

UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TÚNEL DE RECUPERACIÓN MINERO EN FORMA RECTANGULAR Y DE ARCO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

NICOLÁS ORLANDO ALVARADO PIZARRO

PROFESOR GUÍA: ELIZABETH PARRA HENRÍQUEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CLAUDIO CANTEROS GORMAZ HORACIO PINOCHET VEJAR

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil con Mención en Estructuras y Construcción. POR: Nicolás Orlando Alvarado Pizarro FECHA: 07/07/2017 PROFESOR GUÍA: Elizabeth Parra Henríquez.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TÚNEL DE RECUPERACIÓN MINERO EN FORMA RECTANGULAR Y DE ARCO

La significativa reducción de la inversión en proyectos mineros producto de la desaceleración económica del país, ha generado la necesidad de optimizar los procesos internos en las empresas del rubro, cuya finalidad es la de reducir costos en sus proyectos futuros, tales como: costos operacionales y costos de valor de inversión. Una de las inversiones relevantes en todo proyecto minero corresponde a los túneles de recuperación, ubicados debajo de grandes pilas de acopio, cuya función es extraer el material de estas, gradualmente, para enviarlo hacia el exterior. Debido a las solicitaciones a las cuales, usualmente, se encuentra sometido y al tipo de geometría que tradicionalmente poseen, las dimensiones y cantidad de materiales resultan generalmente elevados afectando no solo los costos directos, sino también sus tiempos constructivos.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar dos propuestas de túneles de recuperación, uno con forma rectangular y otra de arco, desde el punto de vista técnico y económico. Para el desarrollo de estas propuestas se realizará un estudio acabado de las cargas a las cuales se verá afecto el túnel durante su vida útil. Definidas estas, se procederá a realizar un análisis estructural por medio de dos programas diferentes de elementos finitos para ambas formas propuestas con la intención de comparar resultados. Además, se realizará un estudio acerca de los métodos de diseño sísmico para este tipo de estructuras basado en lo que se utiliza en la industria chilena. Por último, se diseñarán y luego analizarán comparativamente 2 propuestas de túneles de recuperación, una rectangular y otra de acto, desde el punto de vista de la factibilidad técnica y económica.

Con esto se persigue desarrollar un estudio acabado para estructuras enterradas debajo de una pila, la que tendrá como consecuencia la generación de dos propuestas de túneles de recuperación que puedan utilizarse como referencia para cualquier proyecto futuro de minería que los requiera.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo en primer lugar a Dios por haber cumplido este tan importante sueño, siendo él quien puso en mi camino las oportunidades y, me entrego la entereza, la voluntad y la confianza para aprovecharlas. Sin esto, y las personas que dispuso en el camino el resultado no hubiese sido el mismo, por lo tanto, solo queda agradecerles por haber participado de alguna u otra forma a lo largo de mi formación.

A mi familia por su confianza y cariño que me han estregado a lo largo de mi vida. A mis padres que con su apoyo, valores y preocupación de que nada me faltase hicieron todo lo que estuvo en sus manos para ayudarme en lo que necesitara.

A mis amigos del San Ignacio y ahora de la vida, los Pelotudos. Gracias por la amistad incondicional y momentos de distención que los han hecho y espero que sigan siendo una de las partes más importantes de mi vida.

A toda la gente que conocí en la universidad y que participo a lo largo de mi proceso aportando con sus conocimientos, amistad y vida universitaria para hacer de esta una de las épocas más significativas de mi vida. Especiales gracias a mis amigos de primer año, grupo que a lo largo de los años creció en amigos y recuerdos que siempre quedarán. A mis amigos civiles quienes estuvieron conmigo en todas hasta el final de la carrera aportando siempre en apoyo y conocimientos.

Por último, y no menos importante, a mis profesores de la comisión, que me dieron la oportunidad de realizar esta tesis y que, con su paciencia y sabiduría, me permitieron finalizarla.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	. Motivación	1
1.2.	2. Objetivos	2
1	1.2.1. Generales	2
1	1.2.2. Específicos	2
1.3.	8. Metodología	3
1	1.3.1. Estudio del Comportamiento del Terreno	3
1	1.3.2. Desarrollo de los Modelos de Túneles de Recuperación	
1	1.3.3. Análisis Sísmico	4
1	1.3.4. Análisis Comparativo de los Modelos	4
1	1.3.5. Diseño de las Propuestas	4
2.	ANTECEDENTES	5
2.1.	l. Introducción General	5
2.2.	2. Túneles de Recuperación	5
2.3.	3. Diseño de Túneles de Recuperación	6
2.4.	I. Perfil de Presiones Bajo una Pila	7
2.5.	5. Diseño Sísmico en Estructuras Enterradas	
2	2.5.1. Manual de Carreteras	
	2.5.1.1. Método Detallado	15
	2.5.1.2. Método Aproximado	
	2.5.1.3. Método Simplificado	
2	2.5.2. NCh433 Anexo C	
2	2.5.3. Métodos con Registros	23
3.	MODELACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS	
3.1.	l. Introducción	24
3.2.	2. Bases de la Modelación	24
3	3.2.1. Descripción de los Túneles	
3	3.2.2. Materiales	25
3	3.2.3. Características del Terreno	25
3	3.2.4. Características del Acopio	26
3	3.2.5. Cargas Solicitantes	
	3.2.5.1. Cargas Muertas	

3.2.5	5.2. Cargas Vivas	28
3.2.5	5.3. Cargas Laterales	29
3.2.5	5.4. Cargas Sísmicas Horizontales	29
3.2.5	5.5. Cargas Sísmicas Verticales	29
3.2.5	5.6. Cargas de Nieve	29
3.2.5	5.7. Cargas de Viento	
3.2.5	5.8. Cargas por Temperatura	
3.2.6.	Combinaciones de Carga	
3.2.6	6.1. Diseño del Hormigón	
3.2.6	6.2. Estabilidad de Fundaciones y Tensiones del Suelo	
3.3. N	Modelos en Sap2000	
3.3.1.	Modelo Rectangular	35
3.3.2.	Modelo en Forma de Arco	
3.3.3.	Cargas Solicitantes	39
3.3.4.	Cálculo de la Constante de Balasto	43
3.3.5.	Metodología de Mediciones	44
3.3.5	5.1. Túnel Rectangular	44
3.3.5	5.2. Túnel en Forma de Arco	47
3.4. N	Nodelos en Plaxis	
3.4.1.	Modelo Rectangular	50
3.4.1	1.1. Constitución del Modelo	50
3.4.1	1.2. Ejecución del Modelo	52
3.4.2.	Modelo en Forma de Arco	53
3.4.2	2.1. Constitución del Modelo	53
3.4.2	2.2. Ejecución del Modelo	55
3.4.3.	Cargas Solicitantes	56
3.4.4.	Metodología de Mediciones	60
2 5 4	Análicia Cíamica	61
5.5. A		
4. RES	SULTADOS	
41 M	Modelos en San2000	62
4.1.1	Constante de Balasto Estáticas	62
4.1.2	Modelo Rectangular en San2000	63
4.1.2.	2 1 Pesultados en la Dirección Principal	
4.1.2	2.1. Resultados en la Dirección Francyorsal	03. د م
4.1.2	Nedele con Forma do Arco on San2000	04 ¢1
4.1.5.	Modelo con Forma de Arco en Sap2000	04 ¢1
4.1.3	3.1. Resultados en la Dirección Transversal 2.2. Desultados en la Dirección Transversal	64
4.1.3	5.2. Resultados en la Dirección Transversal	65
4.1.4.	Capacidad de Portante del SUEIO	
Capa –	acidad admisible de soporte del suelo	
Tens	siones dei Sueio	66
4.2. M	Nodelos en Plaxis	
4.2.1.	Modelo Rectangular	
	5	

4.2.	2. Modelo con Forma de Arco	67
4.2.	3. Capacidad de Portante del Suelo	68
4.3.	Análisis Sísmico	
4.3.	1. Resultados del Análisis Sísmico	
4.3.	2. Esfuerzos Internos de Cargas Sísmicas	72
4.4.	Análisis Comparativo de los Modelos	73
4.4.	1. Comparación por Forma	
4.4.	2. Comparación de Programas	
4.4.	3. Influencia de las Cargas Sísmicas en el Diseño	75
5. C	DISEÑO ESTRUCTURAL DE LAS PROPUESTAS	
5.1.	Introducción General	78
5.2.	Criterios de Diseño	79
5.3.	Diseño de Propuestas	
5.4.	Modelo Rectangular	
5.4.	1. Esfuerzos de Diseño	
5.4.	2. Diseño Estructural	
5.5.	Modelo en Forma de Arco	
5.5.	1. Esfuerzos de diseño	
5.5.	2. Diseño Estructural	
5.6.	Cotización y Resumen de las Propuestas	91
F 7	Verificaciones de les Medeles	02
5. /.	1 Canacidad da Dartanta dal Suala	
5.7. C	Canacidad admisible de sonorte del suelo	
т	Capacidad admissible de soporte del suelo	95
57	2 Deformaciones Admisibles	4
5.7.	5721 Túnel Rectangular	95
5	5.7.2.2. Túnel en Forma de Arco	
6 (08
U. (
6.1.	Estudio de las Cargas Estáticas y Dinámicas	
6.2.	Comparación de Resultados entre Plaxis y Sap2000	
6.3.	Comparación de Resultados por Geometría	
6.4.	Análisis de las Propuestas	
6.5.	Consideraciones a Tener en Cuenta	

GLOSA	RIO		103
BIBLIO	GRAF	ÍA	108
ANEXO	A.	RESULTADOS MODELO ESTÁTICO EN SAP2000	110
A.1.	Túne	l en Forma Rectangular	110
A.2.	Túne	l en Forma Rectangular – Sección Transversal	111
A.3.	Túne	l en Forma de Arco	112
A.4.	Túne	l en Forma de Arco – Sección Transversal	113
ANEXO	В.	RESULTADOS MODELO ESTÁTICO EN PLAXIS	114
B.1.	Túne	l en Forma Rectangular	114
B.2.	Túne	l Forma de Arco	115
ANEXO	C.	RESULTADOS FINALES DE DISEÑO EN SAP2000	116
C.1.	Túne	l en Forma Rectangular	116
C.2.	Túne	l en Forma Rectangular – Sección Transversal	117
C.3.	Túne	l en Forma de Arco	118
C.4.	Túne	l en Forma de Arco – Sección Transversal	119
ANEXO	D.	RESULTADOS FINALES DE DISEÑO EN PLAXIS	120
D.1.	Túne	l en Forma Rectangular	120
D.2.	Túne	l en Forma de Arco	121
ANEXO	E.	ESFUERZOS FINALES DE DISEÑO DE PROPUESTAS	122
E.1.	Túne	l en Forma Rectangular	122
E.2.	Túne	l en forma de Arco	123
ANEXO	F.	DISEÑO ESTRUCTURAL	124

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1	LIMITACIONES DE ANCHO PARA MÉTODOS DEL MANUAL DE CARRETERAS.	15
TABLA 2-2	COEFICIENTE DE CORTE MÁXIMO PARA PEQUEÑAS DEFORMACIONES	17
TABLA 2-3	Factor de rigidez sísmica para fundaciones superficiales.	18
TABLA 2-4	Desangulación sísmica	20
TABLA 2-5	FACTOR DE RIGIDEZ FR	21
TABLA 3-1	Ногмідо́л G30	25
TABLA 3-2	Acero A630-420H	25
TABLA 3-3	PROPIEDADES DEL TERRENO.	25
Tabla 3-4	VALORES DE ACELERACIÓN MÁXIMA DEL SUELO Y ACELERACIÓN MÁXIMA EFECTIVA	26
Tabla 3-5	DIMENSIONES DE LA PILA.	26
Tabla 3-6	PROPIEDADES DE LAS PLACAS DEL TÚNEL RECTANGULAR.	51
Tabla 3-7	PROPIEDADES DE LAS PLACAS DEL TÚNEL EN FORMA DE ARCO	54
Tabla 3-8	RESUMEN DE VALORES UTILIZADOS EN LOS MODELOS DE PLAXIS.	59
Tabla 3-9	DISTANCIAS PARA MEDICIÓN DEL CORTE	50
Tabla 4-1	DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE BALASTO PARA EL TÚNEL RECTANGULAR	52
TABLA 4-2	Constante de Balasto para túnel rectangular	52
TABLA 4-3	DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE BALASTO PARA EL TÚNEL RECTANGULAR	53
TABLA 4-4	Constante de Balasto para túnel en forma de arco	53
Tabla 4-5	RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL RECTANGULAR. DIRECCIÓN PRINCIPAL.	63
TABLA 4-6	RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL RECTANGULAR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	54
TABLA 4-7	RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL EN FORMA DE ARCO. DIRECCIÓN PRINCIPAL.	54
TABLA 4-8	RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL EN FORMA DE ARCO. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.	65
Tabla 4-9	RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL RECTANGULAR EN PLAXIS. DIRECCIÓN PRINCIPAL	67
TABLA 4-10	RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL EN FORMA DE ARCO EN PLAXIS. DIRECCIÓN PRINCIPAL	67
TABLA 4-11	RESORTES VERTICALES	59
Tabla 4-12	Resultados método detallado en losa superior e inferior. No considera carga de la pila 69	•
Tabla 4-13	Resultados método detallado en losa superior e inferior. Considera la carga de la pila. 69	
Tabla 4-14	Resultados método aproximado en losa superior e inferior. No considera carga de la	
PILA.	70	
Tabla 4-15	RESULTADOS MÉTODO SIMPLIFICADO EN LOSA SUPERIOR E INFERIOR. NO CONSIDERA CARGA DE LA	
PILA.	70	
Tabla 4-16	RESULTADOS DE MÉTODO DE LA NCH433 PARA LOSA INFERIOR Y SUPERIOR. SIN MAYORAR	70
Tabla 4-17	Resultados de método de la NCH433 para losa inferior y superior. Valores mayorados	
POR 1,4	۰	70
TABLA 4-18	RESULTADOS DEL PLAXIS PRODUCTO DEL REGISTRO DE ESTACIÓN PISAGUA.	71

TABLA 4-19	Resultados finales método detallado con carga triangular considerando la pila. Tú	NEL
RECTAN	GULAR	72
TABLA 4-20	RESULTADOS FINALES MÉTODO DETALLADO CON CARGA TRIANGULAR CONSIDERANDO LA PILA. TÚ	NEL
EN FOR	MA DE ARCO	72
TABLA 4-21	Relación resultados entre forma rectangular y de arco. Sap2000	73
TABLA 4-22	Relación resultados entre forma rectangular y de arco. Plaxis	73
TABLA 4-23	Relación de resultados entre Sap2000 y Plaxis. Túnel rectangular	74
TABLA 4-24	Relación de resultados entre Sap2000 y Plaxis. Túnel en forma de arco	75
TABLA 4-25	Combinaciones que controlan en diseño. Túnel rectangular en Sap2000	76
TABLA 4-26	Combinaciones que controlan en diseño. Túnel en forma de arco en Sap2000	76
TABLA 4-27	Combinaciones que controlan en diseño. Túnel resctangular en Plaxis	77
TABLA 4-28	Combinaciones que controlan en diseño. Túnel en forma de arco en Plaxis	77
TABLA 5-1	CUANTÍAS DE ACERO PARA TÚNEL RECTANGULAR. PREDISEÑO	80
TABLA 5-2	CUANTÍAS DE ACERO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO. PREDISEÑO	80
TABLA 5-3	CUANTÍAS DE ACERO PARA TÚNEL RECTANGULAR. DISEÑO FINAL.	81
Tabla 5-4	CUANTÍAS DE ACERO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO. DISEÑO FINAL.	81
TABLA 5-5	Relación entre secciones del modelo rectangular en Sap2000. Losa superior borde	
ABERTU	RAS POR LOSA SUPERIOR CENTRAL	83
TABLA 5-6	RELACIÓN ENTRE SECCIONES DEL MODELO RECTANGULAR EN SAP2000. LOSA SUPERIOR BORDE CO	ORTE
POR LOS	SA SUPERIOR APOYOS	83
TABLA 5-7	RESULTADOS PARA EL DISEÑO DE LOSA SUPERIOR BORDE ABERTURAS	84
TABLA 5-8	RESULTADOS PARA EL DISEÑO DE LA LOSA SUPERIOR BORDE CORTE	84
TABLA 5-9	VALORES DE DISEÑO PARA TÚNEL RECTANGULAR. DIRECCIÓN PRINCIPAL.	85
TABLA 5-10	VALORES DE DISEÑO PARA TÚNEL RECTANGULAR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	85
TABLA 5-11	DISEÑO ESTRUCTURAL TÚNEL RECTANGULAR DIRECCIÓN PRINCIPAL.	86
TABLA 5-12	DISEÑO ESTRUCTURAL TÚNEL RECTANGULAR DIRECCIÓN TRANSVERSAL.	87
TABLA 5-13	VALORES DE DISEÑO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO. DIRECCIÓN PRINCIPAL.	88
TABLA 5-14	VALORES DE DISEÑO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.	89
TABLA 5-15	DISEÑO ESTRUCTURAL TÚNEL EN FORMA DE ARCO DIRECCIÓN TRANSVERSAL.	89
TABLA 5-16	DISEÑO ESTRUCTURAL TÚNEL EN FORMA DE ARCO DIRECCIÓN TRANSVERSAL.	90
TABLA 5-17	RESUMEN DE MODELO RECTANGULAR Y VOLUMEN DE HORMIGÓN.	91
TABLA 5-18	RESUMEN DE MODELO EN FORMA DE ARCO Y VOLUMEN DE HORMIGÓN.	91
TABLA 5-19	RESUMEN COSTO DE TÚNEL RECTANGULAR	92
TABLA 5-20	RESUMEN COSTO DE TÚNEL EN FORMA DE ARCO	92
TABLA A-1	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA SUPERIOR	110
TABLA A-2	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. MURO LATERAL.	110
TABLA A-3	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA INFERIOR.	111
TABLA A-4	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA SUPERIOR. SECCIÓN TRANSVERSAL.	111
TABLA A-5	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. MURO LATERAL. SECCIÓN TRANSVERSAL	111
TABLA A-6	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA INFERIOR. SECCIÓN TRANSVERSAL.	. 111

TABLA A-7	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. ARCO SUPERIOR.	112
TABLA A-8	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO LATERAL.	112
Tabla A-9	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA INFERIOR	112
TABLA A-10	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA SUPERIOR. SECCIÓN TRANSVERSAL	113
TABLA A-11	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO-ARCO. SECCIÓN TRANSVERSAL	113
TABLA A-12	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO LATERAL. SECCIÓN TRANSVERSAL	113
TABLA A-13	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA INFERIOR. SECCIÓN TRANSVERSAL	113
TABLA B-1	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR PLAXIS. LOSA SUPERIOR.	114
TABLA B-2	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR PLAXIS. MURO LATERAL	114
TABLA B-3	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR PLAXIS. LOSA INFERIOR	114
TABLA B-4	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. ARCO SUPERIOR	115
TABLA B-5	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. MURO LATERAL	115
TABLA B-6	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. LOSA INFERIOR	115
TABLA C-1	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA SUPERIOR	116
TABLA C-2	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. MURO LATERAL	116
TABLA C-3	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA INFERIOR	117
TABLA C-4	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA SUPERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	117
TABLA C-5	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. MURO LATERAL. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	117
TABLA C-6	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA INFERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	117
TABLA C-7	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. ARCO SUPERIOR	118
TABLA C-8	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO LATERAL	118
Tabla C-9	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA INFERIOR	118
TABLA C-10	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA SUPERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.	119
TABLA C-11	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO-ARCO. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.	119
TABLA C-12	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO LATERAL. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	.119
TABLA C-13	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA INFERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.	119
TABLA D-1	RESULTADOS MODELO EN RECTANGULAR PLAXIS. LOSA SUPERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	120
TABLA D-2	RESULTADOS MODELO EN RECTANGULAR PLAXIS. MURO LATERAL. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	120
TABLA D-3	RESULTADOS MODELO EN RECTANGULAR PLAXIS. LOSA INFERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	121
TABLA D-4	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. ARCO SUPERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	121
TABLA D-5	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. MURO LATERAL. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	121
TABLA D-6	RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. LOSA INFERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL	121
TABLA E-1	ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL RECTANGULAR. LOSA SUPERIOR.	122
TABLA E-2	ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL RECTANGULAR. MURO LATERAL.	122
TABLA E-3	ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL RECTANGULAR. LOSA INFERIOR.	123
TABLA E-4	ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL EN FORMA DE ARCO. ARCO SUPERIOR	123
TABLA E-5	ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL EN FORMA DE ARCO. MURO LATERAL.	123
Tabla E-6	ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL EN FORMA DE ARCO. LOSA INFERIOR.	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1	PRESIONES EN LA BASE AL FINAL DE CADA VACIADO.	7
FIGURA 2-2	PRESIONES EN LA BASE AL FINAL DE CADA RELLENO.	8
Figura 2-3	CARGA SOBRE EL ALIMENTADOR	9
Figura 2-4	EVOLUCIÓN DE LAS PRESIONES DURANTE FORMACIÓN DE LA PILA	. 10
Figura 2-5	DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES NORMALIZADO POR LA ALTURA.	. 10
Figura 2-6	COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS REALIZADOS CON FEM FRENTE A LOS EXPERIMENTALES DE OO	I
(2008)		. 11
Figura 2-7	Comparación experimento de Conley (2012) con arena fina, método predictivo y ecuad	CIÓN
EMPÍRIC	А	. 12
Figura 2-8	REPRESENTACIÓN DEL MÉTODO DETALLADO.	. 16
Figura 2-9	COEFICIENTE DE CORTE SÍSMICO NORMALIZADO PARA SUELOS GRANULARES	. 17
FIGURA 2-10	APROXIMACION LINEAL DE LA DESANGULACION SISMICA.	. 18
FIGURA 2-11	DESANGULACIÓN SÍSMICA PROMEDIO DEL SUELO	. 20
FIGURA 2-12	MÉTODO SIMPLIFICADO	. 22
Figura 3-1	CURVA DE PRESIONES BAJO LA PILA Y CURVA ENVOLVENTE DE PRESIONES	. 27
Figura 3-2	MODELO ELABORADO EN SAP2000 DE TÚNEL DE RECUPERACIÓN RECTANGULAR	. 35
Figura 3-3	VISTA DE FRENTE DE MODELO RECTANGULAR EN SAP2000.	. 36
Figura 3-4	MODELO REALIZADO EN SAP2000 DE TÚNEL DE RECUPERACIÓN RECTANGULAR	. 37
Figura 3-5	VISTA DE FRENTE DE MODELO EN FORMA DE ARCO EN SAP2000	. 38
Figura 3-6	DIAGRAMA DE MOMENTO SOBRE SECCIÓN DE LOSA SUPERIOR. COMBINACIÓN C1	. 44
Figura 3-7	DIAGRAMA DE MOMENTO SOBRE UNA ABERTURA EN LA LOSA SUPERIOR. COMBINACIÓN C1	. 45
Figura 3-8	DIAGRAMA DE MOMENTO SOBRE UNA ABERTURA EN EL MURO. COMBINACIÓN C1	. 45
Figura 3-9	DIAGRAMA DE MOMENTO SOBRE UNA ABERTURA EN LA LOSA INFERIOR. COMBINACIÓN C1	. 46
FIGURA 3-10	REPRESENTACIÓN SECCIONES TÚNEL EN FOMRA DE ARCO	. 47
FIGURA 3-11	REPRESENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE ESTUDIO EN SAP2000	. 50
FIGURA 3-12	DISPOSICIÓN DE LA CARGAS DEL ACOPIO PARA TÚNEL RECTANGULAR.	. 51
Figura 3-13	MODELO COMPLETO TÚNEL DE RECUPERACIÓN RECTANGULAR.	. 52
FIGURA 3-14	REPRESENTACION TÚNEL EN FORMA DE ARCO EN SAP2000	. 53
FIGURA 3-15	DISPOSICIÓN DE LA CARGA DEL ACOPIO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO.	. 54
Figura 5-1	REPRESENTACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE LOS TÚNELES DE RECUPERACIÓN. EN NEGRO EL TÚNEL DE	
SECCIÓN	I RECTANGULAR, Y EN AZUL, EL TÚNEL EN FORMA DE ARCO	. 82

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ΜοτιναcιόΝ

Los túneles de recuperación son grandes estructuras de hormigón armado enterradas o parcialmente enterradas, en cuya parte superior se encuentra el material de acopio, o *stockpiles*. Estos tienen como función permitir el flujo del material del acopio ubicado encima hacia el proceso de extracción a través de aberturas en su parte superior, las cuales alimentan contantemente a cintas transportadoras para continuar el proceso de chancado de material. Estas construcciones son indispensables en proyectos mineros ya que mantienen la producción constante independiente de la tasa de extracción del mineral a corto plazo, y su costo en tiempo y dinero constituyen una parte importante en el proyecto final.

Debido a las grandes cargas a las que se encuentra sometido el túnel, al espacio interior requerido para su operación, y a la forma geométrica tradicionalmente de sección transversal rectangular, se generan esfuerzos internos de gran magnitud que se traducen en grandes dimensiones y espesores. Es por esta razón que, revisar su estructuración y forma, además las solicitaciones a las cuales se encuentra expuesto, es de gran relevancia tanto por su costo económico como de viabilidad constructiva.

Actualmente existen una gran cantidad de estudios que permiten definir las cargas estáticas sobre los túneles de recuperación, cuyo principal problema son las producidas por la pila. Estudios realizados por McBride (2006) muestran que el comportamiento de las presiones debajo de las pilas difiere significativamente de la presión hidrostática, y que, posterior a una extracción central seguida por un relleno de este mismo hasta su estado anterior no altera la curva de presiones iniciales. Siguiente a esto, Ooi et al. (2008) demuestra que la distribución de presiones y la ubicación relativa de sus valores máximos se mantiene durante el proceso constructivo de la pila. Por otra parte, Conley (2012) obtuvo una ecuación para las distribuciones de presiones bajo una pila basado en la literatura existente sobre materiales granulares.

En el caso de las cargas dinámicas no existe una metodología única para modelar estas en túneles de recuperación. En la norma NCh433 y en el Manual de Carreteras se exponen algunos métodos que se utilizan usualmente en la industria chilena para el diseño de estructuras enterradas, pero no específicamente para túneles de recuperación, sino que principalmente para subterráneos. Debido a que las condiciones iniciales de estos túneles difieren de los subterráneos de edificios no es posible utilizar el método que se considera más conservador y afirmar que en la práctica lo será, razón por la cual cuantificar sus impactos en los diseños de los túneles es importante.

