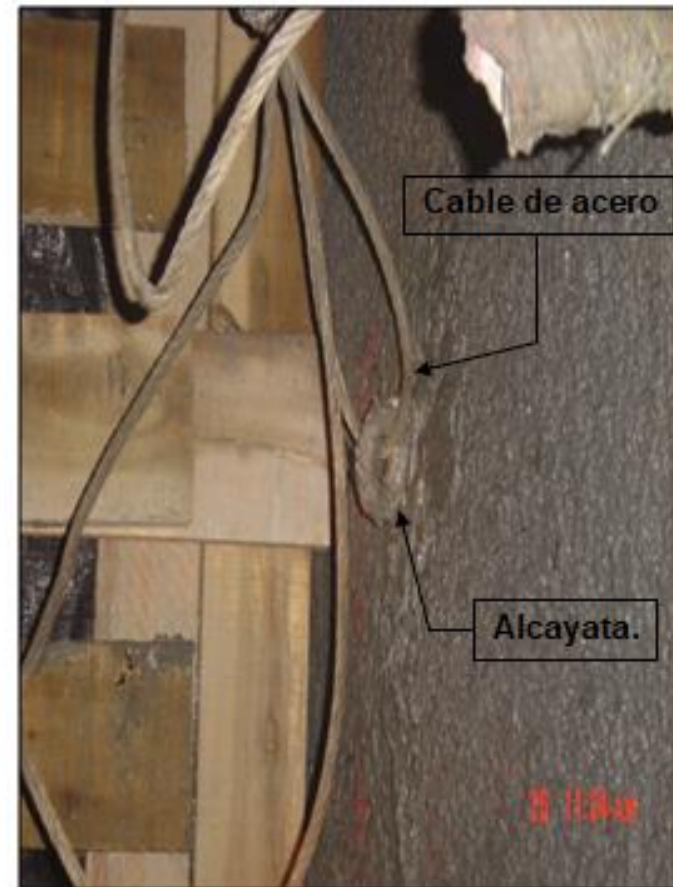
Las plantillas sirven para evitar que el ángulo se desplace hacia arriba producto de la presión del relleno.



COLOCADO DE CABLE



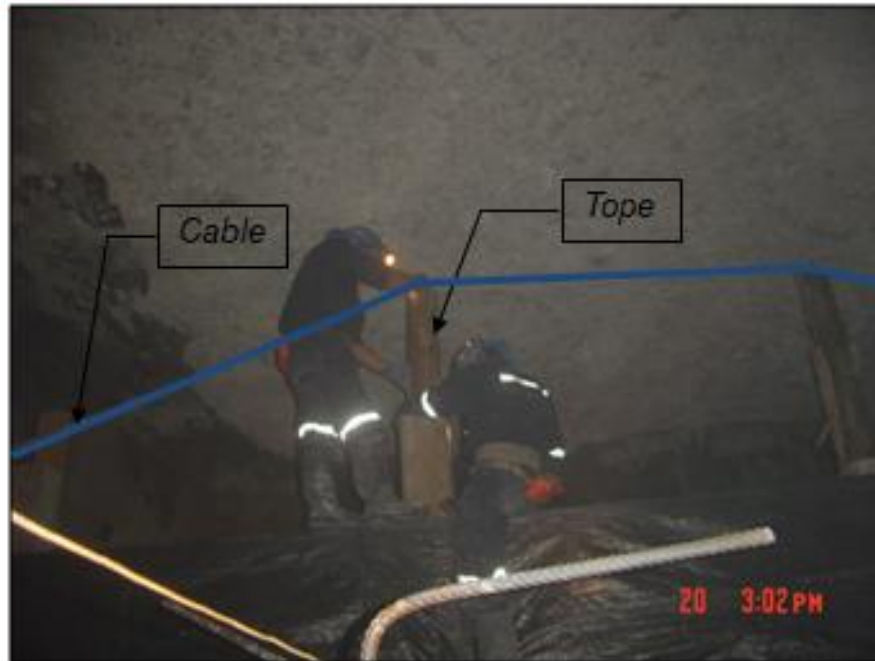
- Los cáncamos van ubicados a la altura del CG del esfuerzo, que está ubicado en el punto medio del enrejado.
- La profundidad de los cáncamos son de 10 Pies.