Producto de lo anterior y a la importancia que tienen los túneles de recuperación es que es necesario generar una metodología de diseño. Realizar un estudio acabado de las solicitaciones, un análisis estructural apropiado y determinar una forma geométrica que cumpla los requisitos del sistema podrá permitir reducir costos directos y disminuir el tiempo constructivo de estos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Generales

Este trabajo propone 2 modelos de túneles de recuperación posibles a usar en la minería, uno en forma rectangular y otro de arco, para luego analizar su factibilidad técnica y económica. Estos diseños se realizarán considerando un caso ficticio cuyos parámetros serán definidos de la forma más general posible, lo que tendrá como consecuencia que los túneles podrán ser utilizados como referencia para futuros proyectos.

1.2.2. Específicos

La propuesta posee cuatro objetivos específicos que se deben llevar a cabo, los cuales serán desarrollados en el orden que aparecen a continuación:

- Estudiar y definir las cargas estáticas que afectarán al túnel de recuperación, tanto las generadas por el material de acopio sobre de este, como del suelo donde se encuentra enterrada la estructura.
- Estudiar el comportamiento de los diferentes métodos dinámicos utilizados en la industria para el diseño de túneles de recuperación.
- Generar mediante el uso de dos programas de elementos finitos modelos de un túnel recuperador de sección transversal rectangular y otro de arco, y analizar comparativamente sus comportamientos.
- Desarrollar modelos optimizados para ambas geometrías de túneles de recuperación por medio de un programa de elementos finitos para luego diseñar estructuralmente las propuestas y hacer una valorización económica de estos.

1.3. Metodología

1.3.1. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL TERRENO

Con el fin de cumplir los objetivos de este trabajo, el primer tema a abordar corresponde a un estudio apropiado del comportamiento del suelo. Se deben definir y determinar las cargas estáticas a las cuales un túnel de recuperación se encontrará expuesto durante su vida útil, tanto las cargas producidas por el material de acopio, como las cargas laterales, producto del suelo circundante donde se encuentra enterrado. Estas se utilizarán luego para cargar los modelos estáticos.

1.3.2. DESARROLLO DE LOS MODELOS DE TÚNELES DE RECUPERACIÓN

El siguiente tema a abordar corresponde al desarrollo de las propuestas para túneles de recuperación en forma rectangular y de arco, en dos programas diferentes, Sap2000 y Plaxis, utilizando las cargas definidas en el punto anterior.

En el programa Sap2000 se elaborará un modelo de análisis estructural en 3D con las aberturas en las bocas de alimentación. Estas modelaciones, se harán utilizando elementos finitos a través de elementos de tipo área o shell, los que serán cargados con las cargas de la pila, además de otras cargas correspondientes al diseño, tal como en el Plaxis.

Por otro lado, el modelo de análisis estructural elaborado en Plaxis consistirá un modelo en 2D de la sección transversal del túnel, utilizando elementos finitos para modelar tanto la estructura como el terreno donde se encontrará enterrado este. Esta característica permite una mejor aproximación al comportamiento real del terreno a diferencia del Sap2000 que utiliza resortes. Como desventaja, el programa no puede ver lo que sucede en profundidad, dejando partes de la estructura sin análisis.

1.3.3. ANÁLISIS SÍSMICO

Se analizarán diferentes métodos utilizados para modelar construcciones enterradas en Chile como los presentes en el Manual de Carreteras, la norma NCh433 de diseño sísmico, o por medio de un registro sísmico cercano a la zona del proyecto. Para esto, se utilizará el modelo rectangular realizado en Sap2000, el cual se cargará y modificará de acuerdo a las especificaciones de cada método.

Con los resultados de cada uno de los métodos del análisis dinámico se elegirá el más desfavorable, el que luego se utilizará sobre las combinaciones de carga estáticas determinadas en los modelos estáticos del punto anterior.

Para el caso de los modelos en forma de arco se utilizará el mismo método determinado para el túnel rectangular, cuyos resultados se sumarán a en los modelos estáticos respectivos.

1.3.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS

Los esfuerzos dinámicos determinados en el punto anterior se adicionarán a los modelos realizados en el programa Plaxis y Sap2000 para los túneles en forma rectangular y de arco. Con los resultados completos de los esfuerzos internos de cada túnel de recuperación se realizará un análisis comparativo del comportamiento de ambas geometrías de túneles. Además de esto, se compararán los esfuerzos internos entregados por el Plaxis y el Sap2000 para los túneles en forma rectangular y de arco, y se analizarán las diferencias de los resultados entre programas.

1.3.5. DISEÑO DE LAS PROPUESTAS.

Finalmente, se diseñarán 2 túneles de recuperación posibles a utilizar en la minería utilizando el programa Plaxis, uno en forma rectangular y otro de arco. A estos modelos se les realizará su diseño estructural de acuerdo a la norma ACI318-14 y se determinará el costo total instalado de cada una de las propuestas diseñadas, el cual incluirá, los costos materiales y constructivos.

Para llevar a cabo estas propuestas se deberán establecer algunos criterios de diseño que permitirán la realización de un apropiado análisis comparativo entre los túneles, los cuales condicionarán las dimensiones de cada sección. Por último, de acuerdo a los resultados obtenidos de estos diseños se determinará el túnel de recuperación más conveniente, tanto en el aspecto económico como constructivo.

2. ANTECEDENTES

2.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los materiales a granel abarcan muchos tipos de industrias, como la alimentaria o la energética, y generalmente para su aprovechamiento o traslado es necesario almacenarlos, debido a que en general su uso no siempre es inmediato. Dependiendo de su uso es la forma en que estos se guardan; por ejemplo, en barriles, en silos, en galpones, entre otros.

En el caso de la minería, los materiales a granel suelen almacenarse en montones cónicos formados por depositación central, también llamados pilas, acopios o *stockpiles*, en el interior de galpones, domos, o simplemente al aire libre. La razón de porque se almacenan así estos materiales es producto de la necesidad de retirar el material de manera expedita por medio de vehículos u otros equipos mecánicos que faciliten los procesos productivos de la planta. Cuando los requerimientos industriales son muy grandes, se tienen pilas de decenas de metros donde la extracción por medio de vehículos como cargadores frontales no resulta una práctica muy eficiente. Es en esta situación donde los túneles de recuperación surgen como alternativa para alimentar las plantas industriales con el material de la pila.

2.2. TÚNELES DE RECUPERACIÓN

Los túneles de recuperación son estructuras usualmente de hormigón armado que se encuentran enterradas a nivel de terreno, sobre el cual se ubica el acopio formado por una depositación central. Los túneles tienen la función extraer el material de la pila por medio de aberturas en su parte superior. Por estas aberturas, el material de la pila ingresa al túnel que luego es enviado gradualmente hacia el exterior por medio de cintas transportadoras.

La sección trasversal de los túneles de recuperación usualmente es rectangular, un diseño cuyo comportamiento en general es más conocido. Sin embargo, existen también túneles de recuperación en forma de arco, usualmente ligados a pilas pequeñas.

Además de la cinta transportadora, los túneles de recuperación cuentan con otros equipos mecánicos en su interior como chutes y alimentadores que proveen con material a la cinta transportadora.

2.3. DISEÑO DE TÚNELES DE RECUPERACIÓN

El diseño de los túneles de recuperación se encuentra determinado usualmente por las dimensiones de espacio interior que se necesitan para su operación y por las cargas a las que el túnel se encontrará afecto en operación. Las primeras condiciones son definidas por el mandante mediante previo estudio de su requerimiento para el funcionamiento del proyecto completo; mientras que las segundas, son todas aquellas cargas, vivas o muertas, que se encuentran presentes cuando se encuentra en operación; por ejemplo, el peso de los equipos interiores, el peso propio y el peso del acopio.

En general se tiende a pensar que el perfil de distribuciones en una pila es hidrostático, donde en el centro de la pila cónica se tiene el máximo el cual desciende linealmente hacia los costados, sin embargo, esto no es así. El perfil de presiones que genera el acopio tiene una forma más parecida a la letra M en cuyo centro no se encuentra el máximo, sino alrededor de este.

Además de las cargas estáticas, existe otra cuya acción es necesaria de representarse y corresponde la acción sísmica. En Chile no existe una norma clara para estructuras como los túneles de recuperación, ya que las normas están principalmente enfocadas en el diseño estructural de edificios, como subterráneos de estacionamientos, estructuras con las que no comparten las mismas características. Esto hace que, a pesar de existir varios métodos para determinar las cargas sísmicas en un túnel de recuperación, no se pueda aplicar uno en particular aludiendo al hecho de que es más conservador, debido a que las hipótesis de diseño no son compatibles.

Conocer y cuantificar el perfil de presiones bajo una pila cónica de material a granel o definir un método para cuantificar las solicitaciones sísmicas, es fundamental para un apropiado diseño de los túneles de recuperación, debido a que estas cargas son finalmente las que controlan el sistema. Muchas veces por el tiempo que se requiere para realizar un estudio acabado para el diseño de estas estructuras se terminan construyendo túneles sobredimensionados, afectando no solo a los costos directos del proyecto, sino que también a sus tiempos constructivos.

2.4. PERFIL DE PRESIONES BAJO UNA PILA

El comportamiento de las presiones en la base de una pila cónica ha sido analizado en varios estudios. En los siguientes párrafos se presentan algunos de los estudios más recientes y relevantes que se utilizaron como referencias para el desarrollo del presente trabajo de título, presentes en los capítulos posteriores.

En 1997 Huntley et al. desarrolló un experimento para medir las presiones bajo una pila cónica utilizando materiales granulares depositados gradualmente en el centro. El experimento se realizó con pequeñas bolas de vidrio cuya presión deformaba la silicona bajo de esta, la cual se transformaba en presión. En la experiencia se pudieron notar varias particularidades, por ejemplo, un claro descenso de presiones en el centro cuyo máximo se encontraba entre 0,2-0,4 veces el radio de la pila (R_p). También, se notó que este descenso no depende del coeficiente de fricción de la superficie en la que se encuentra apoyada la pila, y que las fuerzas de contacto debajo de estas siguen un patrón de probabilidad de densidad aproximado a una exponencial negativa.

En el año 2006, William McBride et al. realizó un estudio del comportamiento de las presiones bajo una pila formada mediante depositación en cuya parte inferior se ubicó un alimentador o feeder para extraer el material bajo el ápex central. Se pudo notar que las presiones en la pila tenían la misma forma que la pila realizada por Huntley et al. en 1997, pero que al extraer el material por debajo la curva de presiones finales coincidían con una curva hidrostática, y que al rellenar volvía a tenerse la forma previa al vaciado. Este experimento se realizó 3 veces con resultados prácticamente idénticos.





FIGURA 2-2 PRESIONES EN LA BASE AL FINAL DE CADA RELLENO.

En esta experiencia, una de las mediciones más relevantes es la de la carga en el alimentador durante el proceso completo. Se observó que mientras el alimentador se encontraba en funcionamiento la carga registrada en este equivalía al 40% del total del peso sobre este antes de su operación, manteniéndose así hasta el final del proceso de vaciado.



FIGURA 2-3 CARGA SOBRE EL ALIMENTADOR.

Ooi et al. en 2008 realizó un estudio similar a los anteriores donde utilizó como material granular pequeños granos de hierro esféricos y altamente rugosos de diámetro de 3 [mm]. Para la medir la presión en la base de la pila se utilizaron placas sensibles a diferentes distancias del centro, lugar por donde el material fue depositado lentamente. Los resultados mostraron que la presión central de la pila puede llegar a ser un 50% de la presión hidrostática en ese punto, y que alejándose del centro permanece debajo de esta hasta una distancia de $0,6R_p$. Se pudo ver la presión máxima en la pila se encuentra a $0,3R_p$ aproximadamente. Además, se analizaron las presiones bajo la pila en sus diferentes fases constructivas, notando que la forma de las presiones bajo la pila se acentuaba a medida que crecía. Por otro lado, se realizó un cambio en la rigidez de la base de la pila que significo una alteración de distribución presiones bajo la pila, mostrándose una curva aún más acentuada, donde las tensiones bajo el ápex decrecen, y el punto de máxima presión se desplaza hacia los bordes.



FIGURA 2-4 EVOLUCIÓN DE LAS PRESIONES DURANTE FORMACIÓN DE LA PILA.



FIGURA 2-5 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES NORMALIZADO POR LA ALTURA.

Siguiendo con su investigación, Ooi et al. 2009 estudió varios modelos con que caracterizar el suelo de manera de obtener la curva de presiones teórica mostrada en los trabajos experimentales de la Figura 2-5 a través elementos finitos. Se utilizaron modelos lineales y otros no lineales, donde finalmente se demostró que el que mejor se comportaba, en relación a la experiencia en laboratorio, era el modelo cuya elasticidad dependía de la presión y cuyo criterio de falla se basaba en la teoría de Mohr-Coulomb. Los resultados mostraron que incluir la plasticidad al modelo es un requisito para generar un descenso en las presiones en la parte central, lo mismo que la formación progresiva

de la pila. Adicionalmente, se demostró que la forma de la distribución de presiones es indiferente de la cantidad de capas que se dibujen en el modelo constructivo. Si bien, como se puede ver en la Figura 2-6, el modelo teórico discrepa con el experimental, se puede notar que es una buena aproximación, y posiblemente un modelo conservativo al considerar las presiones.



FIGURA 2-6 COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS REALIZADOS CON FEM FRENTE A LOS EXPERIMENTALES DE OOI (2008) .

Por último, Conley et al. 2012 realizó una tesis en donde compara algunos experimentos de los trabajos antes mencionados con otros propios para poner a prueba los resultados, usando siempre materiales granulares. De acuerdo a los resultados obtenidos, fue capaz de generar una curva que predice de buena forma el perfil de presiones en una pila cónica, cuyo máximo se encuentra en $0.24R_p$, el mínimo tiene un valor de $0.4\gamma_t h_{sp}$.

$$\frac{P}{\gamma_t h}(r) = 1.2 \cdot \left(1 - \frac{r}{R_p}\right) - 0.8 \cdot \frac{-5 \cdot \frac{r}{R_p}}{r}$$
(2.1)



FIGURA 2-7 COMPARACIÓN EXPERIMENTO DE CONLEY (2012) CON ARENA FINA, MÉTODO PREDICTIVO Y ECUACIÓN EMPÍRICA.

Esta ecuación, comparada con los resultados experimentales tiene un 90% de certeza, obteniendo valores muy confiables.

De acuerdo a los trabajos expuestos, lo que intuitivamente uno podría considerar como el perfil de presiones bajo una pila (una curva hidrostática), se encuentra equivocado. La curva obtenida en los diversos trabajos muestra para materiales granulares un claro perfil de presiones con una baja significativa en el centro, la cual tiene relación con la forma constructiva principalmente, ya que debe ser depositado desde el punto central, y no de manera distribuida. Además, su forma solo puede ser alterada significativamente por su rigidez basal, ya que, para prácticamente en todos los experimentos realizados, los valores son similares independiente del material utilizado.

Por otro lado, se pudo notar que, al existir una extracción inferior, el perfil de presiones obtenido mediante una depositación central, se transforma en un hidrostático en el material restante, pero que sin embargo al volver a rellenarse vuelve a tomar la forma previa al vaciado. Además, sucede un evento interesante al entrar en operación el alimentador donde la carga en este decrece a un 40% del total previo al vaciado del acopio. Esto es algo que intuitivamente es contrario a lo que se podría pensar debido a que al estar cayendo el material al alimentador podrían generarse mayores esfuerzos en este aumentando y no disminuyendo las presiones en este.

Finalmente, Conley (2012) muestra que con la ecuación que definió es capaz de manera fiable de predecir el comportamiento del perfil de presiones de un acopio dependiendo únicamente del radio de la pila. Los valores de esta curva pueden ser usados perfectamente para estimar las cargas de una pila sobre un túnel de recuperación, y con ello realizar un apropiado diseño estructural.

Se puede decir que entre el perfil de presiones propuesto por Conley (2012) y uno de carácter hidrostático, existe una diferencia notable en las magnitudes de las cargas a las que se diseña el túnel y, por ende, en costos. De acuerdo a la Figura 2-7, el máximo valor de presiones bajo una

pila es de $0.65\gamma_t h_{sp}$, lo que implica una reducción de costos que se puede ver representado en el diseño de un túnel de recuperación; por ejemplo, en la disminución de armaduras a utilizar, en días trabajados, simplificación en el montaje de estas estructuras, entre otros.

2.5. DISEÑO SÍSMICO EN ESTRUCTURAS ENTERRADAS

Muchas veces en estructuras enterradas las cargas sísmicas no son consideradas, debido a que los esfuerzos que estas generan no son relevantes respecto al efecto de otras cargas. Esto es debido principalmente a que el suelo se mueve solidario a la estructura desplazándose todo el conjunto como un cuerpo generando solicitaciones que son significativamente menores frente a otras solicitaciones. De hecho, existen normas como la AASHTO LRFD (2014, págs. 3-55) que dice que los "efectos sísmicos para alcantarillados y estructuras enterradas no necesitan ser considerados excepto en donde se cruce una falla activa", situación que reafirma lo mencionado.

A pesar de esto, y siguiendo la normativa chilena, es necesario hacer un análisis dinámico a todas las estructuras industriales, debido a la naturaleza sísmica de Chile. En esta sección se presentan algunos de los principales métodos utilizados en la industria chilena para determinar las cargas sísmicas en estructuras enterradas. Estos métodos no están pensados para el diseño de túneles de recuperación, por lo que algunos se modificaron para considerar la variable del acopio sin alterar mayormente los métodos para poder ser utilizados en el diseño.

Dentro de los métodos para el diseño sísmico expuestos en esta sección están aquellos que se encuentran dentro del Manual de Carreteras volumen 3 (2002), la NCh433 modificada 2012, y los que utilizan registros sísmicos reales.

2.5.1. MANUAL DE CARRETERAS

Este manual establece métodos cinemáticos principalmente para estructuras tipo marco o cajón ubicadas bajo la cota de terreno, donde la losa superior actúa como puntal, y se utiliza este método para obtener la componente sísmica del empuje sobre la estructura. El uso de estos métodos depende del ancho máximo de la estructura, la cual es dependiente del tipo de suelo. Estos valores se pueden ver en la siguiente tabla.

TABLA 2-1 LIMITACIONES DE ANCHO PARA MÉTODOS DEL MANUAL DE CARRETERAS.

Ancho Máximo [m]			
Suelo Tipo A 45			
Suelo Tipo B	20		
Suelo Tipo C y D	10		

En esta sección se detallan 3 métodos que se pueden utilizar para el diseño de un túnel de recuperación, los cuales se detallaran a lo largo de esta sección. Los empujes sísmicos obtenidos de todos los métodos de este manual son determinados por medio de la aceleración máxima del suelo a_o , por lo que, al momento de realizar combinaciones de carga, no se requerirá una mayoración de dichas solicitaciones.

2.5.1.1. MÉTODO DETALLADO

Para el sentido de la aceleración expuesta en la Figura 2-8 los resortes dispuestos en el muro derecho se consideran con apoyo fijo, mientras que los ubicados en el muro izquierdo con apoyo deslizante. Luego, se impone un desplazamiento o fuerza en el muro de la izquierda y se determinan los esfuerzos sísmicos en la estructura. Este procedimiento se debe realizar en ambos sentidos ya que la aceleración no va en una sola dirección, de manera de analizar la dirección más desfavorable. En caso de estructuras simétricas no es necesario el análisis en ambas direcciones.



FIGURA 2-8 REPRESENTACIÓN DEL MÉTODO DETALLADO.

Para la determinación de la desangulación promedio θ_s y el desplazamiento sísmico horizontal δ_s asociado se debe dividir el suelo en estratos iguales, desde la cota de terreno hasta la base de la estructura. Con esto definido, y por medio de las siguientes ecuaciones, se deben determinar los desplazamientos y desangulaciones correspondientes a cada uno de estos estratos.

$$G_{c\,i} = 53 \cdot K_{2\,i} \cdot \sqrt{\sigma_{v\,i}} \tag{2.2}$$

$$\theta s_i = \frac{(1 - 0.0167 \cdot z_i) a_o \gamma_t z_i}{G_{ci}}$$
(2.3)

$$\delta s_i = \sum_i^n \theta s_i \cdot h_n \tag{2.4}$$

Donde,

- Gc_i : Módulo de corte del suelo para solicitaciones sísmicas en el centro de la capa i en $[tonf/m^2]$.
- K_{2i} : coeficiente de corte adimensional para solicitaciones sísmicas en el centro de la capa i, cuyo valor depende del tipo de suelo y de la desangulación sísmica θs_i en el centro de la capa.
- σ_{vi} : Tension efectiva vertical en el centro de la capa i en $[tonf/m^2]$.
- θs_i : Desangulación sísmica de corte producto de la desaceleración, a_o , en el centor de la capa i en [rad].
- z_i : Profundidad al centro de la capa i en [m] desde la cota de terreno.
- a_o : Aceleración máxima en la superficie del suelo expresada en fracción de la aceleración de gravedad g. Su valor se puede ver en la Tabla 3-4.
- δs_i : Desplazamiento sísmico horizontal en la cota superior de la capa i.

- *i*: número del estrato en que se encuentra.
- *n*: Estratos en los que se encuentra subdividido el suelo.
- h_n : Espesor de las capas en [m].
- γ_t : Densidad del terreno en [tonf/m²].

Ya que K_{2i} y θ_i son dependientes entre sí, se debe realizar una iteración siguiendo la curva de grava de Santiago de la Figura 2-9. Para esto se debe determinar el coeficiente K_{2max} , que corresponde a al coeficiente de corte máximo para pequeñas deformaciones, el cual se encuentra en la Tabla 2-2.

TABLA 2-2 COEFICIENTE DE CORTE MÁXIMO PARA PEQUEÑAS DEFORMACIONES.

Tipo de Suelo	Rango K2max
Arenas	50-85
Gravas Arenosas	160-220
Suelos finos y suelos con cementación	25 qu (*)





FIGURA 2-9 COEFICIENTE DE CORTE SÍSMICO NORMALIZADO PARA SUELOS GRANULARES.

Con las desangulaciones sísmicas en el centro de cada estrato ya calculadas, se determina el promedio de estas (θs) y, con ello, los desplazamientos sísmicos asociados (δs) tal como se muestra en la Figura 2-10 .



FIGURA 2-10 APROXIMACION LINEAL DE LA DESANGULACION SISMICA.

Los valores de los resortes ubicados en la base de la estructura se determinan como $K_v = 2 k_v S$, donde S corresponde al espaciamiento entre los resortes y k_v es la constante de balasto multiplicada por un factor un factor de rigidez sísmica el cual se muestra en la siguiente tabla.

TABLA 2-3FACTOR DE RIGIDEZ SÍSMICA PARA FUNDACIONES SUPERFICIALES.

Tipo de Suelo	Factor de Rigidez	
Gravas Arenosas	1,6	
Arenas	1,0	
Suelos Finos Parcialmente Saturados	1,0	
Suelos Finos Saturados	1,0-2,0 (*)	
(*) Valor inferior si la constante de balastos se determina con la		
deformación no drenada del suelo. Valor superior si se determina		
con la deformación del suelo que incluye la deformación no drenado		
además de la producida por consolidación.		

Por otro lado, los resortes laterales se deben determinar por medio de las siguientes ecuaciones:

$$k_{hi} = \frac{2.7 \cdot G_c}{H} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{Z_i^*}{H_m}\right)^2}}$$
(2.5)

$$K_2 = \left(\frac{K_2}{K_{2max}}\right) \cdot K_{2max}$$
(2.6)

Donde,

- H_m : Altura de la estructura enterrada.
- z_i^* : Distancia desde la parte superior de la estructura hasta el centro de la capa i en [m].
- $k_{h\,i}$: Constante de balastos horizontal en el centro de la capa i en $[tonf/m^3]$.

Debido a que el método antes explicado no considera el peso de una carga sobre el terreno que si tiene un túnel de recuperación (acopio) es que es necesario modificar este para agregar la información faltante en las ecuaciones. Para esto, se modificó el valor de la tensión efectiva vertical quedando $\sigma_{v\,i}^* = \gamma_t z_i + P_{sp}$, donde P_{sp} corresponde al peso del acopio en el suelo adyacente. De esta manera se tienen 2 métodos diferentes que se deberían analizar en el diseño de un túnel de recuperación.

2.5.1.2. MÉTODO APROXIMADO

Este método determina un desplazamiento o fuerza por medio de una deformación angular θs aproximada dependiente de la aceleración máxima del suelo y su tipo de suelo. Los valores correspondientes se pueden encontrar en la Tabla 2-4 o en la Figura 2-11.

Tipo de Suelo	Desangulación de diseño θ₅		
·	ao=0,3g	ao=0,4g	ao=0,5g
Arenas	7,50E-04	1,30E-03	2,00E-03
Gravas Arenosas	2,50E-04	4,00E-04	5,50E-04
Suelos finos y suelos con cementación:			
q u [kgf/cm²].			
0,25	1,80E-01	3,00E-01	4,40E-01
1	5,00E-03	2,10E-02	4,50E-02
2	1,10E-03	2,20E-03	3,50E-03
4	4,00E-04	6,00E-04	8,50E-04
8	2,50E-04	4,00E-04	5,50E-04

TABLA 2-4DESANGULACIÓN SÍSMICA.





DESANGULACIÓN SÍSMICA PROMEDIO DEL SUELO.

Luego se deben calcular los resortes de interacción entre el muro y el suelo, los cuales estarán dados por la siguiente ecuación:

$$k_{h\,i} = \frac{F_G \, F_R}{H} \, \sqrt{z_i^*} \tag{2.7}$$

Donde,

- k_h : Constante de balastos horizontal en el centro de la capa i en $[ton f/m^3]$.
- F_G : Coeficiente adimensional graficado en la
- F_R : Factor de rigidez para resortes de interacción sísmica expuesto en la Tabla 2-5 en $[tonf/m^{2,5}]$.

FACTOR DE RIGIDEZ FR.

Tipo de Suelo —	F_R para el diseño [tonf/m ^{2,5}]		
	a ₀ =0,3g	<i>a</i> ₀ =0,4g	a ₀ =0,5g
Arenas	3 800	2 700	2 000
Gravas Arenosas	13 500	11 300	9 300
Suelos finos y suelos con cementación:			
q _u [kgf/cm²]			
0,25	15	11	9
1	620	186	98
2	2 970	2 000	1 450
4	9 500	7 850	7 550
8	21 500	19 000	16 200

A diferencia del Método Detallado, en este no es posible agregar el peso de la pila en las ecuaciones, de manera para el diseño de un túnel de recuperación el método se debe analizar tal cual se presenta.

2.5.1.3. Método Simplificado.

El método simplificado principalmente consiste en determinar los empujes sísmicos horizontales σ_s de manera de generar un desplazamiento en la losa superior hasta una deformación dada Δ_s . Esta fuerza, tal como se muestra en la Figura 2-12, puede ser triangular o rectangular, la cual dependerá del caso más desfavorable. El desplazamiento es determinado por medio de los valores de desangulación θ_s de la Tabla 2-4 y de la altura del muro H_m .

$$\Delta_s = H_m \cdot \theta s \tag{2.8}$$

Este método utiliza los mismos resortes que se exponen en el método detallado. Podrían no utilizarse, pero la estructura se rigidiza, sobrevalorando los empujes sísmicos.

Los valores resultantes de este método suelen estar sobrevalorados. Usualmente el método simplificado se utiliza de forma preliminar, siendo los métodos detallado y el aproximado, los cuales se utilizan para el diseño, ya que este no considera la interacción suelo-estructura.



Debido a que no es posible modificar el método de manera directa sin alterar las hipótesis detrás de este, su aplicación para el diseño de un túnel de recuperación debe hacerse tal como se expuso.

2.5.2. NCH433 ANEXO C

En esta norma se expone un método para el cálculo de empujes sísmicos horizontales sobre estructuras enterradas cuyos muros perimetrales se encuentran arriostrados por losas. Dicha componente se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma_s = 0.3 \ C_R \ \gamma_t \ H_m \ \frac{A_o}{g} \tag{2.9}$$

Donde,

- σ_s : Presión sísmica uniforme distribuida en la superficie del muro.
- H_m : Altura del muro en contacto con el suelo.
- γ_t : Peso unitario del suelo húmedo o relleno colocado contra el muro en $[ton f/m^2]$.
- A_o : Aceleración efectiva máxima del suelo.
- C_R : 0,45 para suelos duros densos o compactados.
 - 0,70 para suelos sueltos o blandos.

0,58 para rellenos sueltos o depositados entre el muro y el talud de excavación, practicado en terreno denso o compactado.

Esta norma no es completamente aplicable al diseño de un túnel de recuperación puesto que esta no considera el peso del acopio sobre el suelo adyacente al túnel. Para esto se adecuó la ecuación de manera que pudiera contener la información de la pila en ella, quedando de la siguiente forma:

$$\sigma_s^* = 0.3 \ C_R \left(\gamma_t + P P_{sp}\right) H_m \ \frac{A_o}{g}$$
(2.10)

Donde,

 PP_{sp} : Peso propio del acopio sobre el suelo en $[tonf/m^2]$.

2.5.3. MÉTODOS CON REGISTROS

Es posible obtener mediante un registro de un terremoto de la zona en la cual se encontrará emplazada la estructura obtener los esfuerzos internos colocando este en algún programa que sea capaz de reproducirlo en un modelo. Sin embargo, esto muchas veces no es posible debido a que en general los lugares donde se encuentran los proyectos mineros tienden a ser sectores alejados de los lugares públicos de interés, al menos en Chile, por lo que en general las empresas no cuentan con estos.

3. MODELACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

3.1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de esta memoria está basado en un proyecto minero ficticio ubicado en la segunda región, cerca de la ciudad Calama, el cual corresponde a un túnel de recuperación enterrado de tal manera que la losa superior se ubique en la cota de terreno. Se diseñarán 2 túneles de geometrías diferentes, una con forma rectangular y otra de arco.

Para las condiciones antes mencionadas, se definió el tipo de suelo, las características del acopio ubicado sobre el túnel, los materiales de diseño, las solicitaciones a las que se encuentra afecto el proyecto, y las restricciones geométricas de diseño. Todo esto se menciona a lo largo de este capítulo.

Se utilizaron 2 programas para el desarrollo de esta memoria, los cuales son: Sap2000 versión Plus 16.0.0, y el Plaxis 2D versión 8.6.

3.2. BASES DE LA MODELACIÓN

3.2.1. Descripción de los Túneles

La estructura del túnel rectangular a analizar está conformada por cajón de hormigón armado cuyas dimensiones interiores serán de 7 [m] de ancho por 7 [m] de alto, y una extensión de 75 [m] de largo. En la losa superior se ubican 4 aberturas para permitir el paso del material de la pila hacia el interior, cuyas dimensiones son de 5 [m] de ancho por 10 [m] de largo dispuestas a una separación de 5 [m], las cuales alimentarían a una correa trasportadora interior.

Para el caso del túnel en forma de arco las dimensiones interiores son de 8 [m] de ancho seguido dos muros verticales de 3 [m] de altura y una losa superior semicircular de 4 [m] de radio. Al igual que el caso rectangular, la losa superior contó con 4 aberturas para el ingreso del material hacia el interior las que se constituyeron de las mismas dimensiones, es decir, de 5 [m] de ancho por 10 [m] de largo.

Las dimensiones de las losas y muros para el túnel rectangular fueron de 1,8 [m] y 1,0 [m] de espesor, respectivamente. En el caso del túnel en forma de arco, la losa inferior también se hizo de 1,8 [m] de espesor, mientras que los muros laterales y el arco se diseñaron con un espesor de 1.4 [m].

3.2.2. Materiales

Los materiales que se utilizados en constitución de las modelaciones fueron los siguientes:

TABLA 3-1	HORMIGÓN G30.		
Propiedades Hormigón H35			
$\gamma h [tonf/m^3]$	2,5		
f'c [kgf/cm²]	300		
Eh [tonf/m ²]	2 599 105		
Poisson v	0,2		
TABLA 3-2 ACERO A630-420H.			
Propiedades Acero			
γ _a [tonf/m ³]	7,85		
$f_y [kgf/cm^2]$	4200		

3.2.3. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

TABLA 3-3

Las características del terreno en el cual se decidió situar los modelos de los túneles de recuperación se detallan en la siguiente tabla.

PROPIEDADES DEL TERRENO.

Propiedades del Suelo			
γ _{sat} [tonf/m³]	2,4		
γ_{nsat} [tonf/m ³]	2,2		
Permeabilidad	0,001		
E _s [tonf/m²]	10000		
Cohesión [kN/m²]	2,0		
Fricción φ _t [°]	37		
Dilatancia ψ [°]	0		
Poisson v	0,3		
Unión Hormigón-Suelo	0,57		

Por otro lado, de acuerdo a la ubicación geográfica del proyecto, la zona sísmica corresponde a la zona II, lo que implica que la aceleración efectiva máxima A_o y la aceleración máxima del suelo a_o son 0,3g y 0,4g, respectivamente.
TABLA 3-4 VALORES DE ACELERACIÓN MÁXIMA DEL SUELO Y ACELERACIÓN MÁXIMA EFECTIVA.

Zona Sísmica	a_o	A_o
Ι	0,3g	0,2g
II	0,4g	0,3g
III	0,5g	0,4g

3.2.4. CARACTERÍSTICAS DEL ACOPIO

Para el caso de esta memoria, se definió un acopio de una altura de 50 [m] con las mismas propiedades del terreno donde el túnel se encontrará enterrado, definido en 3.2.3. De acuerdo a esto, el radio máximo queda definido de la siguiente forma:

TABLA 3-5DIMENSIONES DE LA PILA.

Características de la Pila		
Altura [m]	50	
Densidad del suelo [tonf/m³]	2,2	
Ángulo de Reposo ϕ_t [°]	37	
Radio Máximo [m] 66,4		

De acuerdo a las características del acopio, tanto por sus dimensiones como por su composición, se determinó la curva de presiones que se generaría en la base de la pila gracias a la ecuación de Conley (2012) definida para materiales granulares (véase ecuación (2.1))

Debido a la dificultad de colocar exactamente la distribución de presiones en los modelos, y con el objetivo de considerar una cierta variabilidad en la carga, se prefirió utilizar una envolvente de esta compuesta por una carga constante en el centro hasta una distancia igual al 40% del radio de la pila (r_c) , y una recta descendente hasta el final de esta. El valor de la carga en el centro de la envolvente se determinó como el 70% de la presión hidrostática equivalente en el centro, cuyo valor corresponde a 77 [tonf/m²]. La comparación de estas curvas se puede ver en la Figura 3-1.



FIGURA 3-1 CURVA DE PRESIONES BAJO LA PILA Y CURVA ENVOLVENTE DE PRESIONES.

3.2.5. CARGAS SOLICITANTES.

En esta sección se definen las solicitaciones a las cuales los túneles de recuperación se encuentran sometidos. Los valores de cada una de las cargas se definen en los capítulos posteriores en el desarrollo de los modelos, en donde además se mencionan los lugares de aplicación de cada una de estas.

3.2.5.1. CARGAS MUERTAS

En los modelos realizados, las cargas muertas consideradas en el túnel fueron las siguientes:

- (D) Peso propio de la estructura: Corresponde al peso mismo del material utilizado, que en este caso corresponde a hormigón armado.
- (D) Peso propio de la plataforma: Se define como la carga permanente propio de la plataforma de operación ubicada en el interior del túnel y contiene a la cinta transportadora. Esta se encuentra sujeta usualmente a los muros laterales del túnel y su carga es función del ancho interior del túnel de recuperación.
- (D) Peso propio chutes: Esta carga se encuentra situada en los bordes de las aberturas de la losa superior, la cual es producto del peso de los mismos chutes como de las planchas de desgaste ubicadas sobre este.
- (D) Peso propio del acopio: Corresponde a las cargas que genera la pila que se ubica por sobre la losa superior.

3.2.5.2. CARGAS VIVAS

Por otro lado, las cargas vivas consideradas en las modelaciones corresponden a la:

- (L) Sobrecarga de plataforma: Esta corresponde a la carga que se genera al poner en funcionamiento la plataforma de operación. Esta modelará como una carga aplicada en los muros de laterales del túnel, cuya magnitud será en función del área.
- (L) Sobrecarga de pila: Corresponde al peso muerto máximo que tendrían las lanzas de los chutes encima producto del peso del acopio. Se consideró como una carga viva debido a que es una carga eventual utilizada solo en caso de mantención del sistema.

Además de estas cargas, se pudo haber agregado una sobrecarga por operación sobre el chute que se produce cuando el túnel de recuperación se encuentra en operación donde, de acuerdo con McBride (2006, pág. 10), "5 segundos después de iniciada la extracción del material a través de los chutes, la carga cae a un 40% de su valor máximo de su valor estático". Esta carga no se consideró debido a que corresponde a un estado menor de solicitación que la que presenta la carga de la pila sobre el chute.

No existen cargas vivas adicionales de naturaleza estática referentes al uso para para el diseño de los túneles.

3.2.5.3. CARGAS LATERALES

Debido a que el túnel corresponde a una estructura enterrada, es relevante considerar sobre la estructura los:

(H) Empujes del suelo: Corresponde a las presiones horizontales generadas en profundidad sobre los muros laterales producto del suelo circundante.

3.2.5.4. CARGAS SÍSMICAS HORIZONTALES

Esta carga se analizó por separado de las otras solicitaciones por medios de los métodos descritos en el capítulo 2.5 a través de un análisis comparativo sobre el modelo generado en Sap2000. Las solicitaciones del método más desfavorable para el caso rectangular se sumaron a los resultados de las combinaciones de carga estáticas que tenían una componente sísmica. El mismo método seleccionado se utilizó para determinar los esfuerzos en el túnel en forma de arco, las que luego se adicionaron de igual manera que para el caso rectangular a los resultados estáticos.

3.2.5.5. CARGAS SÍSMICAS VERTICALES

Esta componente se despreció ya que los esfuerzos o deformaciones que se podrían producir por esta solicitación no generan un desplazamiento relativo al suelo, debido a que este se mueve en solidario con la estructura.

3.2.5.6. CARGAS DE NIEVE

Debido a la zona en que se situara el proyecto este tipo de cargas no aplica.

3.2.5.7. CARGAS DE VIENTO.

Debido a que esta corresponde a una estructura enterrada, esta no aplica.

3.2.5.8. CARGAS POR TEMPERATURA.

Esta no consideró debido a que la variabilidad térmica de estructuras enterradas es muy baja.

3.2.6. COMBINACIONES DE CARGA

3.2.6.1. DISEÑO DEL HORMIGÓN

El túnel corresponde a una estructura industrial por lo que su diseño se regirá por las combinaciones de la norma NCh2369, esto a pesar de que la norma en su punto 1.2 explicita que no se debe considerar para el diseño de túneles. La razón de esto radica en que en estricto rigor los túneles de recuperación no corresponden a un túnel perforado en terreno (mined tunnel) como lo sería un túnel de metro; sino que, a una estructura industrial cavada a cielo abierto enterrada hasta la superficie (cut-and-cover), lo cual permitiría el uso de las combinaciones expuestas en esta norma.

Las combinaciones para el diseño del hormigón presentes en la norma para el caso estático, adaptadas a las condiciones del sistema, son las siguientes:

(1) $1,4 D^*$ (2) 1,2 D + 1,6 L + 1,6 H(3) 1,2 D + 1,0 L + 1,6 H(4) $1,2 D^*$ (5) 1,2 D + 1,0 L(6) $0,9 D^*$

Mientras que las dinámicas fueron:

- (7) 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E
- (8) 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E

Donde,

- *D*: Cargas muertas totales.
- D^* : Carga solo peso propio.
- L: Cargas vivas.
- *H*: Cargas por presión lateral del suelo con el efecto del acopio encima.
- *E*: Cargas del sismo en la dirección transversal del túnel

En las combinaciones anteriores existen algunas que se pueden descartar debido a que sus condiciones no controlan el sistema. Dentro de estas se encuentran las combinaciones (1), (4) y (6), estados que representan una etapa constructiva del túnel debido a que no se encuentran presentes las cargas vivas ni las laterales. Estos estados de carga no controlan el sistema ya que el sistema no se encuentra regido por el peso propio, representando estados de esfuerzos significativamente menores frente a otras combinaciones.

Por otro lado, existe una combinación que no representa un estado real del sistema en ningún momento de su vida útil, la cual corresponde a la (5). Esta combinación de cargas no es posible

debido a que no se puede tener carga viva sin estar presente el empuje lateral. Esta combinación debiese ser descartada, sin embargo, se buscó una manera en que esta pudiese ser aplicada con la ayuda de otra norma agregado de alguna manera el empuje lateral. Para esto se buscó dentro de las combinaciones presentes en la norma ASCE-SEI 7-10, *standard* para estructuras sujetas a códigos de construcción, en la que se encuentran las mismas combinaciones de carga, incluyendo la combinación en conflicto, pero aplicada de manera diferente. En esta norma, si se encuentra presente la carga lateral H la cual debe aplicarse con un factor de 1,6 si es que va el sentido de la carga dominante (en este caso L) o 0,9 si la contrarresta; siendo este último caso el que se aplicó.

La combinación (5) queda de la siguiente manera:

(5)
$$1,2 D + 1,0 L + 0,9 H$$

Finalmente, las combinaciones a utilizar en el diseño estructural de los túneles de recuperación fueron las siguientes:

C1: 1,2 D + 1,6 L + 1,6 HC2: 1,2 D + 1,0 L + 1,6 HC3: 1,2 D + 1,0 L + 0,9 HC4: 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 EC5: 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E Las siguientes son combinaciones las presentes en la norma NCh3171 que se utilizan para el diseño de fundaciones por el método de tensiones admisibles.

(1) D(2) D + L + H(3) D + H(4) D + 0,75 L + H(5) D(6) D + H + E(7) D + 0,75 L(8) D + 0,75 L + H + 0,75 E(9) 0,6 D(10) 0,6 D + E

Al igual que para el diseño del hormigón, dentro de estas combinaciones que aparecen en la norma, existen algunas que es posible descarta por ser menos desfavorables que otras. Entre estas se encuentran (1), (3), (5), (7), (9) y (10). De esta manera las combinaciones a utilizar fueron:

C6: D + L + HC7: D + 0,75 L + HC8: D + H + EC9: D + 0,75 L + H + 0,75 E

3.3. MODELOS EN SAP2000

El Sap2000 es un software de ingeniería estructural utilizado para diseñar estructuras en 3D por medio de elementos finitos, el cual permite la modelación y análisis de muchos sistemas estructurales.

Debido a su capacidad de análisis en 3D es que se escogió para analizar los túneles de recuperación debido a las discontinuidades producto de las aberturas en la losa superior. Estas discontinuidades no son del todo comprendidas por programas como la versión de Plaxis utilizada, ya que solo analizan los modelos en 2D, razón por la cual modelar los túneles de recuperación en 3D se vuelve necesaria. De esta manera se puede obtener una relación entre los resultados de los programas y analizar su influencia.

Para los diseños de los túneles se utilizaron elementos de área, también llamados shell, cuadrados de 1[m] de lado, exceptuando algunas discontinuidades en la geometría, las cuales se explicarán más adelante en detalle. Estos elementos dividen los muros y las losas en secciones más pequeñas, permitiendo un análisis más detallado en zonas más solicitadas.

Ambos modelos realizados, uno para el túnel rectangular y otro para el túnel con forma de arco, se describen en este capítulo, además de las solicitaciones y disposición de estas en los modelos.

3.3.1. MODELO RECTANGULAR

Para la creación de este modelo en el programa Sap2000 se utilizaron elementos de área cuadrados de 1 [m] de lado, excepto en los bordes de las aberturas, lugar donde se utilizaron elementos de 1 [m] de largo por 0,5 [m] de ancho. Con estos elementos se constituyó el túnel completo en 3 dimensiones con las aberturas correspondientes para la recuperación del material.





Debido a las dimensiones de las propuestas, y con la intención de respetar el tamaño de los elementos finitos para que sean todos regulares, se decidió modificar un poco las dimensiones de la estructura incrementando el área interior resultando esfuerzos ligeramente más conservadores.

Producto de lo anterior, el modelo del túnel de recuperación se conformó por 2 muros separados desde sus ejes centrales por 8 [m], y 2 losas separadas por 9 [m] también desde sus ejes. A lo largo se encontrarán 4 aberturas en la parte central de la losa superior de 5 metros de ancho por 10 de largo, con una separación de 5 [m] entre sí.

La estructura se cargó con las solicitaciones mencionadas en la sección Cargas Solicitantes 3.3.3. Los resortes utilizados en la base del túnel corresponden a la constante de balastos calculados en la sección 3.3.4. No se utilizaron restricciones como apoyos, esto debido a que las solicitaciones se encuentran distribuidas simétricamente en el eje transversal del túnel. El movimiento vertical quedo restringido por los resortes ubicados en la losa inferior respecto al plano central del túnel.

No se utilizaron resortes para modelar el suelo en los costados, esto producto de que las fuerzas laterales en el modelo generaban tal esfuerzo que los muros se curvaban hacia su interior, no comprimiendo el suelo, para todas las combinaciones de carga.

Los espesores de las unidades de área fueron de 1,8 [m] para las losas y 1,4 [m] para los muros.



FIGURA 3-3 VISTA DE FRENTE DE MODELO RECTANGULAR EN SAP2000.

3.3.2. MODELO EN FORMA DE ARCO

Al igual que para el caso rectangular, se utilizaron en la modelación elementos de área cuadrados de 1 [m] de lado, exceptuando aquellos ubicados en el arco que va de muro a muro. Las dimensiones de estos elementos son cercanas, mas no iguales debido a que no se puede completar el arco con elementos regulares.





El túnel curvo tiene una losa inferior de 10 [m] de ancho, un poco más grande que la propuesta original de manera conservadora. Los muros se confeccionaron con una altura de 4 [m] desde el eje central de la losa inferior hasta el comienzo del arco semicircular. Este quedo conformado por 16 tramos aproximadamente de 1x1,1 [m²].

A diferencia de la losa superior en el túnel rectangular, el arco, además de estar sometido a las cargas verticales de la pila, se encuentra afecto a los empujes de tierra. Estos fueron introducidos al modelo de forma perpendicular a cada elemento cuyos valores dependían de la profundidad y del ángulo de inclinación de los elementos de área. Los valores de las solicitaciones se encuentran en la sección de Cargas Solicitantes 3.3.3.

Los espesores utilizados para los elementos de área fueron de 1,8 [m] para la losa inferior y 1,4 [m] para el arco y muros laterales.



FIGURA 3-5 VISTA DE FRENTE DE MODELO EN FORMA DE ARCO EN SAP2000.

3.3.3. CARGAS SOLICITANTES

Los valores de las solicitaciones que se dispusieron en los modelos rectangular y en forma de arco se detallan a continuación. Los valores de las cargas de los equipos que se encuentran en el interior corresponden a valores promedio existentes en el mercado y representan solo valores aproximados (Parra & Canteros, 2017). Esto es debido a que al ser un proyecto ficticio no es posible tener valores exactos ya que en general estos se hacen a medida, una problemática que no abarca este trabajo.

(D) Peso Propio de la Estructura

Peso propio hormigón:

$$\gamma_h = 2,5 \, [ton f / m^3]$$

(D) Peso Propio de la Plataforma

El peso de la plataforma se definió como una carga distribuida a lo largo los muros del túnel a aproximadamente 3 [m] por sobre la losa inferior y quedo definida en función del área del túnel rectangular.

Peso propio de la plataforma:	$PP_{pt} = 0.3 \left[tonf / m^2 \right]$
Ancho del túnel rectangular:	$B_{tr} = 7 [m]$
Largo túnel:	$L_t = 75 [m]$

Se considerará el peso aplicado sobre sobre 1 fila de nodos a media altura en los muros laterales. En total son 76 nodos por lado debido a que son 75 [m] de largo.

Peso de plataforma en cada muro por nodo:

$$D_{ptn} = \frac{PP_{pt} \cdot B_{tr} \cdot L_t}{2 \cdot 76} = 1,0 \ [tonf/m]$$

El túnel de recuperación en forma de arco se cargó con el mismo valor que el rectangular. Esto no afecta significativamente los valores finales ya que esta carga en particular no controla el sistema.

(D) Peso propio chutes

Esta solicitación se aplicó sobre los nodos que conformaban la abertura de la losa superior de manera equitativa entre sí. El número total de nodos que conforman una abertura es de 30.

Peso propio chutes + planchas de desgaste: $PP_{ch} = 120 \ [tonf]$ Peso en borde de abertura por nodo: $D_{chn} = \frac{PP_{ch}}{30} = 4 \ [tonf/m^2]$

(D) Peso del Acopio

Esta solicitación se dispuso tal como se explicó en el punto 3.2.4, es decir, considerando una envolvente. Esta consistió en un tramo constante hasta un radio r_c seguida una carga decreciente constante que considerara un valor de 0 [tonf/m] cuando se alcanza el radio de la pila.

Carga central de la pila:	$D_{sp} = 77 \left[tonf / m^2 \right]$
Radio de la pila:	$R_p \approx 67$
Radio de carga central:	$r_c = 40\% \cdot R_n \approx 27 \ [m]$

Producto de que el túnel se modelo centrado en el acopio, la losa superior del túnel siempre se encontrará afecta a este tipo de cargas.

La losa superior semicircular, del modelo en forma de arco, se cargó completamente con las proyecciones perpendiculares a los elementos de área que la conforman. Esto fue producto de la dificultad que existe para colocar cargas distribuidas en el eje global considerando además el peso del terreno que aumenta al acercarse a los muros.

(L) Sobrecarga de la Plataforma.

Al igual que para el peso propio de la plataforma de operación, la sobrecarga asociada a los muros se consideró en función del área interior del túnel rectangular y se distribuirá en 76 nodos por lado.

Sobrecarga sobre muros laterales:	$SC_{ptm} = 0.8 \left[tonf/m^2 \right]$
Ancho de la plataforma:	$B_{pt} = 7 \ [m]$
Largo túnel:	$L_t = 75 \ [m]$
Peso sobrecarga en 1 nodo del muro:	$L_{ptn} = \frac{SC_{ptm} \cdot B_{pt} \cdot L_t}{2.76} = 2,8 \ [tonf/m]$

Este mismo valor se utilizará tanto para el modelo rectangular como para el en forma de arco.

(L) Carga de la pila sobre el chute.

Esta carga se hace efectiva cuando las lanzas son activadas para la mantención del equipo. Las cargas que soporta el chute son las que son retenidas en la abertura. Esta se dispondrá como cargas puntuales e iguales en los 30 nodos que conforman cada abertura en la losa superior.

Carga de la pila sobre lanzas:	$CP_l = 77[tonf/m^2]$
Largo abertura:	$L_{ab} = 10 \ [m]$
Largo losa superior:	$L_{sup} = 5 [m]$
Peso sobre nodos de abertura:	$L_{spn} = \frac{CP_l \cdot L_{ab} \cdot L_{sup}}{30} = 128[tonf]$

(H) Empujes del suelo.

Para el cálculo de estas fuerzas aplicadas sobre los muros se consideró el empuje en reposo actuando sobre los muros de manera perpendicular. Este empuje dependerá de la carga sobre el suelo y la profundidad a la que se encuentre del muro.

Ángulo de fricción interna:	$\phi_t = 37^{\circ}$
Coeficiente de empuje en reposo:	$k_o = 1 - \sin(\phi_t)$
Presión del suelo:	$PS(z, D_{sp}^*) = k_o \cdot (\gamma_t z + D_{sp}^*)$

Donde,

 D_{sp}^* : Carga de la pila en función del radio de la pila.

El arco del modelo, también se cargó con el empuje pasivo, al menos hasta la cota de las aberturas. Esto debido a que al encontrarse parte del arco bajo tierra se ve afectado por el empuje pasivo. Los valores dispuestos en el modelo corresponden a las proyecciones perpendiculares a las caras externas de los elementos que conforman el arco, debido a la dificultad que tiene el programa para configurar cargas distribuidas en elementos de área en coordenadas globales.

(E) Sismo horizontal.

Esta solicitación se hizo por separado a las demás, por lo cual no se incluyó en el modelo. El análisis en detalle de esta carga se explica en el capítulo 3.5.

3.3.4. CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE BALASTO

Esta constante se ha definido de manera general a partir de las siguientes fórmulas:

$$M^* = \frac{L}{B} \tag{3.1}$$

$$N^* = \frac{H^*}{B} \tag{3.2}$$

$$L_{1} = \frac{1}{\pi} \left[M^{*} \cdot \ln \left[\frac{\left(1 + \sqrt{M^{*2} + 1}\right) \cdot \left(\sqrt{M^{*2} + N^{*2}}\right)}{M^{*} \cdot \left(1 + \sqrt{M^{*2} + N^{*2} + 1}\right)} \right] + \ln \left[\frac{\left(M^{*} + \sqrt{M^{*2} + 1}\right) \cdot \left(\sqrt{1 + N^{*2}}\right)}{M^{*} + \sqrt{M^{*2} + N^{*2} + 1}} \right] \right]$$
(3.3)

$$L_2 = \frac{N^*}{2\pi} \tan\left(\frac{M^*}{N^* \cdot \sqrt{M^{*2} + N^{*2} + 1}}\right)^{-1}$$
(3.4)

Donde,

- *B*: Ancho total de la base de la estructura.
- *L*: Largo de la estructura.
- H^* : Altura del estrato compresible debajo de la estructura.