- Las alcayatas van colocadas en los cáncamos.
- El cable de acero es amarrado en las argollas de las alcayatas.

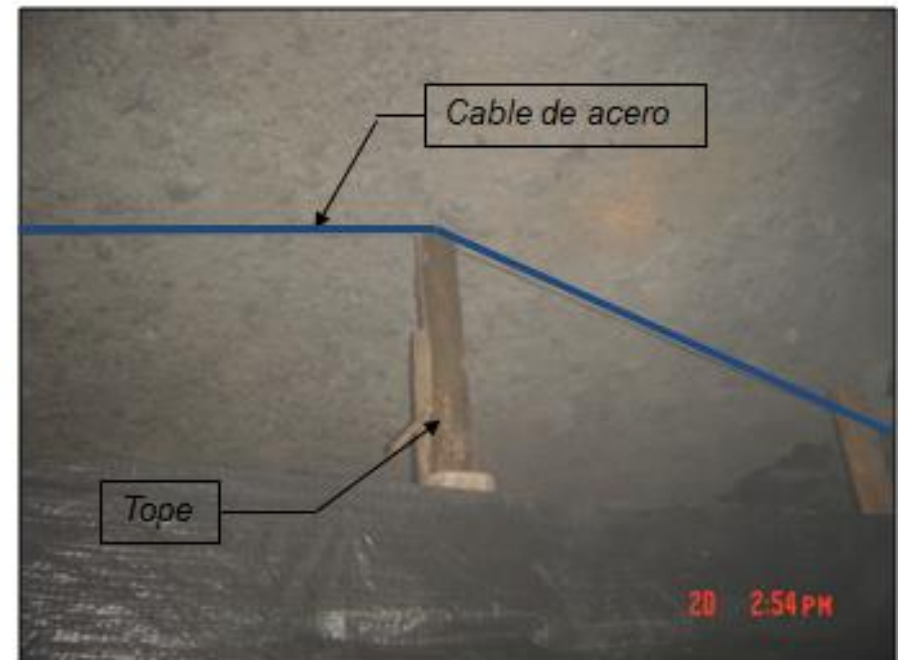


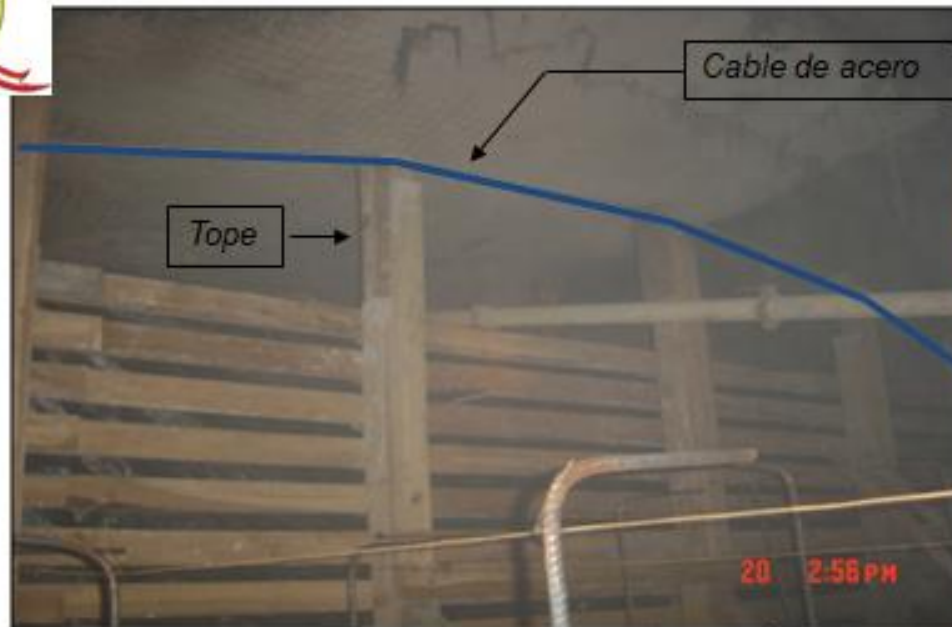
COLOCADO DE TOPES



Después de colocar las alcayatas y amarrar el cable a ellas, se procede a colocar los topes a presión, dando de esta manera una forma cónica al cable de acero.