Finalmente, la constante de balasto se define de la siguiente forma:

$$k_{v} = \frac{1}{\frac{B \cdot (1 - v^{2})}{E_{s}} \cdot \left(L_{1} + \frac{1 - 2v}{1 - v} \cdot L_{2}\right)}$$
(3.5)

Donde,

v: Coeficiente de Poisson del hormigón.

3.3.5. METODOLOGÍA DE MEDICIONES

3.3.5.1. TÚNEL RECTANGULAR

Las secciones de estudio para el túnel de sección transversal rectangular se dividirán en losa superior, muro y losa inferior. En el caso de la losa superior las secciones de interés son 4, de las cuales 3 se pueden ver marcadas en la Figura 3-6. La sección marcada en color rojo corresponde al centro de la losa superior; en color verde, la sección de la losa superior adyacente a los bordes de la abertura; y por último en color negro, los apoyos de la losa en los muros. La cuarta sección de estudio se encuentra marcada en color azul en la Figura 3-7 la cual corresponde a los bordes de las aberturas controladas por corte.

En las secciones marcadas en color rojo y color verde en la losa superior los momentos fueron medidos en el centro para las secciones centrales de la losa donde los valores fueran máximos o mínimos, y en los puntos donde intersectan las caras exteriores de los muros con la losa en el caso de los apoyos. En estos mismos puntos también se tomaron los esfuerzos axiales.

Por otro lado, los esfuerzos de corte no se producen en los apoyos

Los cortes no se midieron en los centros de la losa, pero si en los apoyos. El punto donde se tomaron los valores se ubicó a **d** desde la cara interior del muro, cuyo valor se calculó como 0,9h, donde h es el espesor de la losa.



FIGURA 3-6 DIAGRAMA DE MOMENTO SOBRE SECCIÓN DE LOSA SUPERIOR. COMBINACIÓN C1.



FIGURA 3-7 DIAGRAMA DE MOMENTO SOBRE UNA ABERTURA EN LA LOSA SUPERIOR. COMBINACIÓN C1.

Para el caso de los muros laterales, como se puede observar en la Figura 3-8, las secciones de interés son sus intersecciones con las losa superior e inferior con el muro (en color rojo), y el centro del muro (en color azul). Los esfuerzos momentos se midieron en el centro y en los apoyos donde finalizaban las caras externas de las losas. Los esfuerzos axiales se tomaron en los mismos puntos donde se tomaron los momentos. Los cortes por otro lado se midieron solo en los apoyos a una distancia d = 0,9h de los puntos donde se midió el momento.



FIGURA 3-8 DIAGRAMA DE MOMENTO SOBRE UNA ABERTURA EN EL MURO. COMBINACIÓN C1.

Por último, las secciones de interés en la losa inferior son solo 2: la zona central de la losa, y las intersecciones con los muros laterales. Los esfuerzos de momento fueron medidos en la parte central de la losa, y en los apoyos, justo donde intersectaron las caras interiores de los muros, al igual que los esfuerzos axiales. Por otro lado, los cortes solo se midieron en los apoyos a d de los muros, determinado como 0,9h, donde h corresponde al espesor de la losa.



FIGURA 3-9 DIAGRAMA DE MOMENTO SOBRE UNA ABERTURA EN LA LOSA INFERIOR. COMBINACIÓN C1.

Los esfuerzos en la dirección longitudinal del túnel también se midieron, pero debido a que estos eran relativamente bajos respecto a los de la dirección principal en las secciones, se consideraron los valores más desfavorables en cada una de estas para los esfuerzos de corte y momento. Las secciones de estudio en este caso fueron la losa superior, el muro lateral y la losa inferior.

3.3.5.2. Túnel en Forma de Arco

En este caso las partes a estudiar se dividieron en 4, correspondientes a la losa superior, el muroarco, el muro lateral y la losa inferior, secciones que se pueden ver marcadas en la Figura 3-10

representación secciones túnel en fomra de arco.Figura 3-8 en color, rojo, blanco, azul, y negro, respectivamente. La losa superior corresponde a la sección del arco que divide las aberturas; el muro-arco, al arco restante que no considera la losa superior; el muro lateral, como la parte del túnel vertical que sostiene el arco superior y, por último, la losa inferior ubicada entre los 2 muros laterales.



FIGURA 3-10 REPRESENTACIÓN SECCIONES TÚNEL EN FOMRA DE ARCO.

Tanto en la losa superior como el muro-arco los puntos donde se tomaron los esfuerzos de momento y corte fueron aquellos más desfavorables a lo largo de la sección para cada combinación. La fuerza axial fue tomada en los mismos puntos donde el momento fue más desfavorable.

El muro lateral fue dividido en 2, una sección superior y otra inferior. En la sección superior, los esfuerzos de momento, corte y fuerza axial fueron medidas de la misma forma que la losa superior y el muro-arco. En cambio, para la parte inferior del muro, el esfuerzo de momento y la fuerza axial fueron tomados en la intersección con la losa inferior, y el corte a una distancia de 0,9h de la cara interna de la losa, donde h corresponde al espesor del muro.

La losa inferior, se dividió en 2 áreas de interés, correspondientes a las mismas de la losa inferior del túnel rectangular, representadas en la Figura 3-9, es decir, el centro y los apoyos. Los esfuerzos

de momento y fuerza axial fueron tomados en la intersección de la losa con el muro, y el corte a 0,9h, donde h es el espesor de la losa.

De igual manera que para el túnel rectangular, los valores de diseño para cada una de las combinaciones correspondientes a las secciones longitudinales al túnel se tomaron como los valores más desfavorables a lo largo de cada una de las diferentes secciones de la estructura. Para el caso de los esfuerzos de momento, estos se tomaron en los puntos máximos y mínimos, y la fuerza axial en el punto más desfavorable de momento. Las secciones medidas fueron la losa superior, el muro-arco, el muro lateral y la losa inferior.

3.4. MODELOS EN PLAXIS

Plaxis es un programa que permite, entre otras cosas, estudiar la relación suelo-estructura por medio de una malla de elementos finitos que modela el terreno. Esta es una característica que usualmente los programas estructurales no consideran, permitiendo una mayor precisión del comportamiento en conjunto de los elementos del diseño.

La principal limitante de la versión del programa con que se trabajo es que solo considera estudios en dos dimensiones. Esto es un problema al diseñar estructuras discontinuas en la dirección transversal a la de interés, ya que no representa fielmente el comportamiento de estas, ni lo que sucede en la otra dirección, y la representación de túneles de recuperación son un claro ejemplo de este problema. Los túneles de recuperación presentan discontinuidades en la dirección longitudinal debido a las aberturas en la losa superior. Representar estos como un túnel continuo no es opción, ya que existirían grandes diferencias con el modelo real, subvalorando las solicitaciones.

Para solucionar este problema se consideró, en vez de un corte transversal del túnel, una sección representativa de este que incluyese las partes de la abertura y la losa continua.

En las siguientes partes del capítulo se presentan las dos modelaciones realizadas, una para el túnel rectangular, y otra para el túnel en forma de arco en los casos estáticos. El análisis sísmico se hizo de manera separada el cual se explica en el capítulo 3.5, de manera que los modelos abarcan solo las partes estáticas de las combinaciones.

Para ambos modelos, se presentan las secciones representativas de diseño, los pasos realizados para modelar las estructuras y las solicitaciones que afectan al túnel incorporadas en los modelos.

3.4.1. MODELO RECTANGULAR

3.4.1.1. CONSTITUCIÓN DEL MODELO

Tal como se observa en la Figura 3-11, la sección elegida del túnel de recuperación corresponde a la marcada en rojo, la cual comprende media abertura, la sección completa de losa superior y otra media abertura, de un tramo total de 15 [m]; además de los muros laterales y la losa inferior.



FIGURA 3-11 REPRESENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE ESTUDIO EN SAP2000.

La constitución del modelo se hizo considerando una sección transversal representativa del terreno de 30 [m] de altura por 180 [m] de ancho (ver Figura 3-13). El diseño del túnel se hizo utilizando el comando de placas el cual representó las secciones de hormigón. La estructura se ubicó centrada en el terreno donde el eje de la losa superior se situó a nivel de superficie.

La losa superior se conformó con 4 placas, de las cuales las 2 centrales se tuvieron que diseñar con propiedades diferentes a las demás debido a que esta debía representar la sección discontinua producto de las aberturas para la extracción del mineral. Para modelar esta sección en Plaxis, se utilizó una ponderación de la inercia y el espesor a lo largo del tramo. Esto se tradujo al final en el programa en una reducción del módulo de elasticidad del hormigón.

	Muros	Losa Inferior	Losa Superior	L. Representativa
Espesor [m]	1,0	1,8	1,8	1,4
I [m4]	0,083	0,486	0,486	0,076
EA [kN/m]	2,5,E+07	4,6,E+07	4,6,E+07	1,2,E+07
EI [m]	2,1,E+06	1,2,E+07	1,2,E+07	1,9,E+06

Las dimensiones y propiedades de los elementos se muestran en la siguiente tabla.

TABLA 3-6PROPIEDADES DE LAS PLACAS DEL TÚNEL RECTANGULAR.

Las cargas correspondientes al chute se situaron en la unión de la losa superior con la losa representativa como cargas puntuales, mientras que las correspondientes a la plataforma se ubicaron a 5,8 [m] del eje de la losa inferior en cada muro.

El acopio de mineral se aplicó en el modelo como una carga distribuida dividida en 3 partes centrada en el terreno: la primera es la ubicada sobre la losa representativa aplicada como 2 solicitaciones sobrepuestas, una para cargas vivas y otra para muertas (Peso SP centro); la segunda, corresponde a la ubicada en la losa superior (Peso SP extremos); y la tercera es la que se ubica sobre el terreno a ambos lados del túnel hasta una distancia de 27 [m] del centro y que luego decrece constantemente hasta una distancia de 67 [m] del centro hasta alcanzar un valor de 0 [tonf/m] (Peso SP Terreno). Todas estas cargas se pueden ver representadas en la Figura 3-12.



FIGURA 3-12 DISPOSICIÓN DE LA CARGAS DEL ACOPIO PARA TÚNEL RECTANGULAR.

La razón de dividir la carga distribuida del acopio en segmentos sobre el túnel es porque dependiendo de su ubicación estas tendrán valores diferentes para cada combinación de carga. Las 5 combinaciones de carga se debieron analizar en modelos separados en los cuales se mantuvo la

ubicación de las cargas y la geometría del túnel. Los valores cargas para aplicadas producto de las combinaciones se presentan más adelante en punto 3.4.3.

Finalmente, se debieron colocar algunos puntos y líneas adicionales a la geometría que sirvieron para separar el terreno, apreciables en la Figura 3-12, y que tienen como función ser de referencia al momento de ejecutar el programa al representar la excavación del terreno. Las líneas horizontales que nacen de la base de las caras exteriores de los muros en la base tienen un largo de 1,5 [m] que representan un descanso utilizado para el movimiento de los trabajadores en la construcción. Estas líneas luego se proyectan hasta la superficie en 45°. Además de estas, existen 2 líneas horizontales adicionales que representaran diferentes cotas de excavaciones.



3.4.1.2. Ejecución del Modelo

Para ejecutar el modelo y obtener resultados, lo más representativos a la realidad posibles, se utilizó la opción de construcción por etapas o staged construction presente en el programa de cálculo incluido en Plaxis. Esta opción permite agregar o quitar secuencialmente las diferentes partes de la estructura y las cargas en el terreno definido de manera de asimilar el proceso constructivo. Para esto, la modelación se realizó en las siguientes etapas:

- Excavación: Se realizó en 3 pasos en las cuales se quitaba el terreno comprendido entre las líneas diagonales, hasta cada una de las líneas horizontales limitadas por las diagonales.
- Construcción: Esta también se realizó también en 3 etapas designadas para añadir secuencialmente al modelo la losa inferior, los muros laterales, y la losa superior.
- Rellenos: Para hacerlo de la forma más representativa posible de la realidad se agregaron secuencialmente los rellenos entre el talud formado por las diagonales y los muros laterales. Estos se hicieron en 3 etapas, cada una rellenando hasta las costas horizontales.
- Cargas Muertas: En este paso se activaron las cargas correspondientes a los chutes y a la plataforma.

- Carga Acopio: Se activaron todas las cargas producto de la pila.
- Cargas Vivas: Se colocaron las cargas correspondientes a la operación de la plataforma.

3.4.2. MODELO EN FORMA DE ARCO

3.4.2.1. Constitución del Modelo

Al igual que para el caso rectangular, en este modelo también se consideró una sección de largo 15 [m] como parte representativa del túnel. Está compuesta por una losa inferior, 2 muros laterales y un arco semicircular que une los muros. La parte central del arco incluye 2 mitades de aberturas, que al igual que para el caso rectangular, se modelaran como parte de una sección representativa del túnel. Para esto se realizará una ponderación del área y de la inercia proporcional en la sección seleccionada.



FIGURA 3-14 REPRESENTACION TÚNEL EN FORMA DE ARCO EN SAP2000.

La constitución del modelo se realizó de forma similar al túnel rectangular, es decir, considerando un terreno de 30 [m] de profundidad por 180 [m] de ancho. En este caso no se utilizaron placas, sino que el comando de túneles para generar la sección transversal del túnel de recuperación, la cual permite el uso de placas curvas. El arco, de igual forma que el túnel rectangular, se conformó por 4 placas cuyas 2 centrales corresponden a losas representativas de sección con aberturas.

	Muros	Losa Inferior	Losa Superior	L. Representativa
Espesor [m]	1,4	1,8	1,4	1,4
I [m4]	0,229	0,486	0,229	0,076
EA [kN/m]	3,6,E+07	4,6,E+07	3,6,E+07	1,2,E+07
EI [m]	5,8,E+06	1,2,E+07	5,8,E+06	1,9,E+06

TABLA 3-7PROPIEDADES DE LAS PLACAS DEL TÚNEL EN FORMA DE ARCO.

Debido a la imposibilidad del programa para colocar una carga distribuida sobre las placas curvas el túnel fue representado en el modelo completamente bajo superficie, consiguiendo de esta manera resultados un poco más conservadores. De esta forma se agrega adicionalmente un peso extra del terreno sobre el arco, que es relativamente despreciable frente al peso total del acopio.

Al estar el túnel bajo superficie en el modelo, los diferentes tramos de la carga distribuida se debieron colocar sobre la superficie del terreno. El tramo central de la carga distribuida se ubicó entre las proyecciones en superficie de la unión de la losa representativa con el resto del arco (Peso SP centro). El siguiente tramo se ubicó continuo al ubicado sobre la losa representativa hasta la proyección de los muros laterales (Peso SP extremos). El resto de la carga distribuida se ubicó de manera similar al túnel rectangular, proyectándose hacia los extremos hasta una distancia de 27 [m] del eje central del túnel, para luego decrecer monotónicamente hasta un valor de 0 [tonf/m] en los 67 [m] (Peso SP Terreno). La representación de estas cargas se puede ver en la Figura 3-15.



FIGURA 3-15 DISPOSICIÓN DE LA CARGA DEL ACOPIO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO.

Las cargas correspondientes al chute se agregaron en la intersección de la losa representativa con el resto del arco, como una carga vertical. Por otro lado, las solicitaciones vivas y muertas de la plataforma se situaron a 3,5 [m] del eje de la losa inferior sobre los muros.

Por otro lado, como se puede ver en la Figura 3-15, se agregaron algunas líneas adicionales horizontales y diagonales cuya finalidad es representar la excavación al momento de construir el túnel en terreno. El detalle de esto se encuentra en el punto 3.4.2.2.

Se realizaron 5 modelos utilizando esta geometría de túnel de recuperación, una para cada combinación de cargas. Los valores de cada una de las solicitaciones del sistema utilizadas en el modelo se detallan en la sección 3.4.3.

3.4.2.2. Ejecución del Modelo

De manera similar al túnel rectangular, se utilizó la función de construcción por etapas presente en Plaxis y obtener el resultado más realista posible de los esfuerzos. Esto permitió activar o desactivar los diferentes elementos o cargas del modelo de manera secuencial. Las fases de cálculo introducidas fueron las siguientes:

- Excavación: Esta se realizó en 3 pasos en las cuales se quitando el terreno comprendido entre las líneas diagonales, hasta cada una de las líneas horizontales.
- Construcción: En 3 etapas se constituyó el túnel, primero la losa inferior, luego los muros y finalmente el arco completo.
- Rellenos: Luego de la construcción del túnel se debió simular el relleno entre los taludes y los muros. Esto se hizo en 3 etapas rellenando diferentes cotas.
- Cargas Muertas: Aquí se activaron las cargas de los chutes y la plataforma.
- Carga Acopio: Se activaron todas las cargas correspondientes al peso del acopio sobre el terreno.
- Cargas Vivas: Se modificó la carga muerta de la plataforma para adicionarle su correspondiente carga viva.

3.4.3. CARGAS SOLICITANTES

En esta sección se presentan los valores de las cargas solicitantes para ambas geometrías de túneles de recuperación, la rectangular y la de forma de arco. Algunas de estas cargas varían dependiendo de cuál túnel se encuentre debido principalmente a la dimensión de la base.

(D) Peso Propio de la Estructura

Peso propio hormigón:

$$\gamma_h = 2,5 [ton f/m^2]$$

(D) Peso Propio de la Plataforma

Esta carga se aplicó en los muros laterales de los modelos de túneles de recuperación. El valor de esta fuerza se definió en función del área total de la base y de cargas estándares promedio se utilizan actualmente en el mercado.

Peso propio de la plataforma:	$PP_{pt} = 0.3 \left[tonf/m^2 \right]$
Ancho del túnel:	$B_{tr} = 7 \ [m]$
Peso en cada muro en túnel rectangular:	$D_{pl} = \frac{PP_{pt} \cdot B_{tr}}{2} = 1,1 \ [tonf/m]$

A pesar de que las dimensiones interiores de los túneles rectangulares y en forma de arco difieren entre sí, la carga utilizada para la plataforma se dispondrá con el mismo valor en ambos tipos de túneles de recuperación. Esto es a modo de simplificación considerando además que esta carga es despreciable frente a otras.

(D) Peso Propio Chutes

Esta carga para ser modelada adecuadamente se consideró como una carga equivalente por metro en profundidad del túnel, debido a que el programa solo analiza en 2 dimensiones. En esta carga se considera el peso de los chutes mismos más las planchas de desgaste de las aberturas.

Peso propio chutes + planchas de desgaste:	$PP_{ch} = 120 \ [tonf]$
Largo abertura:	$L_{ab} = 10 \ [m]$
Largo losa superior:	$L_{sup} = 5 [m]$

El peso de los chutes se colocó en el modelo como 2 cargas puntuales en los bordes de las aberturas, es decir, entre el final de la losa representativa y la losa completa. El valor de dichas cargas se definió como una proporción del total del peso distribuido a lo largo de la sección de estudio.

Carga muerta en un borde de abertura:
$$D_{ch} = \frac{1}{2} \frac{PP_{ch}}{\frac{L_{ab}}{2} + L_{sup} + \frac{L_{ab}}{2}} = 4 [tonf/m]$$

(D) Peso del Acopio

Se considera que en la dirección longitudinal de la sección estudiada del túnel la solicitación productos del acopio no varía, por lo tanto, la carga distribuida por metro lineal en la losa correspondiente a los apoyos tiene el valor de:

Carga pila en apoyos losa superior: $D_{sp-a} = 77 [ton f/m]$

En el caso de la sección de la losa superior central, se colocará una fracción de la carga anterior, proporcional a la sección efectiva de losa en la sección estudiada.

Largo abertura:	$L_{ab} = 10 \ [m]$
Largo losa superior:	$L_{sup} = 5 \ [m]$

Carga pile en centro de losa superior:

$$D_{sp-c} = D_{sp-a} \cdot \frac{L_{sup}}{L_{sup}+L_{ab}} = 25.6 \ [tonf/m]$$

(L) Sobrecarga de Plataforma.

Sobrecarga sobre muros laterales:	$SC_{plm} = 0.8 \left[tonf/m^2 \right]$
Ancho del túnel rectangular:	$B_{tr} = 7 [m]$
Peso sobrecarga en un muro:	$L_{pl} = \frac{SC_{ptm} \cdot B_{pt}}{2} = 2,8 \ [tonf/m]$

Al igual que para la carga muerta de la plataforma, esta se dispondrá para igual en ambos túneles de recuperación, el rectangular y el en forma de arco. Su disposición en los modelos será a 4 [m] de la losa inferior en cada muro, aproximadamente.

(L) Sobrecarga del Acopio en el Chute.

De igual manera que para la carga muerta del peso del acopio, esta se considera que no varía en la dirección longitudinal para la sección estudiada, por lo que la carga por área en las aberturas es la misma que por metro lineal. Esta carga se situó en el centro, en la sección representativa de la abertura, la cual se dispuso como una fracción del total proporcional al tamaño de las aberturas en la sección estudiada.

Carga de la pila sobre lanzas:	$P_{la} = 77 \ [tonf/m]$
Largo abertura:	$L_{ab} = 10 \ [m]$
Largo losa superior:	$L_{sup} = 5 [m]$
Carga viva sobre lanzas:	$L_{la} = P_{la} \cdot \frac{L_{ab}}{L_{sup} + L_{ab}} = 51,3 \ [tonf/m]$

(H) Empujes del suelo.

Los empujes no se cargaron directamente al programa como cargas adicionales ya que estos, de acuerdo a la modelación realizada en Plaxis, son determinados automáticamente por el programa. Sin embargo, existen cargas distribuidas aplicadas en el terreno las cuales afectan directamente a los empujes del suelo sobre el túnel.

Carga sobre terreno:

$$D_{sp-t} = 77 [tonf/m]$$

(E) Sismo horizontal.

Las cargas sísmicas en esta estructura no se expondrán en esta sección ya que se analizaron de manera separada, cuyo detalle se encuentra en capítulo de Análisis Sísmico en el punto 3.5.

En los modelos realizados en Plaxis, los valores antes mencionados para cada una de las solicitaciones, no fueron colocados directamente en estos, sino valores ponderados por la combinación correspondiente al modelo. La razón de esto, es que no es posible colocar combinaciones de carga en el programa, por lo que se debió realizar cada una estas de forma aparte. En la siguiente tabla se muestran de los valores de cada una de las cargas dispuestas por modelo.

		FACTORES DE AMPLIFICACIÓN POR COMBINACIÓN					
			C1	C2	C3	C4	C5
		D	1,2	1,2	1,2	1,2	0,9
		L	1,6	1	1	1	0
		Н	1,6	1,6	0,9	1,2	1,2
		PONDERACIÓN DE CARGAS [tonf/m]					
Тіро	Tipo de Carga	Valor	C1	C2	C3	C4	C5
D	Peso SP Extremos	77,0	92	92	92	92	69
D	PP Plataforma	1,1	1	1	1	1	1
D	PP Chutes	4,1	5	5	5	5	4
D	Peso SP Centro	25,7	31	31	31	31	23
L	SC Centro	2,9	5	3	3	3	0
L	SC SP Centro	51,3	82	51	51	51	0
Н	Peso SP Terreno	77,0	123	123	69	92	92

TABLA 3-8RESUMEN DE VALORES UTILIZADOS EN LOS MODELOS DE PLAXIS.

3.4.4. METODOLOGÍA DE MEDICIONES

El programa al trabajar con elementos finitos divide los elementos del túnel y el suelo en una serie de puntos de las cuales se puede obtener los esfuerzos internos. De las placas que representan las diferentes partes del túnel se pudieron obtener los valores a lo largo para la fuerza axial, el corte y el momento.

Las áreas de interés del túnel rectangular se dividieron en las siguientes: losa superior, losa borde de corte, muro lateral y losa inferior. La primera es la constituida por la sección representativa que incluye las áreas; la segunda, corresponde al resto de la losa superior; el muro lateral, corresponde a las secciones verticales que sostienen la losa superior, y la losa inferior que cierra la estructura por debajo.

Para el caso del túnel en forma de arco, las secciones en que se dividió el análisis fueron la losa superior, constituida al arco entre aberturas definición con por la sección representativa del túnel; el muro-arco, correspondiente al resto del arco; el muro lateral, definida como los 3 metros verticales que sostienen el arco, y la losa inferior que se ubica entre muros.

La fuerza axial siempre se tomó en el punto donde el esfuerzo de momento fue medido. El esfuerzo de momento fue tomado en los puntos donde empieza la losa o los muros, o en el centro de las secciones. El esfuerzo de corte, por otra parte, no se obtuvo del mismo lugar. Para el caso de las losas, este se obtuvo a una distancia d_1 de la cara interna de los muros, y en el caso de los muros, los valores obtenidos fueron a una distancia d_2 de la cara interior de las losas. Los valores de estas constantes se encuentran en la siguiente tabla.

	TABLA 3-9	DISTANCIAS PARA MEDICIÓN DEL CORTE.
--	-----------	-------------------------------------

	DISTANCIAS DE CORTE		
	Rectangular	Forma de Arco	
d 1 [m]	1,62	1,62	
d 2 [m]	0,90	1,26	

Dependiendo de la discretización realizada por el programa estas distancias fueron en general aproximadas a los puntos más cercanos, siempre de manera conservadora.

Para el caso de la parte superior del túnel en forma de arco, los valores del esfuerzo de momento se tomaron en el punto donde el primero es más desfavorable, y se registraron los valores máximos y mínimos. El corte también se midió como el máximo valor absoluto a lo largo de la sección. Esto debido a que los esfuerzos de momento y cortes no son máximos necesariamente en los apoyos, sino que se desarrollan a lo largo de la sección.

Debido a que este corresponde a un programa en 2 dimensiones, no se tomaron mediciones de esfuerzos internos en la sección perpendicular a las mencionadas.

3.5. ANÁLISIS SÍSMICO

La razón detrás de este análisis es determinar cuál de los métodos presentados en el punto 2.5 es más desfavorable para el diseño de un túnel de recuperación, y con esto determinar los esfuerzos finales de diseño de cada uno de los modelos realizados tanto en Sap2000 como en Plaxis. Debido a las condiciones y cargas a las que se encuentran sometidas estas estructuras no es posible elegir un método directamente ni tampoco acogerse a la recomendación de la AASHTO de no considerar este tipo de cargas, ya que estos métodos están pensados para subterráneos de edificios principalmente o túneles mineros.

El análisis que se realizó fue uno comparativo de los diferentes procedimientos presentes en el Manual de Carreteras y de la NCh433, métodos que utilizan actualmente en la industria chilena. Estos se implementaron en el modelo de túnel rectangular descrito en la sección en 3.3 realizado en Sap2000. De este se tomaron los datos de las losas superiores e inferiores de la estructura correspondientes a los puntos más críticos del sistema y se compararon entre sí.

El método correspondiente a los registros sísmicos se realizó por medio del programa Plaxis en el modelo de túnel rectangular descrito en 3.4.1, cuyos resultados también se utilizaron en la comparación de los modelos. Los empujes sísmicos se determinaron utilizando registros que pertenecen al terremoto de Iquique de 2014 cuya magnitud fue de 8.2 M_w , datos obtenidos a través de la página del Centro Sismológico Nacional. La estación evaluada fue la de Pisagua, ubicada en la costa 70 [km] al norte de Iquique, prácticamente al frente del epicentro del terremoto ubicado en el mar.

Los resultados de estos analisis se utilizaron de forma posterior para el análisis comparativo de las propuestas, es decir, en el diseño estructural. Para el caso del modelo en forma de arco, a modo de simplificación, se utilizó el mismo método determinado para el caso rectangular, con el cual se obtuvieron los esfuerzos internos que finalmente se adicionaron a los estáticos.
4. RESULTADOS

4.1. MODELOS EN SAP2000

Para los modelos de túneles de recuperación, se determinaron las solicitaciones máximas de fuerza axial, corte y momento para cada combinación de carga de acuerdo a lo descrito en la sección Metodología de Mediciones, punto 3.3.5, en la dirección principal de cada sección del túnel. En esta sección del capítulo se presentan de forma resumida los valores de los esfuerzos internos, cuyo detalle para cada combinación de carga se puede encontrar en el Anexo A. Se encuentran tanto los resultados en la dirección principal de análisis, como en la transversal.

Además de esto, se presentan los valores de las contantes de balastos utilizadas en los diferentes modelos, el análisis de la capacidad portante del suelo y de las deformaciones máximas admisibles.

4.1.1. CONSTANTE DE BALASTO ESTÁTICAS

Se determinaron las constantes de balasto de acuerdo al punto 3.3.4 utilizadas en los modelos en Sap2000. Estas son dependientes del modelo en que se aplican ya sea el rectangular o en con forma de arco, y solo corresponden al caso estático.

Para el caso rectangular, los resortes verticales a utilizar fueron los siguientes.

TABLA 4-1 DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE BALASTO PARA EL TÚNEL RECTANGULAR.

Dimensiones Túnel [m]		
Ancho B	9,4	
Largo L	75	
Estrato H	20	

 TABLA 4-2
 CONSTANTE DE BALASTO PARA TÚNEL RECTANGULAR.

Constante de Balasto		
М	7,98	
N	2,13	
L1	0,28	
L2	0,70	
Kv [tonf/m³]	1383,24	

Por otro lado, los resortes determinados para el caso del túnel en forma de arco se presentan a continuación:

TABLA 4-3 DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE BALASTO PARA EL TÚNEL RECTANGULAR.

Dimensiones Túnel [m]		
11,4		
75		
20		
	Γúnel [m] 11,4 75 20	

TABLA 4-4 CONSTANTE DE BALASTO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO.

Constante de Balasto			
М	6,58		
N	1,75		
L1	0,23		
L2	0,46	_	
Kv [tonf/m³]	1592,37	_	

4.1.2. MODELO RECTANGULAR EN SAP2000.

4.1.2.1. RESULTADOS EN LA DIRECCIÓN PRINCIPAL

 TABLA 4-5
 RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL RECTANGULAR. DIRECCIÓN PRINCIPAL.

_	TUNEL RECTANGULAR			
	Ν	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
LS Centro	-580	-	810	
LS Borde Abertura	-545	-	880	
LS Apoyos	-970	375	-360	
LS Borde Corte	-950	425	-355	
Muro Superior	-470	215	320	
Muro Centro	-350	-	-235	
Muro Inferior	-480	210	280	
LI Centro	-190	-	-490	
LI Apoyos	-365	240	370	

4.1.2.2. RESULTADOS EN LA DIRECCIÓN TRANSVERSAL

	TÚNEL RECTANGULAR TRANSVERSAL		
	N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
LS Transversal M-	575	165	-125
LS Transversal M+	-2100	-	105
Muro M-	-60	52	-95
Muro M-	360	-	200
LI Transversal M-	82	10	-100
LI Transversal M+	220	0	90

TABLA 4-6 RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL RECTANGULAR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

4.1.3. MODELO CON FORMA DE ARCO EN SAP2000

4.1.3.1. RESULTADOS EN LA DIRECCIÓN PRINCIPAL

	TÚNEL FORMA DE ARCO			
	Ν	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
Losa Superior	-1090	90	260	
Muro-Arco	-175	190	100	
Muro Superior	-460	160	-220	
Muro Inferior	-590	160	-360	
LI Centro	-270	-	-885	
LI Apoyos	-280	335	260	

4.1.3.2. RESULTADOS EN LA DIRECCIÓN TRANSVERSAL

_	TÚNEL FORMA DE ARCO TRANSVERSAL		
	N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
LS Transversal M-	-300	183	-20
LS Transversal M+	-350	-	115
Muro-Arco Transversal M-	-145	210	-55
Muro-Arco Transversal M+	-40	-	40
Muro Transversal M-	-155	78	-89
Muro Transversal M+	-93	-	15
LI Transversal M-	-62	78	-215
LI Transversal M+	-60	-	85

RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL EN FORMA DE ARCO. DIRECCIÓN TRANSVERSAL. TABLA 4-8

4.1.4. CAPACIDAD DE PORTANTE DEL SUELO

Para definir la capacidad portante del suelo se usaron las fórmulas de Binch-Hansen.

Características del terreno:

c = 0 [MPa]

$q_s = 0 \ [MPa]$	Sobrecarga sobre nivel de cimentación
	(consideración conservadora)
$\phi_t = 37^\circ$	Ángulo de fricción del terreno.

Cohesión del suelo.

Coeficientes de capacidad de carga:

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan(\phi_t)} \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\phi_t}{2}\right)^2 \qquad \qquad N_q = 42,92$$
$$N_c = \frac{N_q - 1}{\tan(\phi_t)} \qquad \qquad N_c = 55,63$$
$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan(\phi_t) \qquad \qquad N_\gamma = 66,19$$

Coeficientes de forma:

$$s_q = 1 + \frac{B}{L_t} \cdot \tan(\phi_t) \qquad \qquad s_q = 1,09$$

Factores de seguridad:

$$FS_{est} = 3$$
Factor estático. $FS_{sis} = 2$ Factor sísmico.

CAPACIDAD ADMISIBLE DE SOPORTE DEL SUELO

$$\begin{split} \sigma_{adm-est} &= \frac{1}{FS_{est}} \cdot \left(s_c \cdot c \cdot N_c + s_q \cdot q_s \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot s_\gamma \cdot B \cdot \gamma_r \cdot N_\gamma \right) \\ \sigma_{adm-est} &= 207,7 \ [tonf/m^2] \\ & \text{Estática.} \\ \sigma_{adm-sis} &= \frac{1}{FS_{sis}} \cdot \left(s_c \cdot c \cdot N_c + s_q \cdot q_s \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot s_\gamma \cdot B \cdot \gamma_r \cdot N_\gamma \right) \\ \sigma_{adm-sis} &= 311,6 \ [tonf/m^2] \\ \end{split}$$

De acuerdo a los resultados, las tensiones máximas presentes en los modelos son:

Túnel Rectangular:

$\sigma_{est-sap} = 103,4[tonf/m^2]$	Combinación C6.
$\sigma_{sis-sap} = 94,6[tonf/m^2]$	Combinación C9.
Túnel en Forma de Arco:	
$\sigma_{est-sap} = 97,1[tonf/m^2]$	Combinación C6.
$\sigma_{sis-sap} = 92,2[tonf/m^2]$	Combinación C9.

Se puede notar que ambos túneles cumplen con las tensiones admisibles del suelo, tanto para las condiciones estáticas y dinámicas.

4.2. MODELOS EN PLAXIS

Al igual que en los resultados del Sap2000, en esta parte del capítulo se presentan de forma sintetizada los resultados finales de los esfuerzos más desfavorables que afectaron a cada sección de los modelos hechos en Plaxis. Aquí no se presentan los resultados para cada combinación de carga, ya que estos se encuentran en el Anexo B.

También en esta sección se encuentra un análisis de la capacidad portante del suelo y de las deformaciones máximas admisibles.

4.2.1. MODELO RECTANGULAR

 TABLA 4-9
 RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL RECTANGULAR EN PLAXIS. DIRECCIÓN PRINCIPAL.

	TÚNEL RECTANGULAR		
	N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
Losa Superior Centro	-201	-	491
Losa Superior Borde Corte	-201	299	-275
Muro Superior	-598	114	-186
Muro Centro	-468	-	89
Muro Inferior	-495	135	-226
Losa Inferior Centro	-189	-	-809
Losa Inferior Apoyos	-152	282	93

4.2.2. MODELO CON FORMA DE ARCO

TABLA 4-10RESUMEN RESULTADOS ESTÁTICOS TÚNEL EN FORMA DE ARCO EN PLAXIS. DIRECCIÓN
PRINCIPAL.

	TÚNEL FORMA DE ARCO		
	Ν	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
Losa Superior	-357	112	159
Muro Arco	-683	123	-361
Muro Superior	-652	128	-449
Muro Inferior	-705	64	-298
Losa Inferior Centro	-98	-	-1112
Losa Inferior Apoyos	-120	321	78

4.2.3. CAPACIDAD DE PORTANTE DEL SUELO

Los resultados del Plaxis no muestran, para ninguno de los modelos de túneles de recuperación, que la capacidad del suelo haya sido excedida. En algunos puntos, principalmente en las esquinas de la losa inferior, se muestra cierta plastificación del suelo circundante, sin embargo, no existe un colapso del terreno.

4.3. ANÁLISIS SÍSMICO

En esta parte se expondrán los resultados finales del análisis para el diseño sísmico explicado en el capítulo 3.3.3. Estos resultados corresponden a los obtenidos mediante los modelos en Sap2000 con la intención de observar los esfuerzos generados en los puntos más desfavorables principalmente en la losa superior y la losa inferior.

4.3.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SÍSMICO

TABLA 4-11RESORTES VERTICALES.

	Balasto [tonf/m ³]	FRS	Kv [tonf/m ³]
Túnel Rectangular	1383	1,6	4426
Túnel en Forma de Arco	1592	1,6	5094

Los resultados que se obtienen aplicando la metodología del manual de carreteras no están mayorados, en cambio, los correspondientes al método de la NCh433 y registro sísmico si lo están.

TABLA 4-12RESULTADOS MÉTODO DETALLADO EN LOSA SUPERIOR E INFERIOR. NO CONSIDERA CARGA DE LA
PILA.

M.C.D. Carga Re	ectangular	M.C.D. Carga Triangular	
Losa Superior	sin Carga	Losa Superior sin Carga	
Central	-54	Central	-65
Central borde	-62	Central borde	-78
Apoyos	-36	Apoyos	-48
Losa Inferior s	Losa Inferior sin Carga Losa Inferior sin		sin Carga
Centro	28	Centro	33
Apoyos	40	Apoyos	41

TABLA 4-13RESULTADOS MÉTODO DETALLADO EN LOSA SUPERIOR E INFERIOR. CONSIDERA LA CARGA DE LA
PILA.

M.C.D. Carga Recta	ectangular con SP M.C.D. Carga Triangular co		ngular con SP
Losa Superior	con Carga	Losa Superior	con Carga
Central	-64	Central	-72
Central borde	-78	Central borde	-86
Apoyos	-50	Apoyos	-53
Losa Inferior o	on Carga	Losa Inferior o	con Carga
Centro	33	Centro	45
Apoyos	46	Apoyos	32

TABLA 4-14RESULTADOS MÉTODO APROXIMADO EN LOSA SUPERIOR E INFERIOR. NO CONSIDERA CARGA DE
LA PILA.

M.C.A. Carga Re	ectangular	M.A.D. Carga Triangular	
Losa Superior	sin Carga	Losa Superior sin Carga	
Central	-18	Central	-33
Central borde	-22	Central borde	-50
Apoyos	-32	Apoyos	-47
Losa Inferior s	in Carga	Losa Inferior sin Carga	
Centro	-31	Centro	-32
Apoyos	32	Apoyos	36

TABLA 4-15RESULTADOS MÉTODO SIMPLIFICADO EN LOSA SUPERIOR E INFERIOR. NO CONSIDERA CARGA DE
LA PILA.

M.C.S. Carga Re	ctangular	M.A.S. Carga Triangular	
Losa Superior	sin Carga	Losa Superior sin Carga	
Central	39	Central	39
Central borde	45	Central borde	46
Apoyos	18	Apoyos	18
Losa Inferior s	Losa Inferior sin Carga		sin Carga
Centro	-60	Centro	-60
Apoyos	-27	Apoyos	-28

 TABLA 4-16
 RESULTADOS DE MÉTODO DE LA NCH433 PARA LOSA INFERIOR Y SUPERIOR. SIN MAYORAR.

NCH 433 Carga R	ectangular	NCH 433 Carga Rectangular	
Losa Superior	sin Carga	Losa Superior con Carga	
Central	39	Central	40
Central borde	45	Central borde	55
Apoyos	13	Apoyos	-48
Losa Inferior s	Inferior sin Carga Losa Inferior con Ca		con Carga
Centro	-61	Centro	-74
Apoyos	-23	Apoyos	60

TABLA 4-17RESULTADOS DE MÉTODO DE LA NCH433 PARA LOSA INFERIOR Y SUPERIOR. VALORES
MAYORADOS POR 1,4.

NCH 433 Carga R	ectangular	NCH 433 Carga Rectangular Losa Superior con Carga	
Losa Superior	sin Carga		
Central	55	Central 56	
Central borde	63	Central borde	77
Apoyos	18	Apoyos	-67
Losa Inferior s	in Carga	Losa Inferior con Carga	
Centro	-85	Centro	-104
Apoyos	-32	Apoyos	84

Por último, se muestran los resultados obtenidos mediante el programa Plaxis por medio de un registro sísmico aplicado en la estructura. La tabla corresponde a los resultados del registro de la estación Pisagua para el terremoto de Iquique 2014 en las coordenadas este-oeste y norte-sur.

PLAXIS SISMO	PSG E-O	PLAXIS SISMO	D PSG N-S
Losa Superior	sin Carga	Losa Superior con Carga	
Central	0,00	Central	0,00
Central borde	-1,35	Central borde	3,17
Losa Inferior	sin Carga	Losa Inferior con Carga	
Centro	0,00	Centro	0,01
Apoyos	2,70	Apoyos	6,50

TABLA 4-18	RESULTADOS DEL PLAXIS PRODUCTO DEL REGISTRO DE ESTACIÓN PISAGUA
------------	---

De acuerdo a los resultados expuestos de cada uno de los métodos analizados, se puede observar que no difieren demasiado entre sí, a excepción del método por medio de registros sísmicos, el cual debería ser el más aproximado a la realidad dado que representa un caso real en una zona más riesgosa que el emplazamiento de este proyecto.

Dentro de los métodos del Manual de Carreteras, los resultados que se esperaba fueron más conservadores debieron ser los del método simplificado, sin embargo, el método detallado resulto ser el más desfavorable para la estructura. Los resultados producto del método de la NCh433 se asemejaron bastante a los obtenidos por medio del método detallado.

La diferencia entre un método y otro oscila entre un 20-40%. El más desfavorable para la losa superior es el método detallado con fuerzas laterales triangulares modificado para que considere la carga de la pila; en cambio, para la losa inferior, corresponde método de la NCh433 que considera la carga del acopio.

Como el sector más desfavorable del túnel corresponde a la losa superior central, el método de diseño que se utilizará será el del Método Detallado de Carga Triangular con SP, el cual considera la carga de la pila.

4.3.2. ESFUERZOS INTERNOS DE CARGAS SÍSMICAS

A continuación, se presentan los esfuerzos obtenidos por medio del Método Detallado con Carga Triangular modificado para considerar la carga de la pila en todas las secciones que son de interés para el diseño. Los resultados no necesariamente son los mismos expuesto en la Tabla 4-13, puesto que se debieron obtener de nuevo en lugares del túnel que se aproximaran a los puntos donde los resultados estáticos fueron tomados. Esto permitió una mejor solución para los resultados finales al momento de adicionar estos a los resultados estáticos.

TABLA 4-19RESULTADOS FINALES MÉTODO DETALLADO CON CARGA TRIANGULAR CONSIDERANDO LA PILA.
TÚNEL RECTANGULAR.

	M.C.D. CAR	M.C.D. CARGA TRIANGULAR CON SI		
	Ν	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
LS Centro	-100	-	-75	
LS Borde Abertura	-210	-	-90	
LS Apoyos	-33	4	-55	
LS Borde Corte	-100	5	-45	
Muro Superior	-10	20	10	
Muro Centro	-10	-	30	
Muro Inferior	5	20	25	
LI Centro	0	-	30	
LI Apoyos	0	4	45	

TABLA 4-20

RESULTADOS FINALES MÉTODO DETALLADO CON CARGA TRIANGULAR CONSIDERANDO LA PILA. TÚNEL EN FORMA DE ARCO.

	M.C.D. CARGA TRIANGULAR CON SP		
	Ν	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
Losa Superior	-77	35	39
Muro Superior	-10	35	35
Muro Central	-10	20	35
Muro Inferior	-15	20	30
LI Centro	0	-	10
LI Apoyos	0	-12	45

Como se puede notar, los esfuerzos producto de las cargas sísmicas son relativamente bajos respecto a las cargas estáticas, esto a pesar de que corresponden al caso más conservador de los métodos analizados (véase 4.1).

4.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS

En esta sección se compararon los resultados de los esfuerzos estáticos obtenidos por medio de los programas Plaxis y Sap2000. Debido a la limitación del Plaxis de trabajar en dos dimensiones, la comparación de resultados se realizó en las partes que tenían en común entre ellos. Para el caso del túnel rectangular esas partes comparables fueron la losa superior, losa superior borde corte, muro superior, muro central, muro inferior, losa inferior central y losa inferior apoyos. En el caso del túnel en forma de arco, todas las secciones fueron comparadas.

Además, se verificó la influencia de las combinaciones dinámicas en los valores finales de diseño.

4.4.1. COMPARACIÓN POR FORMA

Las secciones de los túneles de recuperación se diseñan principalmente a esfuerzos de momento, exceptuando solo las secciones a los costados de las aberturas las cuales se suelen diseñar por esfuerzo de corte. La forma de los túneles afecta la distribución de esfuerzos internos generando importantes variaciones entre los modelos en forma de arco y rectangular, lo que impacta directamente el diseño o la construcción. Para el análisis comparativo se trabajó con la razón entre esfuerzos de los túneles rectangulares y de arco, las que se pueden ver en las siguientes tablas.

SAD2000 -	RECTANGULAR/FORMA DE ARCO		
3AF2000 -	Ν	Q	М
Losa Superior	0,5	-	3,1
Muro Superior	2,7	1,1	3,2
Muro Central	0,8	-	1,1
Muro Inferior	0,8	1,3	-0,8
LI Centro	0,7	-	0,6
LI Apoyos	1,3	0,7	1,4

TABLA 4-21RELACIÓN RESULTADOS ENTRE FORMA RECTANGULAR Y DE ARCO. SAP2000.

 TABLA 4-22
 RELACIÓN RESULTADOS ENTRE FORMA RECTANGULAR Y DE ARCO. PLAXIS.

	RECTANGULAR/FORMA DE ARCO		
PLANIS -	Ν	Q	Μ
Losa Superior	0,6	-	3,1
Muro Superior	0,9	0,9	0,5
Muro Central	0,7	-	-0,2
Muro Inferior	0,7	2,1	0,8
LI Centro	1,9	-	0,7
LI Apoyos	1,3	0,9	1,2

Si se analizan las secciones más solicitadas de acuerdo a los resultados obtenidos por Sap2000 (detalle en capítulo 4.1) las mayores diferencias se dan en las losas superiores e inferiores de estos, secciones controladas por momento. El esfuerzo de momento en la losa superior del modelo rectangular es 3,1 veces el máximo del modelo en forma de arco, mientras que en la losa inferior del rectangular corresponde a 0,6 veces el segundo túnel, aproximadamente.

Para el caso de los modelos realizados en Plaxis (detalle en capítulo 4.2) el resultado del análisis no cambia demasiado. La relación de momentos para la losa superior entre los modelos rectangular y el de forma de arco también es de 3,1, mientras que la misma relación para la losa inferior es de 0,7.

4.4.2. COMPARACIÓN DE PROGRAMAS

Tanto el Sap2000 como el Plaxis tienen distintos enfoques y por lo tanto también trabajan de manera muy diferente. El análisis comparativo de ambos programas infiere en la confiabilidad que tienen los resultados para el usuario por lo que es necesario estudiarlo.

Al igual que para la comparación por formas del punto anterior, aquí se trabajó con relaciones entre los resultados del Sap2000 frente a los del Plaxis los que se pueden ver en las siguientes tablas.

	SAP2000/PLAXIS		
RECTANGULAR	Ν	Q	Μ
LS Centro	2,9	-	1,7
LS Borde Corte	4,7	1,4	1,3
Muro Superior	0,8	1,9	1,7
Muro Centro	0,7	-	2,7
Muro Inferior	1,0	1,6	1,2
LI Centro	1,0	-	0,6
LI Apoyos	2,4	0,9	4,0

TABLA 4-23	RELACIÓN DE RESULTADOS ENTRE SAP2000 Y PLAXIS. TÚNEL RECTANGULAR.

FORMA DE	SAP2000/PLAXIS		
ARCO	Ν	Q	Μ
Losa Superior	3,1	0,8	1,6
Muro Superior	0,3	1,5	-0,3
Muro Central	0,7	1,3	0,5
Muro Inferior	0,8	2,5	1,2
LI Centro	2,7	-	0,8
LI Apoyos	2,3	1,0	3,3

TABLA 4-24RELACIÓN DE RESULTADOS ENTRE SAP2000 Y PLAXIS. TÚNEL EN FORMA DE ARCO.

Las relaciones dejan claro que ambos programas tienen resultados diferentes y que prácticamente no comparten nada. Se puede ver claramente que los esfuerzos de momento y corte del Sap2000 son mayores que en Plaxis de manera significativa. Si se tiene en cuenta que la losa superior corresponde a una sección critica del túnel, una variación de casi el doble en los resultados se puede traducir en una distribución significativamente más compleja de la armadura interior.

La única sección donde en el Plaxis es mayor es en la losa inferior, lugar donde el esfuerzo de momento respecto al Sap2000 aumenta en el centro y los apoyos para ambos túneles.

4.4.3. INFLUENCIA DE LAS CARGAS SÍSMICAS EN EL DISEÑO

Para ver la influencia de las cargas sísmicas en el diseño de túneles se utilizaron los resultados de diseño correspondientes a las cargas estáticas más las dinámicas en las correspondientes combinaciones de carga. Estos resultados analizados son los que se encuentran en el Anexo C para el Sap2000 y Anexo D para el Plaxis.

A continuación, se muestran las combinaciones que rigen los diseños en cada túnel en Sap2000, donde las C4 y C5 corresponden a las combinaciones que en sus fórmulas interiores contienen solicitaciones sísmicas agregadas.

TABLA 4-25COMBINACIONES QUE CONTROLAN EN DISEÑO. TÚNEL RECTANGULAR EN SAP2000.

	TÚNEL RECTANGULAR		
	Combinación	Combinación	
	Q	Μ	
LS Centro	-	С3	
LS Borde Abertura	-	С3	
LS Apoyos	C1	C5	
LS Borde Corte	C1	C2	
Muro Superior	C1	C1	
Muro Centro	-	C2	
Muro Inferior	C2	C1	
LI Centro	-	C3	
LI Apoyos	C1	C2	

TABLA 4-26 COMBINACIONES QUE CONTROLAN EN DISEÑO. TÚNEL EN FORMA DE ARCO EN SAP2000.

	TÚNEL EN FORMA DE ARCO		
	Combinación	Combinación	
	Q	Μ	
Losa Superior	C5	C3	
Muro Arco	C1	C4	
Muro Superior	C1	C4	
Muro Inferior	C2	C1	
LI Centro	C1	C1	
LI Apoyos	C1	C5	

El túnel rectangular resulta ser menos influenciado por las cargas sísmicas que el túnel en forma de arco. En el primero, solo los apoyos de la losa superior quedan controlados por una combinación que presenta esfuerzos sísmicos, mientras que en el túnel en forma de arco 4 secciones ya sea en esfuerzo de corte o momento se encuentran controladas por las combinaciones C4 y C5.

Esto se debe a que los esfuerzos estáticos de la parte superior del túnel en forma de arco son relativamente menores frente a los dinámicos que en el túnel rectangular. A pesar de esto, la mayoría de los esfuerzos controlados por cargas sísmicas se encuentran cerca de la resistencia del hormigón para el corte o de la armadura mínima a flexión.

Al igual que para el Sap2000, también se analizó la influencia de las combinaciones sísmicas en el diseño para el Plaxis en cada uno de los modelos.

	TÚNEL RECTANGULAR		
	Combinación	Combinación	
	Q	Μ	
Losa Superior Centro	C1	C1	
Losa Superior Borde Corte	C1	C1	
Muro Superior	C1	C1	
Muro Centro	C1	C1	
Muro Inferior	C2	C1	
Losa Inferior Centro	-	C5	
Losa Inferior Apoyos	C1	C1	

TABLA 4-27 COMBINACIONES QUE CONTROLAN EN DISEÑO. TÚNEL RESCTANGULAR EN PLAXIS.

TABLA 4-28 COMBINACIONES QUE CONTROLAN EN DISEÑO. TÚNEL EN FORMA DE ARCO EN PLAXIS.

	TÚNEL FORMA DE ARCO		
	Combinación	Combinación	
	Q	Μ	
Losa Superior	C4	C1	
Muro Arco	C4	C1	
Muro Superior	C5	C2	
Muro Inferior	C5	C1	
Losa Inferior Centro	-	C1	
Losa Inferior Apoyos	C1	C5	

En este caso los resultados son relativamente parecidos. El túnel en forma de arco sigue viéndose más afectado que el rectangular para las combinaciones de carga dinámicas que el túnel rectangular. A pesar de esto el diseño no cambia demasiado si se ven los valores de las combinaciones estáticas debido principalmente a que se encuentran cerca de los esfuerzos producidos por las armaduras mínimas a corte y flexión.

5. DISEÑO ESTRUCTURAL DE LAS PROPUESTAS

5.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Con el fin de realizar un análisis comparativo económico de las propuestas, se decidió realizar el diseño de 2 túneles de recuperación uno en forma rectangular y otro de arco a través del programa Plaxis. La elección de este programa es producto de la capacidad que tiene este para modelar el suelo mediante elementos finitos, la cual reproduce un comportamiento de la interacción suelo-estructura de forma más aproximada que por medio del uso de resortes.