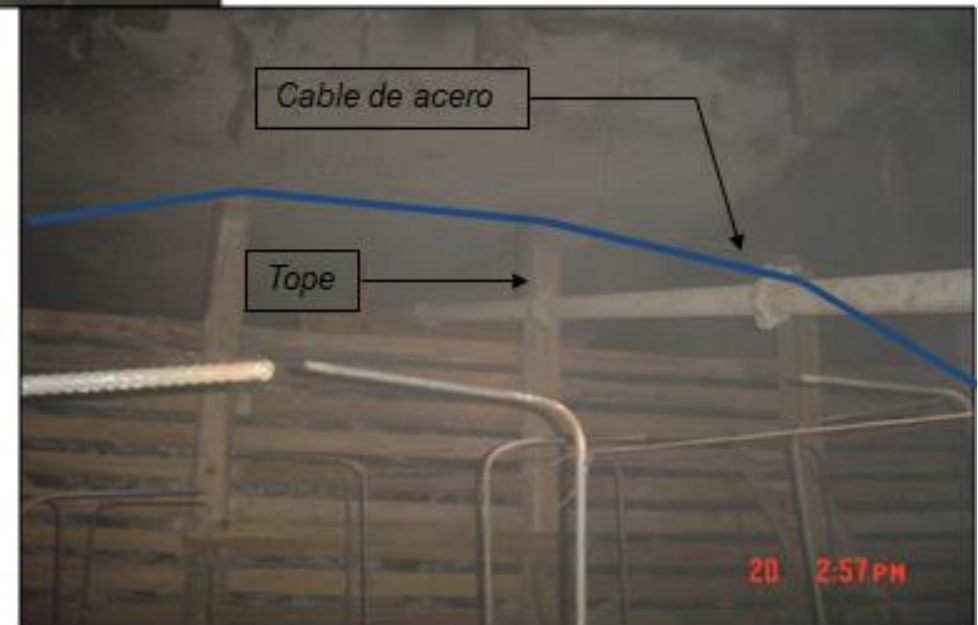
Tope colocado a presión, dando forma cónica al cable de acero.





En la figura se observa la forma cónica que toma el cable de acero, después de haber colocado los topes.

El cable evita que la barrera se levante por la presión que ejerce la loza, si tiene forma cónica permite que todos los topes trabajen equitativamente.



REVESTIMIENTO DE TELA ARPILLERA



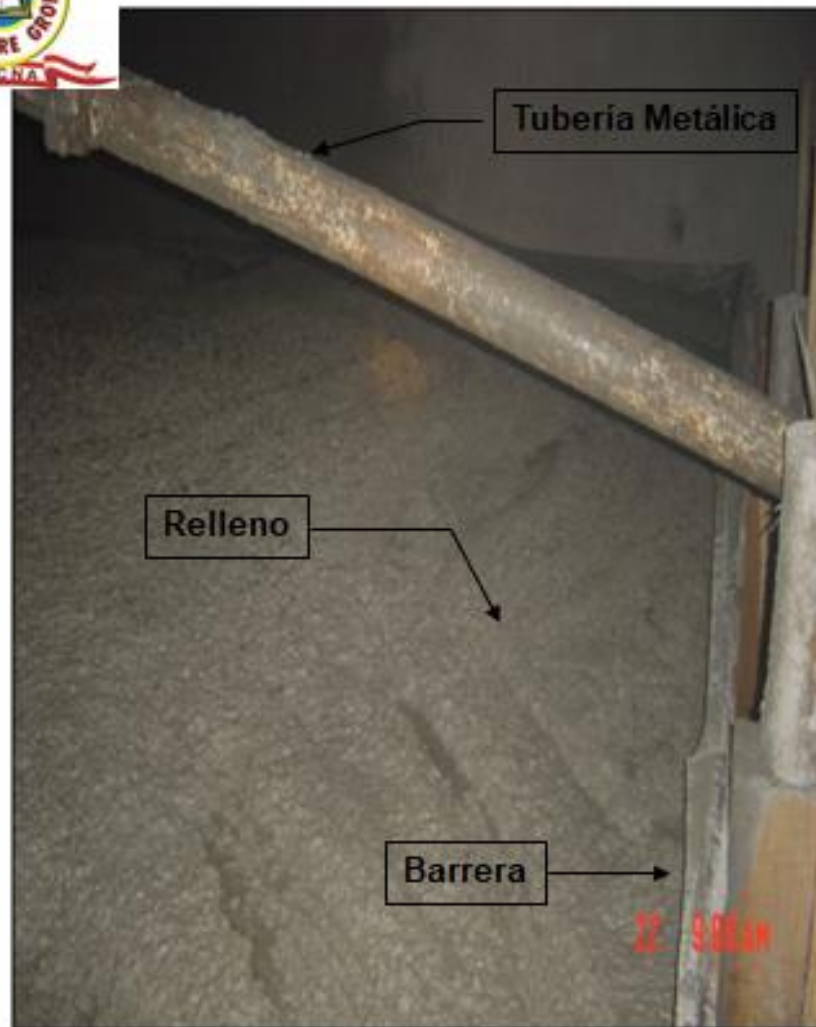
- La tela arpillera se coloca delante del enrejado de la barrera.