Para el diseño de estos nuevos modelos se utilizaron como base de iteración los resultados obtenidos por el programa Plaxis presentes en el Anexo D que corresponden a la suma de los esfuerzos internos estáticos (determinados en 4.2) y los dinámicos (determinados en 4.3.2) para cada forma de túnel analizado en los capítulos anteriores. El diseño en la dirección longitudinal del túnel (o transversal a la dirección principal de estudio) se hizo utilizando los valores obtenidos por medio de los modelos estáticos y dinámicos del programa Sap2000, determinados en el capítulo 3.3, debido principalmente a que no se cuentan con resultados en profundidad del modelo en Plaxis, y que de acuerdo a los resultados del análisis comparativo (véase 4.4), el uso de los resultados estáticos obtenidos mediante Sap2000 son relativamente bajos en esta dirección.

En las secciones posteriores de este capítulo se presentan los criterios de diseño de las propuestas, los resultados finales de los esfuerzos internos para cada una de las secciones a diseñar, el diseño estructural de cada propuesta y una cotización por el total del costo para cada de túnel de recuperación.

En este capítulo, el término "dirección principal" hará referencia a la dirección longitudinal de la sección que se esté diseñando, mientras que el término "dirección transversal" corresponderá a la dirección perpendicular de la pieza.

5.2. CRITERIOS DE DISEÑO

Los diseños finales de los túneles de recuperación debieron cumplir con determinados criterios con el objetivo de permitir un análisis comparativo adecuado, tanto económica como constructivamente. Los criterios de diseño utilizados para cada túnel de recuperación fueron los siguientes:

- Cada sección del túnel en forma rectangular se diseñó para tener una densidad máxima de acero entre 110 y 130 $[kg/m^3]$ de hormigón, sin considerar la losa superior borde aberturas ni la losa superior borde de corte.
- La losa inferior del túnel en forma de arco se diseñó para cumplir con una densidad máxima de acero entre 110 y 130 $[kg/m^3]$ de hormigón.
- Las secciones losa superior, muro-arco y muro lateral del túnel en forma de arco se diseñaron con el mismo espesor.
- La sección que controló el diseño de la parte superior del túnel en forma de arco (la losa superior, el muro-arco o el muro lateral) se diseñó para una densidad máxima de acero de 130 [kg/m³] de hormigón.
- Los esfuerzos para el diseño transversal de cada sección fueron los mismos determinados en el capítulo 3.3.
- En el diseño a flexión de cada sección no se superaron las 3 capas de acero por cara. Además, no se debía utilizar en el diseño armadura superior a ϕ 36, ni un espaciamiento horizontal de esta menor a 150 [mm].
- En el diseño a corte no se usaron barras de diámetro superiores a ϕ 16, ni una separación inferior a 150 [mm].
- Las iteraciones de las dimensiones de cada sección en ambos túneles de recuperación se hicieron en múltiplos de 20 [cm].

El criterio para la cuantía de acero de entre $110 \text{ y} 130[kg/m^3]$ corresponde a un valor promedio del mercado del hormigón armado utilizado normalmente en construcción.

5.3. **DISEÑO DE PROPUESTAS**

Se realizó un prediseño de los modelos determinados en 4.2 con la intención de determinar que secciones se podían aumentar o reducir para mantener las cuantías de acero dentro de los límites de diseño. De acuerdo a los resultados obtenidos y dispuestos en el Anexo D correspondientes a los esfuerzos estáticos y dinámicos determinados para ambos túneles de recuperación, las densidades obtenidas de acero por metro cubico de hormigón fueron las siguientes:

TABLA 5-1CUANTÍAS DE ACERO PARA TÚNEL RECTANGULAR. PREDISEÑO.

	TÚNEL RECTANGULAR		
	Espesor [m]	Acero [kg/m ³]	ρ Acero [kg/m³]
LS Longitudinal	1 9	70,9	107
LS Transversal	1,0	35,6	107
Muro Longitudinal	10	97,2	171
Muro Transversal	1,0	73,7	1/1
LI Longitudinal	1 9	97,1	120
LI Transversal	1,0	32,2	125

TABLA 5-2 CUANTÍAS DE ACERO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO. PREDISEÑO.

	TÚNEL FORMA DE ARCO		
	Espesor [m]	Acero [kg/m ³]	ρ Acero [kg/m³]
LS Longitudinal	1 /	39,7	85
LS Transversal	1,4	45,6	65
M-A Longitudinal	1 /	68,2	120
M-A Transversal	1,4	51,4	120
Muro Longitudinal	1 /	59,3	88
Muro Transversal	1,4	28,4	00
LI Longitudinal	1 8	134,6	163
LI Transversal	1,0	28,5	102

De acuerdo a las Tabla 5-1 se puede observar que la losa superior del túnel rectangular se encuentra por debajo del criterio definido para la cuantía del acero, mientras que el muro sobrepasa los límites. Producto de lo anterior es que se probaron dimensiones menores para la losa superior y mayores en el caso de los muros.

En el caso del túnel en forma de arco, tal como se muestra en la Tabla 5-2, las secciones que conforman la parte superior de la estructura se encuentran controladas por el Muro-Arco, sección cuya cuantía de acero se encuentra cumpliendo con los criterios establecidos. Sin embargo, la losa inferior posee una densidad de acero mayor a definida para el hormigón armado, por lo que las dimensiones probadas fueron superiores.

De esta manera, las dimensiones finales obtenidas por medio de iteraciones fueron las siguientes:

_			
	Espesor [m]	Acero [kg/m³]	ρ Acero [kg/m³]
LS Longitudinal	16	75,1	110
LS Transversal	1,0	42,8	110
Muro Longitudinal	1 /	81,4	101
Muro Transversal	1,4	39,8	121
LI Longitudinal	1 0	92,3	101
LI Transversal	1,0	28,5	121

TABLA 5-3CUANTÍAS DE ACERO PARA TÚNEL RECTANGULAR. DISEÑO FINAL.

TABLA 5-4CUANTÍAS DE ACERO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO. DISEÑO FINAL.

TÚNEL FORMA DE ARCO			
[/m³]			

Como se puede notar, la losa superior del túnel de sección transversal rectangular fue disminuida a 1.6 [m] de espesor mientras que el muro fue aumentado a 1.4[m] de ancho.

En el caso del túnel en forma de arco, la parte superior del túnel mantuvo sus dimensiones mientras que la losa inferior fue aumentada en 40 [cm] quedando en 2.2 [m] de espesor. A pesar de que el Muro-Arco no tiene una alta cuantía de acero no fue posible disminuir su tamaño, esto producto de que aumentaban los esfuerzos a flexión en la losa inferior, generando que esta no cumpliera con los criterios de diseño.

Las secciones transversales de ambas propuestas de túneles de recuperación se muestran representadas en la siguiente figura.



FIGURA 5-1 REPRESENTACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE LOS TÚNELES DE RECUPERACIÓN. EN NEGRO EL TÚNEL DE SECCIÓN RECTANGULAR, Y EN AZUL, EL TÚNEL EN FORMA DE ARCO.

5.4. MODELO RECTANGULAR

5.4.1. Esfuerzos de Diseño

El caso del túnel rectangular, producto de la limitación del programa Plaxis de trabajar en dos dimensiones, se debieron obtener los valores de diseño de algunas secciones por medio de una ponderación de los resultados del Sap2000. Las secciones restantes son las correspondientes a la losa en los apoyos y la losa superior en los bordes de la abertura.

Los valores utilizados en la comparación corresponden a los determinados en el capítulo 4.1 y 4.2 de los cuales se obtuvieron las siguientes relaciones:

_	LS BORDE ABERTURA/CENTRO				
	Ν	Q	Μ		
C1	-11%	-	13%		
С2	-5%	-	15%		
С3	-6%	-	9%		
C4	8%	-	14%		
C5	19%	-	17%		
Promedio	1%	-	13%		
Máx. Abs.	19%	-	17%		

TABLA 5-5RELACIÓN ENTRE SECCIONES DEL MODELO RECTANGULAR EN SAP2000. LOSA SUPERIOR BORDE
ABERTURAS POR LOSA SUPERIOR CENTRAL.

TABLA 5-6

RELACIÓN ENTRE SECCIONES DEL MODELO RECTANGULAR EN SAP2000. LOSA SUPERIOR BORDE CORTE POR LOSA SUPERIOR APOYOS.

_	LS BORDE CORTE/APOYO			
	Ν	Q	Μ	
С1	-87%	13%	1%	
С2	-2%	11%	-1%	
С3	-88%	13%	19%	
<i>C4</i>	5%	12%	0%	
С5	140%	8%	-9%	
Promedio	-6%	11%	2%	
Máx. Abs.	140%	-	19%	

Como se puede observar, no para todas las cargas existe una baja variabilidad, sobre todo en el caso de la carga axial. Para obtener los resultados de la losa superior en los apoyos y en la losa superior borde aberturas se ponderó considerando por separado cada una de las celdas, y no utilizando el promedio o la variación máxima.

Los valores de diseño para las secciones obtenidas a través de la ponderación con los resultados del Sap2000 se presentan en las siguientes tablas.

	LOSA SUPERIOR BORDE ABERTURAS					
	N	N Q M				
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]			
C1	-188	-	450			
С2	-173	-	338			
С3	-139	-	334			
C4	-284	-	428			
С5	-251	-	189			

TABLA 5-7 RESULTADOS PARA EL DISEÑO DE LOSA SUPERIOR BORDE ABERTURAS.

TABLA 5-8 RESULTADOS PARA EL DISEÑO DE LA LOSA SUPERIOR BORDE CORTE.

	LOSA	LOSA SUPERIOR APOYOS			
	Ν	N Q			
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		
С1	-1605	215	-332		
С2	-187	161	-266		
С3	-1200	155	-200		
С4	-187	162	-305		
С5	-60	54	-181		

Además de las 4 subsecciones que componen la losa superior (centro, borde corte, apoyos y borde aberturas) se diseñaron estructuralmente también el muro lateral y la losa inferior.

Los valores de diseño en detalle para cada una de las secciones del túnel rectangular se encuentran en el Anexo E, la cual comprende los nuevos esfuerzos estáticos más los sísmicos determinados en el capítulo 4.3 Anexo D. Por otro lado, los valores para para cada una de las secciones transversales a la dirección principal de estudio se encuentran en el Anexo C.2, correspondientes a los obtenidos por medio del Sap2000.

En las siguientes tablas se presentan, a modo de resumen, los valores finales utilizados en el diseño del túnel en forma rectangular, para cada una de las secciones, en la dirección principal y también en la segundaria.

	TÚNEL RECTANGULAR		
	N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
Losa Superior Centro	-211	-	398
Losa Superior Bordes	-188	-	450
Losa Superior Apoyos	-1605	215	-332
Losa Superior Borde Corte	-211	243	-337
Muro Superior	-472	143	460
Muro Centro	-272	-	-74
Muro Inferior	-613	104	267
Losa Inferior Centro	-180	-	-801
Losa Inferior Apoyos	-158	253	128

TABLA 5-9 VA	LORES DE DISEÑO PARA T	ÚNEL RECTANGULAR.	DIRECCIÓN PRINCIPAL.
--------------	------------------------	-------------------	----------------------

TABLA 5-10 VALORES DE DISEÑO PARA TÚNEL RECTANGULAR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	TÚNEL RECTANGULAR TRANSVERSAL			
	N	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
LS Transversal M-	575	165	-125	
LS Transversal M+	-2100	-	105	
Muro M-	25	52	-119	
Muro M-	360	-	195	
LI Transversal M-	82	11	-100	
LI Transversal M+	220	-	90	

5.4.2. DISEÑO ESTRUCTURAL

Aquí se presenta de forma resumida la disposición de las armaduras en los diferentes elementos que conforman el túnel rectangular diseñados de acuerdo a los valores de la Tabla 5-9 y la Tabla 5-10. El diseño se base en la norma ACI318-14 cuyo detalle de los cálculos para cada sección se encuentra en el Anexo F.

IAI	DLA 5-11 DI	SENU ES	IKUCIUKAL	UNE	L KECTANGULAR	DIRECCIÓN PRINC	IFAL.
	LOSA SUPERIC	DR			L	DSA SUPERIOR BOF	RDE
FLEXION	Barras Superio	res Barr	as Inferiores	• •	FLEXION	Barras Superiores	Barras Inferiores
φ [mm]	36		32		φ [mm]	36	28
s [mm]	175		200		s [mm]	175	175
Capas	1		2		Capas	1	3
Área [cm²/m]	58,2		80,4		Área [cm²/m]	58,2	105,6
CORTE	E	stribos			CORTE	Estr	ribos
φ [mm]		12			φ [mm]	1	12
s [mm]		250			s [mm]	2	50
Ramas/m		2			Ramas/m		2
Área [cm²/m²]		9,0			Área [cm²/m²]	9),0
	Volumen [m ³	[*]]	2,89	_		Volumen [m³]	1,00
	MURO					LOSA INFERIOR	
FLEXION	Barras Superio	res Barr	as Inferiores		FLEXION	Barras Superiores	Barras Inferiores
φ [mm]	22		32		φ [mm]	36	28
s [mm]	150		150		s [mm]	150	175
Capas	1		2		Capas	2	1
Área [cm²/m]	25,3		107,2		Área [cm²/m]	135,7	35,2
CORTE	E	stribos			CORTE	Estr	ribos
φ [mm]		12			φ [mm]	1	12
s [mm]		250			s [mm]	1	50
Ramas/m		2			Ramas/m		3
Área [cm²/m²]		9,0			Área [cm²/m²]	22	2,6
	Volumen [m ³	[*]]	15,25	_		Volumen [m³]	11,11
	CONSOLA						
FLEXION	Barra	s Superi	ores				
φ [mm]		32					
s [mm]		150					
Capas		2					
Area [cm²/m]		107,2					
CORTE	Estribos Hor.	Estri	bos Ver.	-			
φ [mm]	12		12				
s [mm]	175		175				
Area [cm²/m²]		36,9					
	Volumen [m ⁻	<u>']</u>	1,33				
				86			

TABLA 5-11 DISEÑO ESTRUCTURAL TÚNEL RECTANGULAR DIRECCIÓN PRINCIPAL

TABLA 5-12 DISEÑO ESTRUCTURAL TÚNEL RECTANGULAR DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

LOSA	SUPERIOR TRANSVER	SAL	N	/URO TRANSVERSA	L
FLEXION	Barras Superiores Ba	arras Inferiores	FLEXION	Barras Superiores	Barras Inferiores
φ [mm]	25	25	φ [mm]	28	32
s [mm]	150	150	s [mm]	200	200
Capas	1	1	Capas	1	1
Área [cm²/m]	32,7	32,7	Área [cm²/m]	30,8	40,2
CORTE	Estribo	S	CORTE	Estri	bos
φ [mm]	12		φ [mm]	-	
s [mm]	250		s [mm]	-	
Ramas/m	3		Ramas/m	-	
Área [cm²/m²]	13,6		Área [cm²/m²]	-	
	Volumen [m³]	2,14		Volumen [m³]	7,45
LOSA	INFERIOR TRANSVER	SAL			
FLEXION	Barras Superiores Ba	arras Inferiores			
φ [mm]	25	25			

FLEXION	Barras Superiores	Barras Inferiores
φ [mm]	25	25
s [mm]	150	150
Capas	1	1
Área [cm²/m]	32,7	32,7
CORTE	Estr	ibos
φ [mm]		-
s [mm]		-
Ramas/m		-
Área [cm²/m²]		-
	Volumen [m³]	3,44

5.5. MODELO EN FORMA DE ARCO

5.5.1. Esfuerzos de diseño

A diferencia del caso rectangular, en este no es necesario obtener secciones adicionales para el diseño. La razón de esto es que se trabajó con los máximos para los esfuerzos de momento y corte en las partes curvas de la losa superior. Esto es debido principalmente a su forma ya que al no tener una intersección definida entre el muro y el arco los esfuerzos de momento y corte máximos se desarrollan a lo largo del arco y no en donde finaliza el muro vertical.

Las secciones consideradas en el diseño son la losa superior que separa las aberturas (losa superior), el muro curvo que va desde donde termina la losa superior hasta el muro lateral (muro-arco), la mitad superior del muro vertical (muro central), la mitad inferior del muro que intersecta con la losa inferior (muro inferior) y, por último, la losa inferior.

Los valores de los esfuerzos internos de cada una de las secciones para las diferentes combinaciones se pueden ver en el Anexo E.2D.2. Los resultados de ahí comprenden los nuevos esfuerzos estáticos determinados a los que se adicionaron los esfuerzos sísmicos obtenidos en el capítulo 4.3.

Respecto a los resultados de diseño para la sección transversal para el túnel en forma de arco, los resultados se encuentran en el Anexo C.4.

A continuación, se presentan los valores utilizados finalmente en el diseño estructural del túnel, tanto en la dirección principal como transversal.

	TÚNEL FORMA DE ARCO			
	Ν	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
Losa Superior	-377	117	140	
Muro Arco	-684	129	-316	
Muro Superior	-690	92	-276	
Muro Inferior	-662	71	-229	
Losa Inferior Centro	-80	-	-1291	
Losa Inferior Apoyos	-57	332	211	

TABLA 5-13VALORES DE DISEÑO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO. DIRECCIÓN PRINCIPAL.

TABLA 5-14VALORES DE DISEÑO PARA TÚNEL EN FORMA DE ARCO. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	TÚNEL EN FORMA DE ARCO TRANSVERSAL		
	N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
LS Transversal M-	-315	183	-30
LS Transversal M+	-350	-	115
Muro-Arco Transversal M-	-145	210	-55
Muro-Arco Transversal M+	-40	-	40
Muro Transversal M-	-155	78	-89
Muro Transversal M+	-97	-	22
LI Transversal M-	-62	78	-215
LI Transversal M+	-60	-	85

5.5.2. DISEÑO ESTRUCTURAL

A continuación, se presenta un resumen del diseño estructural para cada una de las secciones que componen el túnel de recuperación en forma de arco. El diseño se basó en la norma ACI318-14.

TABLA 5-15DISEÑO ESTRUCTURAL TÚNEL EN FORMA DE ARCO DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	LOSA SUPERIOR			MURO-ARCO	
FLEXION	Barras Superiores Ba	arras Inferiores	FLEXION	Barras Superiores Ba	arras Inferiores
φ [mm]	22	25	φ [mm]	28	22
s [mm]	150	175	s [mm]	175	150
Capas	1	1	Capas	2	1
Área [cm²/m]	25,3	28,0	Área [cm²/m]	70,4	25,3
CORTE	Estribo	S	CORTE	Estribo	S
φ [mm]	12		φ [mm]	12	
s [mm]	250		s [mm]	200	
Ramas/m	2		Ramas/m	2	
Área [cm²/m²]	9,0		Área [cm²/m²]	11,3	
	Volumen [m³]	1,27		Volumen [m³]	5,02
_	MURO			LOSA INFERIOR	
FLEXION	Barras Superiores Ba	arras Inferiores	FLEXION	Barras Superiores Ba	arras Inferiores
φ [mm]	28	22	φ [mm]	36	28
s [mm]	200	150	s [mm]	175	150
Capas	2	1	Capas	3	1
Área [cm²/m]	61,6	25,3	Área [cm²/m]	174,5	41,1
CORTE	Estribo	S	CORTE	Estribo	S
φ [mm]	-		φ [mm]	16	
s [mm]	-		s [mm]	200	
Ramas/m	-		Ramas/m	3	
Área [cm²/m²]			Área [cm²/m²]	30,2	
	Volumen [m³]	3,91		Volumen [m³]	16,91

LOSA	LOSA SUPERIOR TRANSVERSAL MURO-ARCO TRANSVERSAL		RSAL		
FLEXION	Barras Superiores B	arras Inferiores	FLEXION	Barras Superiores I	Barras Inferiores
φ [mm]	22	22	φ [mm]	22	22
s [mm]	150	150	s [mm]	150	150
Capas	1	1	Capas	1	1
Área [cm²/m]	25,3	25,3	Área [cm²/m]	25,3	25,3
CORTE	Estrib	OS	CORTE	Estrik	oos
φ [mm]	16		φ [mm]	16	
s [mm]	275		s [mm]	275	5
Ramas/m	3		Ramas/m	4	
Área [cm²/m²]	21,9		Área [cm²/m²]	29,2	2
	Volumen [m³]	1,57		Volumen [m³]	3,44
MURO TRANSVERSAL		LOSA	A INFERIOR TRANSVE	RSAL	
FLEXION	Barras Superiores B	arras Inferiores	FLEXION Barras Superiores Barras Inferio		Barras Inferiores
φ [mm]	22	22	φ [mm]	28	28
s [mm]	150	150	s [mm]	150	150
Capas	1	1	Capas	1	1
Área [cm²/m]	25,3	25,3	Área [cm²/m]	41,1	41,1
CORTE	Estrib	OS	CORTE	Estrib	oos
φ [mm]	-		φ [mm]	-	
s [mm]	-		s [mm]	-	
Ramas/m	-		Ramas/m	-	

Área [cm²/m²]

Volumen [m³]

4,93

Área [cm²/m²]

Volumen [m³]

5,32

TABLA 5-16DISEÑO ESTRUCTURAL TÚNEL EN FORMA DE ARCO DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

5.6. COTIZACIÓN Y RESUMEN DE LAS PROPUESTAS

A continuación, se presenta un resumen de las propiedades geométricas de los túneles, además de los costos totales por secciones y por túnel. De acuerdo a los valores promedio estimados del mercado, se decidió utilizar un precio basado en la instalación en terreno por metro cubico de hormigón armado. El valor usado fue de \$2 500 dólares por metro cubico de hormigón armado el cual corresponde a un precio representativo para estructuras ubicadas en el altiplano chileno, pero no específico para túneles de recuperación. En este se incluye el valor la mano de obra, el traslado del material a la obra, el moldaje, la disposición de la armadura, entre otros, es decir, corresponde a un valor de costo total instalado.

TÚNEL RECTANGULAR			
	Propiedades	Geométricas	
Ancho Abertura	5	Largo Túnel	75
Largo Abertura	10	Ancho Interior	7
Aberturas	4	Alto Interior	7
Muros	2	[USD/m³]	2500
	Espesores [m]	Volumen [m ³]	\$ [USD]
Losa Inferior	1,8	1323	\$3.307.500
Muro	1,4	1470	\$3.675.000
Losa Superior	1,6	856	\$2.140.000
TOTAL 3649 \$9.122.500			

TABLA 5-17 RESUMEN DE MODELO RECTANGULAR Y VOLUMEN DE HORMIGÓN.

TABLA 5-18 RESUMEN DE MODELO EN FORMA DE ARCO Y VOLUMEN DE HORMIGÓN.

TÚNEL EN FORMA DE ARCO				
	Propiedades Geométricas			
Ancho Abertura	5	Largo Túnel	75	
Largo Abertura	10	Radio interior	4	
Aberturas	4	Alto Muro	3	
Muros	2	[USD/m³]	2500	
	Espesores [m]	Volumen [m³]	\$ [USD]	
Arco	1,4	1195	\$2.987.467	
Muro	1,4	630	\$1.575.000	
Losa Inferior	2,2	1782	\$4.455.000	
	TOTAL	3607	\$9.017.467	

A continuación, se muestra un resumen de cada túnel de recuperación que incluye la cantidad total de acero en las secciones (sin contar las uniones), el total de hormigón, la cuantía ponderada por sección y el costo total de la estructura.

	Túnel Rectangular
Total Acero en Secciones [m³]	44,6
Total Hormigón [m³]	3649
Cuantía Ponderada [kg/m³]	119,9
Costo [USD]	\$9.122.500

TABLA 5-19 RESUMEN COSTO DE TÚNEL RECTANGULAR.

TABLA 5-20RESUMEN COSTO DE TÚNEL EN FORMA DE ARCO.

	Túnel Forma de Arco
Total Acero en Secciones [m³]	42,4
Total Hormigón [m³]	3607
Cuantía Ponderada [kg/m³]	110,9
Costo [USD]	\$9.017.467

Como se puede observar el túnel en forma de arco resulto ser ligeramente más conveniente que el túnel en forma rectangular en el ámbito económico, pero con una diferencia de aproximadamente un 1%.

5.7. VERIFICACIONES DE LOS MODELOS

5.7.1. CAPACIDAD DE PORTANTE DEL SUELO

Para definir la capacidad portante del suelo se usaron las fórmulas de Binch-Hansen.

Características del terreno:

$$q_s = 0 [MPa]$$
Sobrecarga sobre nivel de cimentación
(consideración conservadora) $\phi_t = 37^{\circ}$ Ángulo de fricción del terreno. $c = 0 [MPa]$ Cohesión del suelo.

Coeficientes de capacidad de carga:

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan(\phi_t)} \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\phi_t}{2}\right)^2 \qquad \qquad N_q = 42,92$$
$$N_c = \frac{N_q - 1}{\tan(\phi_t)} \qquad \qquad N_c = 55,63$$

$$N_{\gamma} = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan(\phi_t) \qquad \qquad N_{\gamma} = 66,19$$

Coeficientes de forma:

$$s_q = 1 + \frac{B}{L_t} \cdot \tan(\phi_t) \qquad \qquad s_q = 1,09$$
$$s_\gamma = 1 - 0.4 \cdot \frac{B}{L_t} \qquad \qquad s_\gamma = 0,95$$

$$S_{\gamma} = 1 - 0.4 \cdot \frac{1}{L_t}$$

Factores de seguridad:

$$FS_{est} = 3$$
 Factor estático.

$$FS_{sis} = 2$$
 Factor sísmico.

CAPACIDAD ADMISIBLE DE SOPORTE DEL SUELO

$$\sigma_{adm-est} = \frac{1}{FS_{est}} \cdot \left(s_c \cdot c \cdot N_c + s_q \cdot q_s \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot s_\gamma \cdot B \cdot \gamma_r \cdot N_\gamma \right)$$

$$\sigma_{adm-est} = 207,7 \ [tonf/m^2] \qquad Estática.$$

$$\sigma_{adm-sis} = \frac{1}{FS_{sis}} \cdot \left(s_c \cdot c \cdot N_c + s_q \cdot q_s \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot s_\gamma \cdot B \cdot \gamma_r \cdot N_\gamma \right)$$

$$\sigma_{adm-sis} = 311.6 \left[tonf/m^2 \right]$$
Sísmica.

TENSIONES DEL SUELO.

De acuerdo a los resultados, las tensiones máximas presentes en los modelos son:

Túnel Rectangular:

$\sigma_{est-sap} = 103,4[tonf/m^2]$	Combinación C6.
$\sigma_{sis-sap} = 94,6[tonf/m^2]$	Combinación C9.
Túnel en Forma de Arco:	
$\sigma_{est-sap} = 97,1[tonf/m^2]$	Combinación C6.
$\sigma_{sis-sap} = 92,2[tonf/m^2]$	Combinación C9.

Se puede notar que ambos túneles cumplen con las tensiones admisibles del suelo, tanto para las condiciones estáticas y dinámicas.

5.7.2. DEFORMACIONES ADMISIBLES

En esta sección se determinarán las deformaciones máximas admisibles de la losa superior y del muro lateral para los túneles de recuperación rectangulares y en forma de arco, y se verificara que cumplan con las normas.

5.7.2.1. TÚNEL RECTANGULAR

Losa Superior

Largo de la losa en voladizo:	l = 2,5 [m]
Deformación inmediata por cargas permanentes (D+H):	$\Delta_{D+H} = 0,2[mm]$
Deformación inmediata por cargas vivas (L):	$\Delta_L = 3,8[mm]$
Factor dependiente del tiempo para cargas sostenidas: (5 o más años)	$\xi = 2,0$
Cuantía de acero en compresión: (considerado igual a 0 como opción conservadora)	ho'=0
Factor de multiplicación:	$\lambda = \frac{\xi}{1+50 \cdot \rho'} = 2,2$
Deformación a largo plazo:	$\Delta_{LP} = \lambda \cdot \Delta_{DH} = 0,4[mm]$
Deformación total en el tiempo de la losa superior:	$\Delta_T = \Delta_{LP} + \Delta_L = 4,2[mm]$
Deformación máxima admisible:	$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{l}{240} = 10,4[mm]$

Se puede notar a deformación total en el tiempo de la losa superior no supera a la máxima deformación admisible.

Muro lateral

Deformación por empuje lateral en muro lateral:	$\Delta_H = 2,6[mm]$
Deformación por cargas sísmicas en muro lateral:	$\Delta_E = 1,7[mm]$
Deformación total de cargas H y E:	$\Delta_{H+E} = 4,3 \ [mm]$
Factor dependiente del tiempo para cargas sostenidas:	$\xi = 2,0$

(5 o más años)

Cuantía de acero en compresión: (considerado igual a 0 como opción conservadora)	ho'=0
Factor de multiplicación:	$\lambda = \frac{\xi}{1+50 \cdot \rho'} = 2,2$
Deformación a largo plazo:	$\Delta_{LP} = \lambda \cdot \Delta_{H+E} = 9,5 \ [mm]$
Deformación total en el tiempo de muro:	$\Delta_T = \Delta_{LP} = 9,5 \ [mm]$
Altura de túnel rectangular:	$H_m = 10,4 \ [m]$
Deformación máxima admisible del muro del túnel: (NCh2369)	$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{15}{1000} \cdot H_m = 156 \ [mm]$

La deformación máxima del muro lateral no supera la exigida por la norma.

5.7.2.2. Túnel en Forma de Arco

Losa Superior

Largo de la losa en voladizo:	l = 2,5 [m]
Deformación inmediata por cargas permanentes (D): (solo cargas muertas D, caso conservador)	$\Delta_{D+H} = 0.8 \ [mm]$
Deformación inmediata por cargas vivas (L):	$\Delta_L = 2,8 \ [mm]$
Factor dependiente del tiempo para cargas sostenidas: (5 o más años)	$\xi = 2,0$
Cuantía de acero en compresión: (considerado igual a 0 como opción conservadora)	ho'=0
Factor de multiplicación:	$\lambda = \frac{\xi}{1+50 \cdot \rho'} = 2,2$
Deformación a largo plazo:	$\Delta_{LP} = \lambda \cdot \Delta_{D+H} = 1,8 \ [mm]$
Deformación total en el tiempo de la losa superior:	$\Delta_T = \Delta_{LP} + \Delta_L = 4,6 \ [mm]$
Deformación máxima admisible:	$\Delta_{m \acute{a} x} = rac{l}{240} = 10,4 \ [mm]$

Se puede notar a deformación total en el tiempo de la losa superior no supera a la máxima deformación admisible.

Muro lateral

Deformación por empuje lateral en muro lateral:	$\Delta_H = 2,8 \ [mm]$
Deformación por cargas sísmicas en muro lateral:	$\Delta_E = 0,7 \ [mm]$
Deformación total de cargas H y E:	$\Delta_{H+E}=3,5 \ [mm]$
Factor dependiente del tiempo para cargas sostenidas: (5 o más años)	$\xi = 2,0$
Cuantía de acero en compresión: (considerado igual a 0 como opción conservadora)	ho'=0
Factor de multiplicación:	$\lambda = \frac{\xi}{1+50 \cdot \rho'} = 2,2$
Deformación a largo plazo:	$\Delta_{LP} = \lambda \cdot \Delta_{H+L} = 7,7 \ [mm]$
Deformación total en el tiempo de muro:	$\Delta_T = \Delta_{LP} = 7,7 \ [mm]$
Altura del túnel en forma de arco:	$H_m = 5,2 \ [m]$
Deformación máxima admisible del muro del túnel: (NCh2369)	$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{15}{1000} \cdot H_m = 78 \ [mm]$

La deformación lateral del muro es inferior que la exigida por la norma.
6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

6.1. ESTUDIO DE LAS CARGAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS

El correcto estudio de las cargas de un acopio sobre un túnel de recuperación es fundamental en su diseño. De acuerdo a lo estudiado de la literatura, existe una gran diferencia entre considerar esta carga correctamente y considerar un perfil hidrostático de presiones, distribución que normalmente se tiende a pensar que posee. La diferencia que existe entre el cenit del perfil real versus el máximo hidrostático puede ser de hasta un 30%, y si se considera el punto central de la pila, esta diferencia puede aumentar hasta un 60%. Por lo tanto, una mala consideración de la carga de la pila se traduce en un alza significativa de los costos de materialización de un túnel de recuperación, debido a que esta solicitación es la que controla en sistema y limita el diseño

Respecto a las cargas sísmicas se demostraron que tienen un bajo impacto en la estructura sobre todo en las secciones más solicitadas relativo a las cargas estáticas. Si bien existen dentro de las combinaciones utilizadas algunas que contienen esfuerzos sísmicos, estas usualmente no resultaron ser las que controlaron el diseño en la mayoría de las secciones. En las secciones que si controlaban el diseño los esfuerzos internos obtenidos no superaban el 15% de la combinación estática más desfavorable, valores que además siempre se ubicaron cerca de la armadura mínima permitida por diseño, tanto para los esfuerzos de corte como de momento.

En cuanto a los métodos sísmicos analizados el que resultó generar los esfuerzos internos más desfavorables en el túnel de recuperación en forma rectangular fue el Método Detallado con carga triangular, modificado para considerar la carga de la pila. Ahora si se consideran solo los métodos no modificados para incluir la carga de la pila el más desfavorable sigue siendo el método detallado con carga triangular, seguido por el mismo método, pero con carga rectangular. Esto último demuestra que estos métodos no se encuentran pensados para túneles de recuperación, sino que, para subterráneos, ya que el que debiese dominar es el Método Simplificado que en este caso iguala en magnitud al método presente en la NCh433.

6.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE PLAXIS Y SAP2000

La generación de modelos en Plaxis y Sap2000 para un túnel de recuperación de sección rectangular y otro de arco permitió cuantificar las diferencias existentes entre ambos programas. De acuerdo a los resultados obtenidos entre los programas se pudo notar que existen grandes diferencias en los esfuerzos internos de las secciones para una determinada geometría. Para el caso del túnel rectangular, las diferencias entre los 2 puntos más desfavorables del diseño, correspondientes a la losa superior central y la losa inferior central, son completamente contradictorias. Mientras para la losa superior los esfuerzos de momento obtenidos del Sap2000 fueron 1,7 veces los del Plaxis, en la losa inferior los del Plaxis resultaron ser 1,7 veces los

entregados por el Sap2000. Las discrepancias entre los resultados de los programas no son muy diferentes en otras secciones del mismo túnel, ni de los resultados entregados del túnel en forma de arco, caso en el que la losa superior e inferior se encontraron en la misma situación.

De esto se puede decir que no existe una relación proporcional entre los datos del Plaxis y Sap2000, para prácticamente ninguna sección. Es posible que, a pesar de haber modelado una sección transversal que considerara aberturas en el Plaxis, el programa no sea capaz de ver ni asimilar lo que sucede en profundidad del túnel, razón que podría explicar en parte importante las diferencias de resultados.

6.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS POR GEOMETRÍA

En relación a los esfuerzos internos del túnel de recuperación en forma rectangular y en forma de arco, se pudo notar que existen diferencias importantes en las secciones que controlan el diseño. Estas secciones, correspondientes a la losa superior e inferior, favorecen principalmente al túnel en forma de arco, al menos en el diseño estructural independiente si el modelo fue desarrollado en Plaxis o en Sap2000. En el caso de la losa superior, el túnel en forma de arco mostró esfuerzos significativamente menores de corte y momento frente al túnel rectangular; y en el caso de la losa inferior, los mayores esfuerzos de momento en el centro y esfuerzos de corte fueron del túnel en forma de arco, mientras que en los apoyos los esfuerzos de momento resultaron ser mayores en el túnel rectangular.

Si se analizan los resultados desde el punto de vista de la instalación de armadura en obra, al túnel en forma de arco lo favorece una baja densidad de acero en altura, compensado por una densificación de esta en la losa inferior. Esto es importante además si el proyecto considera hormigonar en altura ya que, al tener menores esfuerzos en la parte superior respecto al túnel rectangular, las secciones pueden ser disminuidas, lo que implicaría una menor cantidad de hormigón.

6.4. ANÁLISIS DE LAS PROPUESTAS

El principal objetivo de esta memoria era generar dos propuestas para túneles de recuperación, uno en forma rectangular y otra de arco, con la intención de realizar un análisis comparativo entre si desde el punto de vista del diseño y de su factibilidad económica-constructiva. Para esto se definieron ciertos criterios de diseño que permitieron un adecuado análisis comparativo. Bajo estos supuestos se modelaron las dos propuestas de túneles de recuperación utilizando el programa Plaxis.

De acuerdo a los resultados del diseño estructural, los túneles diseñados tienen una diferencia prácticamente nula en el presupuesto final de diseño (de un 1%) resultando ser el túnel en forma de arco ligeramente más económico de implementar. Debido a la cercanía de los presupuestos el resultado no es determinante ya que existen otros factores que además inciden en la valorización económico de hormigón instalado en terreno que suponen incluir todo lo necesario desde su compra hasta su fraguado (materiales, montaje, moldaje, mano de obra, entre otros) corresponde a un promedio para construcciones de hormigón armado de proyectos mineros y no a un túnel de recuperación en particular. Esto es importante de considerar puesto que ese valor puede fluctuar significativamente si se considera además que túneles en forma de arco no tienen el mismo método constructivo.

El túnel en forma de arco tiene ciertas ventajas comparativas frente al túnel en forma rectangular. Las secciones más solicitadas de este se encuentran en la base y no en la parte superior, por lo que disponer más armadura en una losa inferior es más fácil frente a una losa ubicada a 7 metros sobre el terreno. A pesar de que el Muro-Arco controla el diseño de la parte superior del túnel en forma de arco, este podría incluso disminuirse de tamaño de manera de facilitar un prefabricado, densificando su estructura, pero armándola en lugares más seguros que en altura. En cuanto a la armadura presente en los diseños de cada una de las secciones, el túnel en forma de arco posee una menor cuantía ponderada, es decir, un 4% menos que la del túnel rectangular.

Como desventaja para el túnel en forma de arco, se tiene que el moldaje y disposición de la armadura en terreno sería bastante más complicado que para el túnel rectangular producto de sus secciones curvas. Para evitar esto podría diseñarse un sistema de prefabricado realizando todo el proceso a nivel de suelo, sin embargo, el diseño de la conexión y el proceso de instalación en terreno podría aumentar el costo total del proyecto.

De acuerdo a los argumentos presentados, el modelo diseñado de túnel en forma de arco resulta ser más conveniente económica y constructivamente frente al modelo de sección transversal rectangular. Esto, sin embargo, no es definitivo ya que dependerá de la forma en que se trate en la parte superior del túnel correspondiente al arco, tanto en su diseño, construcción e instalación.

6.5. CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA

En cuanto a las modelaciones realizadas existe un número de consideraciones importantes que se deben tomar en cuenta no solo para el uso de este trabajo, sino que también para mejorar los procedimientos realizados en un futuro estudio de este mismo tema.

Existieron grandes problemas sobre la compatibilidad de resultados de los programas Plaxis y Sap2000, ya que diferían considerablemente en prácticamente todas las secciones de estudio comparables. Los resultados del Sap2000 en la losa superior y en los muros laterales era más desfavorables que el Plaxis, y a la inversa, este último determinaba una mayor solicitación a la losa inferior frente al Sap2000. Por otro lado, las aberturas de la losa superior generaron un problema importante en el Plaxis ya que no era posible incluirlas directamente en la modelación producto de que el programa solo trabajaba en 2 dimensiones. La hipótesis de utilizar secciones representativas para suplir la falta de información en profundidad puede que no sea muy aproximado a la realidad debido a las dimensiones de las aberturas frente al detalle que se requería en todo el borde de la abertura.

En cuanto a las combinaciones de carga aplicadas en Plaxis estas no son fueron precisas al momento de aplicarse. El hecho de que el programa no permita programar las combinaciones directamente generaba que se debían hacer varios modelos ponderando en cada uno las cargas manualmente, y que en el caso de las solicitaciones laterales se alteraron las cargas sobre el terreno y la densidad de este para obtener los empujes requeridos. Esta situación es complicada para el caso del túnel en forma de arco ya que al no permitir el programa utilizar cargas distribuidas en forma curva se debe colocar terreno encima y luego la carga viva o muerta sobre el terreno, generando esfuerzos adicionales que no corresponden fielmente al caso que se quería estudiar.

Por otro lado, existen cargas que deberían estudiarse para modelarse de otra manera y que ayudarían a economizar costos, como la generada por los chutes. Esta son una carga extremadamente pesada, sobre todo en la sección que se apoya en la losa superior, ya que además cuando las lanzas se activan parte del peso sobre estas se transfiere a la losa superior. Si estas quedaran solo sujetas a los bordes de corte de las consolas las tensiones en la losa disminuirían de manera importante.

En relación a la carga sobre las lanzas, esta se trató como eventual de manera conservadora. Probablemente tampoco es del todo apropiado considerarla así ya que al ser eventual no debería ser una carga viva y, por lo tanto, no debería mezclarse con otras cargas eventuales como las sísmicas. Un estudio apropiado de este tema para quien diseña estos túneles podría ahorrar un porcentaje no despreciable de material en el diseño.

Por estos motivos es que el uso de un programa que integre la capacidad de generar modelos estructurales en 3D para evaluar el comportamiento en el total del túnel, junto con la discretización en elementos finitos del terreno para una mejor representación de este, sería ideal para obtener resultados y diseños más aproximados a la realidad.

Respecto al análisis sísmico realizado es importante obtener datos reales del comportamiento de los túneles frente a movimientos sísmicos para comparar estos con los métodos utilizados para el diseño. Esto es importante debido a que los túneles de recuperación no comparten las mismas condiciones que un subterráneo de estacionamientos por lo que a pesar de utilizar para el diseño el modelo más conservador, esto no garantiza que así sea. El uso de los métodos expuestos en el Manual de Carreteras o la NCh433 son una vía de análisis para estos proyectos, sin embargo, hay que tener en cuenta que estos no están pensados para túneles de recuperación.

GLOSARIO

Los términos presentes en esta lista se utilizaron a lo largo de este trabajo.

a _o	=	Aceleración máxima del suelo.
A _o	=	Aceleración efectiva máxima del suelo.
В	=	Ancho de la fundación.
B_{pt}	=	Ancho plataforma de operación.
B _{tr}	=	Ancho túnel de recuperación.
С	=	Cohesión del terreno.
C_R	=	Coeficiente de reducción para empuje de suelo.
CPl	=	Carga de la pila sobre lanzas.
d	= a tı	Distancia desde la fibra extrema en compresión al centroide del esfuerzo máximo racción.
D	=	Efecto de las cargas muertas de servicio.
D^*	=	Efecto de las cargas muertas producto solamente del peso propio de la estructura.
D _{ch}	=	Carga muerta en un borde de abertura.
D _{chn}	=	Peso en borde de abertura por nodo.
D_{ptn}	=	Peso de plataforma de operación en cada muro por nodo.
D_{sp}	=	Peso muerto de la pila en la sección central del túnel.
D_{sp}^*	=	Carga de la pila en función del radio de la pila.
D_{sp-a}	=	Carga del acopio en apoyos losa superior.
D_{sp-c}	=	Carga del acopio en centro de losa superior
D_{sp-t}	=	Carga del acopio sobre el terreno.
Ε	=	Cargas sísmicas horizontales.

E _h	=	Módulo de Young del hormigón.
E _s	=	Módulo de Young del terreno.
f_c'	=	Resistencia especificada a la compresión del hormigón.
f_y	=	Resistencia especificada a la compresión del acero no preesforzado.
FS _{est}	=	Factor de seguridad estático.
FS _{sis}	=	Factor de seguridad sísmico.
g	=	Contante de gravedad universal.
G _c	=	Módulo de corte del suelo para solicitaciones sísmicas.
h	=	Espesor de la capa de terreno.
h	=	Espesor de un elemento estructural.
h_n	=	Espesor de la capa n de terreno.
h_{sp}	=	Altura de la pila o acopio.
Н	=	Efecto de las cargas de servicio debidas al empuje lateral del terreno.
H^*	=	Altura del estrato de suelo compresible debajo de la estructura.
H_m	=	Altura total del túnel de recuperación.
k _h	=	Constante de balastos horizontal.
k _o	=	Coeficiente de empuje en reposo del suelo.
k _v	=	Constante de balastos.
<i>K</i> ₂	=	Coeficiente de corte para suelos granulares para pequeñas deformaciones.
K _{2máx}	=	Coeficiente de corte máximo para pequeñas deformaciones del suelo.
K _v	=	Constante del resorte de interacción vertical.
l	=	Proyección libre del voladizo.
L	=	Efecto de las cargas vivas de servicio.
L _{ab}	=	Largo abertura.

L _{la}	=	Carga viva sobre lanzas.
L_{pl}	=	Peso sobrecarga en un muro.
L_{ptn}	=	Peso sobrecarga en 1 nodo del muro lateral.
L _{spn}	=	Peso sobre nodos de abertura.
L _{sup}	=	Ancho de abertura.
L_t	=	Longitud del túnel de recuperación.
Μ	=	Esfuerzo de momento que actúa sobre una estructura.
M_w	=	Magnitud de momento de eventos sísmicos.
Ν	=	Fuerza en la dirección axial que actúa sobre una estructura.
P _{la}	=	Carga de la pila sobre lanzas.
PP _{ch}	=	Peso propio chutes más planchas de desgaste.
<i>PP_{pt}</i>	=	Peso propio plataforma de operación
PP _{sp}	=	Peso propio del acopio o stockpile.
PS	= la p	Empuje lateral del suelo en función de la profundidad del terreno y del peso de bila sobre este.
q_u	=	Resistencia a la compresión no confinada.
Q	=	Fuerza de corte que actúa sobre una estructura.
r _c	=	Radio máximo de la pila en donde la carga definida por la envolvente es contante.
R_p	=	Radio máximo de una pila o acopio cónico.
S	= arn	Espaciamiento horizontal entre barras de acero en una sección de hormigón nado.
S	=	Espaciamiento entre resortes verticales en la base de una fundación.
SC _{ptm}	=	Sobrecarga sobre muros laterales.
SP	=	Abreviación de stockpile, pila o acopio.

ν	=	Coeficiente de Poisson del hormigón.
Ζ	= dete	Profundidad al centro de un estrato Distancia desde la cota de terreno hasta un erminado
<i>Z</i> *	= sue	Distancia desde la parte superior de la estructura hasta el centro de un estrato de lo.
γ_h	=	Densidad del hormigón armado en $[ton f/m^3]$.
γ _a	=	Densidad del acero no preesforzado.
γnsat	=	Densidad del terreno no saturado.
γ _{sat}	=	Densidad del terreno saturado.
γ_t	=	Densidad del terreno.
δs_i	=	Desplazamiento sísmico horizontal en la cota de un estrato de suelo.
Δ_{D+H}	=	Deformación inmediata por cargas permanentes.
Δ_E	=	Deformación inmediata por cargas sísmicas.
Δ_H	=	Deformación inmediata por cargas laterales del suelo.
Δ_{H+E}	= sísr	Deformación inmediata producto de cargas laterales del suelo y las cargas nicas.
Δ_L	=	Deformación inmediata por cargas vivas.
Δ_{LP}	=	Deformación a largo plazo.
$\Delta_{m lpha x}$	=	Deformación máxima admisible.
Δ_T	=	Deformación total en el tiempo.
Δ_s	=	Desplazamiento sísmico horizontal de la parte superior de una estructura.
ξ	=	Factor dependiente del tiempo para cargas sostenidas.
λ	=	Factor de multiplicación usado para obtener la deformación a largo plazo.
ho'	=	Cuantía a compresión.
$\sigma_{adm-est}$	=	Tensión admisible del suelo para cargas estáticas.

$\sigma_{adm-sis}$	=	Tensión admisible del suelo para cargas estáticas.
$\sigma_{est-sap}$	=	Tensión máxima en el suelo para cargas estáticas.
σ_s	=	Presión sísmica uniforme distribuida en la superficie del muro.
σ_s^*	= inc	Presión sísmica uniforme distribuida en la superficie del muro modificada para luir el peso de la pila o acopio.
$\sigma_{sis-sap}$	=	Tensión máxima en el suelo para cargas sísmicas.
σ_v	=	Tensión efectiva.
σ_v^*	=	Tensión efectiva vertical modificada para incluir el peso del acopio.
θ_s	=	Desangulación sísmica de corte
ϕ_t	=	Angulo de fricción interna o de depositación del terreno.
φ	=	Diámetro nominal de una barra de acero.
ψ	=	Ángulo de dilatancia del terreno.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTOO. (2014). LRFD Bridge Design Specifications (Séptima ed.).

ACI 318. (2014). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (Segunda ed.).

- Ai, J., Chen, J., Ooi, J., & Rotter, J. (2009). Finite element prediction of progressively formed conical stockpiles. 2009 SIMULIA Customer Conference, (pp. 375-387). London.
- Ai, J., Chen, J., Ooi, J., & Rotter, J. (2010). A numerical and experimental study of the base pressure distribution beneath a stockpile. *Granular Matter*, 13(2), 133-144.
- Brockbank, R., Ball, R., & Huntley, J. (1997). Contact force distribution beneath a threedimensional granular pile. *Journal de Physique II*, *7*, 1521-1532.
- Budhu, M. (2011). Soil Mechanics and Foundations (Tercera ed.). John Wiley & Sons.
- Conley, H. (2012). *Presiones en la base de un stockpile*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles.
- Institulo Nacional de Normalización. (2006). NCh 204:2006 Barras laminadas en caliente para hormigón armado. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2003). NCh 2369.0f2003 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2012). NCh 433.Of1996 Modificada en 2012 Diseño sísmico de Edificios. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2016). NCh 170:2016 Hormigón requisitos generales. Santiago, Chile.
- Lambe, W., & Whitman, R. (1979). Mecánica de Suelos (Primera ed.). John Wiley & Sons.
- McBride, W. (2006). Base pressure measurements under a scale model stock pile. *Particular Science and Technology*, 24, 59-71.
- McBride, W. (2007). Base pressure measurements under a scale model stock pile-Effects of offset reclaim channels and predictive model developments. *Particular Science and Technology*, 25, 425-434.

Ministerio de Obras Públicas. (2002). Manual de Carreteras. Dirección de Vialidad.

Nilson, A. (2001). Diseño de Estructuras de Concreto (Doceava ed.). McGraw-Hill.

- Ooi, J., & Zhou, C. (2009). Numerical investigation of progressive development of granular pile with spherical and non-spherical particles. *Mechanics of Materials, 41*, 707–714.
- Ooi, J., & Zhou, C. (2009). Numerical investigation of progressive development of granular pile with spherical and non-spherical particles. *Mechanics of Materials, 41*, 707-714.
- Ooi, J., Ai, J., Zhong, Z., Chen, J., & Rotter, J. (2008). Progressive pressure measurements beneath a granular pile with and without base deflection. *Structures and Granular Solids: Dorm Scientific Principles to Engineering Application*, 87-92.
- Parra, E., & Canteros, C. (2017). Conversaciones privadas. Santiago, Chile.
- Wright, F. D. (1993). Amole stockpile reclaim tunnel Earth pressures. Klohn Leonoff, Vancouver, British Columbia.

Anexo A. RESULTADOS MODELO ESTÁTICO EN SAP2000

TÚNEL EN FORMA RECTANGULAR A.1.

TABLA A-1

RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA SUPERIOR.

	LOSA SUPERIOR CENTRO			
	N	Q	М	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
C1	-1000	-	760	
С2	-750	-	470	
С3	-580	-	810	
C4	-750	-	655	
С5	-700	-	-15	

	LOSA SUPE	LOSA SUPERIOR BORDE ABERTURAS		
	N	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
С1	-890	-	860	
С2	-710	-	540	
С3	-545	-	880	
С4	-710	-	740	
С5	-740	-	15	

	LOSA SUPERIOR APOYOS			
	Ν	Q	М	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
C1	-990	375	-345	
С2	-970	305	-360	
С3	-570	300	-180	
C4	-750	305	-255	
С5	-290	140	-315	

	LOSA SU	LOSA SUPERIOR BORDE CORTE			
	N	Q	Μ		
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		
С1	-130	425	-350		
С2	-950	340	-355		
С3	-70	340	-215		
C4	-720	340	-265		
С5	-675	150	-290		

 TABLA A-2
 RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. MURO LATERAL.

	MURO SUPERIOR		
	Ν	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-470	215	320
С2	-405	210	280
С3	-430	130	210
C4	-420	170	245
С5	-220	165	165

	MURO CENTRO		
	N	Q	М
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-420	-	-210
С2	-350	-	-235
С3	-380	-	-90
C4	-360	-	-150
С5	-165	-	-205

	MURO INFERIOR		
	Ν	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-480	200	280
С2	-410	210	270
С3	-410	125	160
C4	-410	170	200
С5	-215	180	200

TABLA A-3 RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA INFERIOR.

	LOSA INFERIOR CENTRO				LOSA	LOSA INFERIOR APOYOS		
	N	Q	М		N	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
C1	-340	-	-425	С1	-350	240	350	
C2	-345	-	-280	С2	-365	205	370	
С3	-190	-	-490	С3	-200	200	140	
<i>C4</i>	-260	-	-400	С4	-260	200	240	
С5	-280	-	-10	С5	-280	110	320	

A.2. TÚNEL EN FORMA RECTANGULAR – SECCIÓN TRANSVERSAL

110E111-4 RESULTING STOPED CRECTING CENTROLING STOPENOR, SECONT TRANSFERSION	TABLA A-4	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA SUPERIOR. SECCIÓN TRANSVERSAJ	
--	-----------	---	--

	LOSA SUPERIOR TRANSVERSAL				LOSA SUPERIOR TRANSVERSAL		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
C1	575	165	-125	C1	-2100	-	105
С2	778	105	-125	С2	-1900	-	74
С3	428	105	-63	С3	-1135	-	81
C4	570	100	-88	C4	-1455	-	81
С5	957	60	-84	С5	-210	-	66

 TABLA A-5
 RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. MURO LATERAL. SECCIÓN TRANSVERSAL.