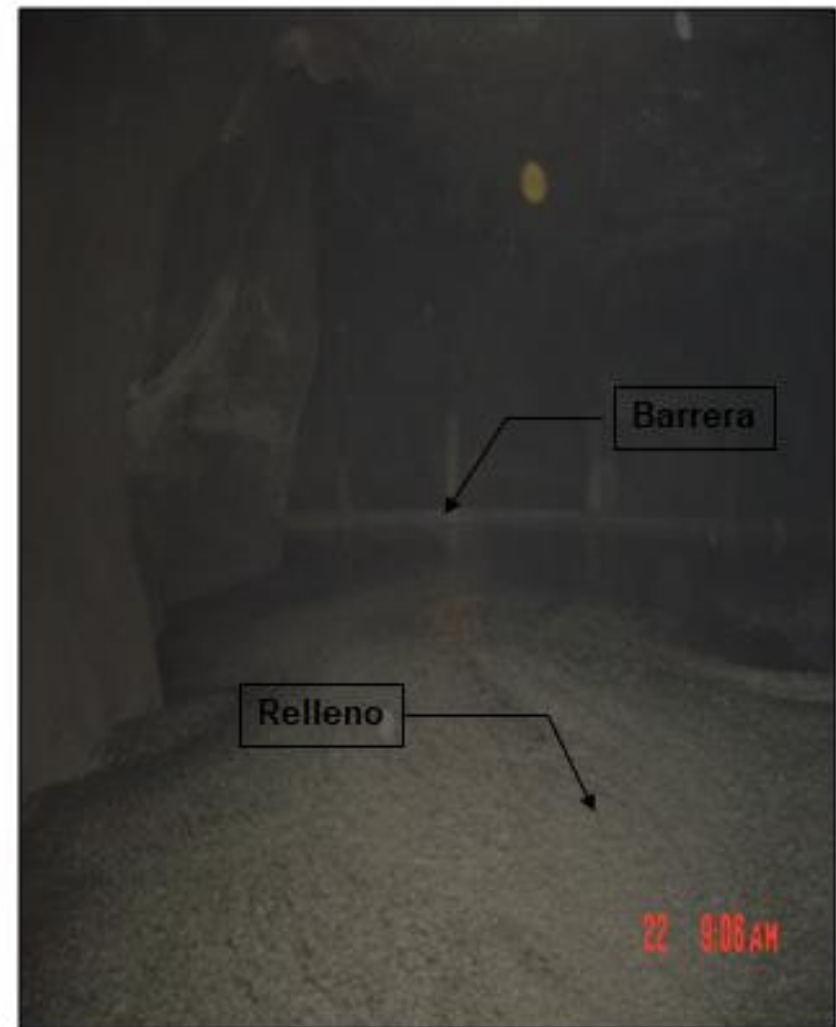
- La tela arpillera sirve para acumular el relleno dentro de los límites de la barrera.



RELLENADO FINAL



- Luego de culminar con la barrera, con el enmallado de fierros e instalación de tubería se procede al relleno del paño.



- El relleno es el último procedimiento de la elaboración de nuestro producto, si el armado de barreras y el enfierrado son trabajos de calidad, no habrá ningún problema en la etapa del relleno.



RELLENADO FINAL