	MURO TRANSVERSAL				MURO TRANSVERSAL		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
C1	-152	45	-84	C1	360	-	200
С2	-60	52	-95	С2	481	-	185
С3	-81	30	-40	С3	240	-	125
C4	-91	40	-65	C4	315	-	150
С5	5	40	-85	С5	500	-	125

TABLA A-6

RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA INFERIOR. SECCIÓN TRANSVERSAL.

	LOSA INFERIOR TRANSVERSAL				LOSA INFERIOR TRANSVERSAL		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
C1	215	5	-85	С1	220	-	90
С2	56	10	-64	С2	75	-	81
С3	82	10	-100	С3	88	-	30
C4	71	10	-85	C4	82	-	52
С5	-151	5	-25	С5	-134	-	55

A.3. TÚNEL EN FORMA DE ARCO

	LOSA SUPERIOR					MURO-ARCO		
	N	Q	М		N	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
C1	-1400	25	195	C1	-175	190	100	
C2	-1325	55	85	С2	-125	160	85	
С3	-1090	65	260	С3	-125	155	65	
C4	-1190	30	185	C4	-125	155	75	
С5	-840	90	-75	C5	-130	85	65	

TABLA A-7RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. ARCO SUPERIOR.

TABLA A-8RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO LATERAL.

	MURO SUPERIOR					MURO INFERIOR		
	N	Q	Μ			N	Q	М
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	_		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-560	160	-145		С1	-590	140	-360
С2	-490	155	-90		С2	-510	160	-320
С3	-460	135	-220		С3	-500	80	-290
C4	-480	135	-200		C4	-480	115	-315
С5	-290	100	-80	_	С5	-310	140	-305

	N	IURO INFERI	OR
	N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-590	140	-360
С2	-510	160	-320
С3	-500	80	-290
C4	-480	115	-315
С5	-310	140	-305

TABLA A-9

RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA INFERIOR.

	LOSA INFERIOR CENTRO				LOSA INFERIOR APOYOS		
	N	Q	М		N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-270	-	-885	C1	-260	335	240
С2	-265	-	-745	С2	-280	300	260
С3	-150	-	-790	С3	-130	275	120
C4	-190	-	-770	C4	-190	290	190
С5	-220	-	-385	С5	-220	180	230

A.4. TÚNEL EN FORMA DE ARCO – SECCIÓN TRANSVERSAL

TABLA A-10 RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA SUPERIOR. SECCIÓN TRANSVERSAL.

	LOSA SUPERIOR TRANSVERSAL				LOSA SUPERIOR TRANSVERSAL		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
С1	-	183	-	С1	-350		115
С2	-	156	-	С2	-330		65
С3	-	100	-	С3	-275		110
C4	-	125	-	<i>C4</i>	-300		88
С5	-300	95	-20	С5	-240		5

 TABLA A-11
 RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO-ARCO. SECCIÓN TRANSVERSAL.

	MURO-ARCO TRANSVERSAL				MURO-ARCO TRANSVERSAL		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
С1	-215	210	-45	C1	-45	-	36
С2	-187	200	-25	С2	-40	-	40
С3	-145	125	-55	С3	-40	-	20
С4	-155	155	-45	C4	-22	-	30
С5	-210	139	-5	С5	-5	-	25

TABLA A-12

RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO LATERAL. SECCIÓN TRANSVERSAL.

	MURO TRANSVERSAL				MURO TRANSVERSAL		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
C1	-145	78	-81	 С1	-	-	-
C2	-155	75	-89	С2	-	-	-
С3	-130	65	-75	С3	-	-	-
C4	-125	70	-76	C4	-	-	-
С5	-83	50	-51	 С5	-93	-	15

TABLA A-13

RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA INFERIOR. SECCIÓN TRANSVERSAL.

	LOSA INFERIOR TRANSVERSAL				LOSA INFERIOR TRANSVERSAL		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
С1	-62	78	-215	C1	-60	-	85
С2	-67	60	-185	С2	-72	-	63
С3	-36	60	-200	С3	-32	-	50
C4	-46	60	-195	C4	-47	-	65
С5	-55	25	-96	С5	-55	-	65

Anexo B. RESULTADOS MODELO ESTÁTICO EN PLAXIS

TÚNEL EN FORMA RECTANGULAR **B.1**.

TABLA B-1	RESULTADOS MODELO RECTANGULAR PLAXIS. LOSA SUPERIOR.	

	LOSA	LOSA SUPERIOR CENTRO				LOSA SUPERIOR BORDE CORTE		
	N	Q	Μ			Ν	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]			[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-201	-	491		С1	-201	299	-275
С2	-182	-	349		С2	-182	222	-234
С3	-137	-	387		С3	-137	217	-183
C4	-159	-	374		С4	-159	222	-209
 С5	-114	-	83		С5	-114	71	-126

 TABLA B-2
 RESULTADOS MODELO RECTANGULAR PLAXIS. MURO LATERAL.

	M	MURO SUPERIOR							
	Ν	Q	Μ						
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]						
C1	-598	114	-186						
С2	-534	114	-180						
С3	-420	67	-118						
С2	-491	91	-150						
С3	-310	86	-128						

	N	MURO CENTRO						
	Ν	Q	Μ					
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]					
С1	-551	-	78					
С2	-468	-	89					
С3	-418	-	35					
C4	-457	-	62					
С5	-249	-	82					

	N	IURO INFERI	OR
	Ν	Q	М
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
С1	-495	-135	-226
С2	-387	-120	-177
С3	-373	-90	-168
С2	-385	-105	-175
С3	-194	-73	-72

TABLA B-3

RESULTADOS MODELO RECTANGULAR PLAXIS. LOSA INFERIOR.

	LOSA INFERIOR CENTRO				LOSA INFERIOR APOYOS			
	N	Q	М		N	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
C1	-189	-	-809	С1	-193	-282	62	
С2	-194	-	-710	С2	-197	-258	84	
С3	-102	-	-582	С3	-105	-192	13	
C4	-148	-	-667	С2	-151	-230	43	
С5	-150	-	-397	С3	-152	-160	93	

B.2. Túnel Forma de Arco

								MURC	D-ARCO	
	N	Q	M-	M+			N	Q	M-	M+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	[tonf m/m]			[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	[tonf m/m]
С1	-357	112	-	159		C1	-683	123	-361	-
C2	-327	66	-	97		C2	-615	95	-276	12
С3	-255	103	-12	134		C3	-477	111	-304	-
C2	-285	88	-1	117		C4	-537	103	-292	-
С3	-228	19	-5	34		C5	-363	55	-106	36

TABLA B-4 RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. ARCO SUPERIOR.

TABLA B-5RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. MURO LATERAL.

	MURO SUPERIOR				MURO INFERIOR		
	N	Q	М		N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
С1	-709	105	-439	С1	-705	33	-298
С2	-652	128	-449	С2	-637	53	-245
С3	-480	34	-249	С3	-487	-3	-239
С4	-554	74	-335	С4	-552	21	-241
С5	-410	120	-344	С5	-377	64	-116

TABLA B-6RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. LOSA INFERIOR.

	LOSA INFERIOR CENTRO				LOSA INFERIOR APOYOS			
	N	Q	М		N	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
С1	-98	-	-1112	С1	-104	-321	-9	
С2	-122	-	-1000	С2	-127	-301	33	
С3	-28	-	-774	С3	-33	-210	-50	
C4	-68	-	-871	C4	-73	-249	-14	
С5	-117	-	-600	С5	-120	-199	78	

Anexo C. RESULTADOS FINALES DE DISEÑO EN SAP2000

C.1. TÚNEL EN FORMA RECTANGULAR

TABLA C-1 RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA SUPERIOR.

	LOSA SUPERIOR CENTRO				LOSA SUPERIOR BORDE ABERTURAS		
	Ν	Q	М		N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
С1	-1000	-	760	С1	-890	-	860
С2	-750	-	470	С2	-710	-	540
С3	-580	-	810	С3	-545	-	880
С4	-850	-	730	C4	-920	-	830
С5	-800	-	-90	С5	-950	-	105

	LOSA SUPERIOR APOYOS				LOSA SUPERIOR BORDE CORTE		
	Ν	Q	М		N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
С1	-990	375	-345	C1	-130	425	-350
С2	-970	305	-360	С2	-950	340	-355
С3	-570	300	-180	С3	-70	340	-215
С4	-783	309	-310	C4	-820	345	-310
С5	-323	144	-370	C5	-775	155	-335

TABLA C-2

RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. MURO LATERAL.

	M	URO SUPERI	OR
	N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-470	215	320
С2	-405	210	280
С3	-430	130	210
C4	-430	190	255
С5	-230	185	175
	N		OR
	N	0	NA
		ų v	IVI
	[tonf/m]	ح [tonf/m]	[tonf m/m]
С1	[tonf/m] -480	[tonf/m] 200	[tonf m/m] 280
C1 C2	[tonf/m] -480 -410	[tonf/m] 200 210	[tonf m/m] 280 270
C1 C2 C3	[tonf/m] -480 -410 -410	[tonf/m] 200 210 125	[tonf m/m] 280 270 160
C1 C2 C3 C4	[tonf/m] -480 -410 -410 -415	[tonf/m] 200 210 125 190	[tonf m/m] 280 270 160 225

	N	/URO CENTR	2	
	Ν	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
С1	-420	-	-210	
С2	-350	-	-235	
С3	-380		-90	
C4	-370	-	-180	
С5	-175	-	-235	

TABLA C-3 RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA INFERIOR.

	LOSA	LOSA INFERIOR CENTRO				LOSA INFERIOR APOYOS		
	N	Q	М			N	Q	М
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]			[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-270	-	-885		С1	-260	335	240
С2	-265	-	-745		С2	-280	300	260
С3	-150	-	-790		С3	-130	275	120
<i>C4</i>	-190	-	-780		C4	-190	302	235
С5	-220	-	-395		С5	-220	192	275

C.2. TÚNEL EN FORMA RECTANGULAR – SECCIÓN TRANSVERSAL

 TABLA C-4
 RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA SUPERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	LOSA SU	PERIOR TRAN	SVERSAL		LOSA SUPERIOR TRANSVER		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
С1	575	165	-125	C1	-2100	-	105
С2	778	105	-125	С2	-1900	-	74
С3	428	105	-63	С3	-1135	-	81
C4	610	103	-100	<i>C4</i>	-1495	-	93
С5	997	63	-96	С5	-250	-	78

 TABLA C-5
 RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. MURO LATERAL. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	MUI	RO TRANSVE	RSAL		MURO TRANSVERSAL		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
C1	-152	45	-84	С1	360	-	195
С2	-60	52	-95	С2	481	-	185
С3	-81	30	-40	С3	240	-	125
C4	-111	50	-99	<i>C</i> 4	335	-	184
С5	25	50	-119	С5	520	-	159

TABLA C-6

RESULTADOS MODELO RECTANGULAR SAP2000. LOSA INFERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	LOSA IN	FERIOR TRAN	SVERSAL		LOSA INFERIOR TRANSVERS		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
C1	215	5	-85	С1	220	-	90
С2	56	10	-64	С2	75	-	81
С3	82	10	-100	С3	88	-	30
C4	76	11	-95	C4	87	-	62
С5	-156	6	-35	С5	-139	-	65

C.3. TÚNEL EN FORMA DE ARCO

	LC	OSA SUPERIO	R			MURO-ARCO	כ ב
	N	N Q M			N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-1400	25	195	C1	-175	190	100
С2	-1325	55	85	С2	-125	160	85
С3	-1090	65	260	С3	-125	155	65
C4	-1267	65	224	C4	-135	190	110
C5	-917	125	-114	C5	-140	120	100

TABLA C-7RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. ARCO SUPERIOR.

 TABLA C-8
 RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO LATERAL.

	MURO SUPERIOR				N	OR	
	Ν	Q	М		N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-560	160	-145	С1	-590	140	-360
С2	-490	155	-90	С2	-510	160	-320
С3	-460	135	-220	С3	-500	80	-290
C4	-490	155	-235	С4	-495	135	-345
С5	-300	120	-115	С5	-325	160	-335

TABLA C-9

RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA INFERIOR.

	LOSA INFERIOR CENTRO					LOSA INFERIOR APOYOS		
	N	Q	М			N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]			[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-270	-	-885		C1	-260	335	240
С2	-265	-	-745		С2	-280	300	260
С3	-150	-	-790		С3	-130	275	120
C4	-190	-	-780		C4	-190	302	235
С5	-220	-	-395		С5	-220	192	275

C.4. TÚNEL EN FORMA DE ARCO – SECCIÓN TRANSVERSAL

RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA SUPERIOR, DIRECCIÓN TRANSVERSAL. TABLA C-10

	LOSA SUPERIOR TRANSVERSAL				LOSA SUPERIOR TRANSVERSA		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
С1	-	183	-	C1	-350	0	115
С2	-	156	-	С2	-330	0	65
С3	-	100	-	С3	-275	0	110
C4	-	137	-	C4	-315	12	98
С5	-315	107	-30	С5	-255	12	15

TABLA C-11 RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO-ARCO. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	MURO-	ARCO TRANS	VERSAL		MURO-ARCO TRANSVERSA		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
С1	-215	210	-45	C1	-45	-	36
С2	-187	200	-25	С2	-40	-	40
С3	-145	125	-55	С3	-40	-	20
C4	-158	179	-54	C4	-25	-	39
С5	-213	163	-14	С5	-8	-	34

 TABLA C-12
 RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. MURO LATERAL. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	MUI	RO TRANSVE	RSAL		MUI	RO TRANSVE	RSAL
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
C1	-145	78	-81	C1	-	-	-
С2	-155	75	-89	С2	-	-	-
С3	-130	65	-75	С3	-	-	-
C4	-129	74	-83	C4	-	-	-
С5	-87	54	-58	C5	-97	-	22

TABLA C-13

RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO SAP2000. LOSA INFERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	LOSA IN	FERIOR TRAN	SVERSAL		LOSA INFERIOR TRANSVERSAL		
	Nt	Qt	Mt-		Nt	Qt	Mt+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf/m]
C1	-62	78	-215	С1	-60	-	85
С2	-67	60	-185	С2	-72	-	63
С3	-36	60	-200	С3	-32	-	50
C4	-46	61	-205	С4	-47	-	75
С5	-55	26	-106	<u> </u>	-55	-	75

Anexo D. RESULTADOS FINALES DE DISEÑO EN PLAXIS

D.1. TÚNEL EN FORMA RECTANGULAR

TABLA D-1 RESULTADOS MODELO EN RECTANGULAR PLAXIS. LOSA SUPERIOR. DIRECCIÓN TRANSV	VERSAL.
--	---------

	LOSA SUPERIOR CENTRO				LOSA SUPERIOR BORDE ABERTURAS		
	Ν	Q	М		Ν	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-201	-	491	C1	-179	-	555
С2	-182	-	349	С2	-172	-	401
С3	-137	-	387	С3	-129	-	420
С4	-259	-	449	C4	-280	-	510
С5	-214	-	158	С5	-254	-	185

	LOSA SUPERIOR APOYOS				LOSA SUPERIOR BORDE CORTE		
	N	Q	Μ		N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
С1	-1534	264	-272	C1	-201	299	-275
С2	-186	199	-237	С2	-182	222	-234
С3	-1117	191	-153	С3	-137	217	-183
С4	-183	202	-264	C4	-192	226	-264
С5	-61	69	-200	С5	-147	75	-181

TABLA D-2

RESULTADOS MODELO EN RECTANGULAR PLAXIS. MURO LATERAL. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	MURO SUPERIOR								
	Ν	Q	Μ						
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]						
C1	-598	114	-186						
С2	-534	114	-180						
С3	-420	67	-118						
С2	-501	111	-160						
С3	-320	106	-138						

	N	/URO CENTR	0
	N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
С1	-551	-	78
С2	-468	-	89
С3	-418	-	35
C4	-467	-	92
 С5	-259	-	112

	N	MURO INFERIOR								
	N	Q	Μ							
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]							
C1	-495	-135	-226							
С2	-387	-120	-177							
С3	-373	-90	-168							
С2	-390	-125	-200							
С3	-199	-93	-97							

TABLA D-3

RESULTADOS MODELO EN RECTANGULAR PLAXIS. LOSA INFERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	LOSA INFERIOR CENTRO				LOSA	LOSA INFERIOR APOYOS		
	N	Q	Μ		N	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
C1	-189	-	-809	С1	-193	282	62	
С2	-194	-	-710	С2	-197	258	84	
С3	-102	-	-582	С3	-105	192	13	
С4	-148	-	-697	С2	-151	-234	88	
С5	-150	-	-427	С3	-152	-164	138	

D.2. TÚNEL EN FORMA DE ARCO

 TABLA D-4
 RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. ARCO SUPERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	LOSA SUPERIOR						MURO-ARCO			
	Ν	Q	M-	M+			N	Q	M-	M+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	[tonf m/m]	_		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	[tonf m/m]
С1	-357	112	-	159		С1	-683	123	-361	-
C2	-327	66	-	97		С2	-615	95	-276	12
С3	-255	103	-12	134		С3	-477	111	-304	-
C4	-295	123	-36	152		C4	-614	138	-331	-
С5	-238	54	-40	69		С5	-440	90	-145	75

TABLA D-5

RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. MURO LATERAL. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	MURO SUPERIOR				MURO INFERIOR		
	N	Q	М		N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
С1	-709	105	-439	C1	-705	33	-298
С2	-652	128	-449	С2	-637	53	-245
С3	-480	34	-249	С3	-487	-3	-239
C4	-564	94	-370	С2	-567	41	-271
С5	-420	140	-379	С3	-392	84	-146

TABLA D-6

RESULTADOS MODELO EN FORMA DE ARCO PLAXIS. LOSA INFERIOR. DIRECCIÓN TRANSVERSAL.

	LOSA INFERIOR CENTRO				LOSA INFERIOR APOYOS		
	N	Q	М		N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-98	-	-1112	С1	-104	-321	-9
С2	-122	-	-1000	С2	-127	-301	33
С3	-28	-	-774	С3	-33	-210	-50
C4	-68	-	-881	С2	-73	-261	-59
С5	-117	-	-610	С3	-120	-211	123

Anexo E. ESFUERZOS FINALES DE DISEÑO DE PROPUESTAS

E.1. TÚNEL EN FORMA RECTANGULAR

TABLA E-1 ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL RECTANGULAR. LOSA SUPERIOR.

	LOSA	SUPERIOR CE	INTRO		LOSA SUPERIOR BORDE ABERTURAS		
	Ν	Q	М		N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
С1	-211	-	398	C1	-188	-	450
С2	-183	-	294	C2	-173	-	338
С3	-147	-	307	С3	-139	-	334
С4	-263	-	376	C4	-284	-	428
С5	-211	-	162	C5	-251	-	189

	LOSA SUPERIOR APOYOS					LOSA SUPERIOR BORDE CORTE			
	Ν	Q	Μ			N	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	_		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
С1	-1605	215	-332		С1	-211	243	-337	
С2	-187	161	-266		С2	-183	179	-263	
С3	-1200	155	-200		С3	-147	176	-239	
C4	-187	162	-305		С4	-196	181	-305	
С5	-60	54	-181	_	С5	-144	58	-164	

 TABLA E-2
 ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL RECTANGULAR. MURO LATERAL.

	Μ	URO SUPERI	OR		N	/URO CENTR	RO
	N	Q	М		Ν	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
С1	-472	-143	460	C1	-569	-	40
С2	-395	-122	357	С2	-483	-	9
С3	-384	-99	353	С3	-439	-	58
С2	-398	-129	365	C4	-474	-	65
С3	-210	-89	148	C5	-272	-	-74

	MURO INFERIOR				
	Ν	Q	Μ		
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		
C1	-613	97	267		
С2	-540	99	249		
С3	-435	54	182		
С2	-494	95	238		
С3	-321	104	193		

TABLA E-3 ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL RECTANGULAR. LOSA INFERIOR.

	LOSA INFERIOR CENTRO					LOSA INFERIOR APOYOS			
	N	Q	М			N	Q	Μ	
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]			[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	
C1	-180	-	-801	(C1	-186	253	38	
С2	-185	-	-703	(C2	-187	231	60	
С3	-94	-	-579	(C3	-98	173	-3	
C4	-136	-	-664	(C2	-140	-203	71	
С5	-154	-	-426	(C3	-158	-150	128	

E.2. TÚNEL EN FORMA DE ARCO

TABLA E-4 ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL EN FORMA DE ARCO. ARCO SUPERIOR.

		LOSA SL	JPERIOR					MURC)-ARCO	
	N	Q	M-	M+			N	Q	M-	M+
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	[tonf m/m]	_		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]	[tonf m/m]
С1	-377	105	-18	140		С1	-684	112	-316	-
С2	-344	61	-	79		С2	-615	84	-231	7
С3	-267	98	-16	121		С3	-478	105	-276	-
C4	-310	117	-40	139		C4	-614	129	-295	-
С5	-235	57	-50	64		С5	-439	82	-110	71

 TABLA E-5
 ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL EN FORMA DE ARCO. MURO LATERAL.

	MURO SUPERIOR				MURO INFERIOR		
	N	Q	М		Ν	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-690	92	-276	C1	-721	8	-223
С2	-619	65	-210	С2	-662	31	-229
С3	-482	78	-236	С3	-488	-19	-130
C4	-551	92	-260	С2	-579	22	-203
С5	-373	54	-123	С3	-423	71	-209

TABLA E-6

ESFUERZOS FINALES PROPUESTA DE TÚNEL EN FORMA DE ARCO. LOSA INFERIOR.

	LOSA INFERIOR CENTRO				LOSA INFERIOR APOYOS		
	N	Q	Μ		N	Q	Μ
	[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]		[tonf/m]	[tonf/m]	[tonf m/m]
C1	-80	-	-1291	С1	-85	-332	202
С2	-106	-	-1157	С2	-110	-311	136
С3	-15	-	-904	С3	-19	-217	189
C4	-54	-	-1022	С2	-57	-269	211
С5	-107	-	-695	С3	-110	-216	61

Anexo F. DISEÑO ESTRUCTURAL

LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Losa Superior Túnel Rectangular

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

 $fy \coloneqq 420 \ MPa$

 $Es \coloneqq 210000 \ MPa$

$$\beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \text{ MPa} = 0.84$$

$$\| 0.85 \\ \text{else if } f'c \geq 55 \text{ MPa} \\ \| 0.65 \\ \text{else} \\ \| 0.85 - \frac{0.05 (f'c - 28 \text{ MPa})}{7 \text{ MPa}} |$$

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

Altura Losa

Ancho losa

Recubrimiento





2.2. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 398 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$
$$Mu_n \coloneqq 332 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Solicitación máxima positiva. Centro

Solicitación máxima negativa. Apoyos.

Carga Axial y Momento en Centro de la Losa

C1: 1,2 D + 1,6 L + 1,6 H398 2111,2 D + 1,0 L + 1,6 HC2: 294183 tonf $tonf \cdot m$ 1,2 D + 1,0 L + 0,9 HC3: $Pu_1 \coloneqq | 147$ 307 $Mu_1 \coloneqq$ \boldsymbol{m} \boldsymbol{m} 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 EC4: 2633760.9 D + 1.2 H + 1.4 E211C5: 162

Carga Axial y Momento en Apoyos de la Losa

C1:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H	[1605]				
C2:	1,2 D + 1,0 L + 1,6 H	187			266	
C3:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H	$Pu_2 := 1200 $	tonf	Mu_2 :	= 200	$tonf \cdot m$
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E	187	m	2	305	m
C5:	0,9 D + 1,2 H + 1,4 E	60			181	

2.3. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

 $\phi_{bp_1} := 32 \text{ mm}$ $\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 32 \text{ mm}$ $\phi_{bp_3} := \phi_{bp_1} = 32 \text{ mm}$ $\phi_{bp_4} := \phi_{bp_1} = 32 \text{ mm}$

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

- Diámetro de la barra 2da linea.
- Diámetro de la barra 3ra linea.

Diámetro de la barra 4ta linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 200 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 200 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 200 \text{ mm}$$

$$s_{hp_4} := s_{hp_1} = 200 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.6 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 11.45 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 16.3 \text{ cm}$$

$$s_{capp_4} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{3 \cdot s_{vp}}{2} + \phi_{bp_2} = 21.15 \text{ cm}$$

Diametro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} := 36 \text{ mm}$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 36 \text{ mm}$
 $\phi_{bn_3} := \phi_{bn_1} = 36 \text{ mm}$

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} := 65 \ mm$$

 $s_{hn_1} := 175 \ mm$
 $s_{hn_2} := s_{hn_1} = 175 \ mm$
 $s_{hn_3} := s_{hn_1} = 175 \ mm$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Separación entre barras refuerzo 4ta línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Distancia desde CG a borde de Capa 4.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea.

$$\begin{split} s_{capn_1} &\coloneqq rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.8 \ \textit{cm} \\ s_{capn_2} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 11.85 \ \textit{cm} \\ s_{capn_3} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 16.9 \ \textit{cm} \end{split}$$
 Distancia desde CG a borde de Capa 2.
Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Numero de capas.

$$n_p := 2$$
Número capas inferiores (M+) $n_n := 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$$d_p := h - s_{capp}_{n_p} = 148.55 \ cm$$
 Altura efectiva hasta barras inferiores.
 $d_p' := h - s_{capn}_{n_n} = 153.2 \ cm$ Altura efectiva hasta barras superiores

2.4. Calculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 398 \ rac{tonf \cdot m}{m}$$

 $\phi_f \coloneqq 0.9$

Desarrollo

$$As_{p} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 80.42 \frac{cm^{2}}{m} \qquad \text{ Are}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 13.51 \ cm$$

$$Mn_{p} \coloneqq As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 488.41 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \qquad \text{ Mo}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{p} = 439.57 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \qquad \text{ Mo}$$

$$rev_{21} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$

$$FU \coloneqq \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 1.1 \qquad \text{ Fac}$$

Momento solicitante de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal negativo.

Momento nominal negativo reducido.

Factor de utilización.

2.5. Calculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 332 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$\begin{aligned} As_{n} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 58.16 \frac{cm^{2}}{m} & \text{ Are} \\ a &:= \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 9.77 \ cm \\ Mn_{n} &:= As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 369.46 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Me} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{n} &= 332.52 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Me} \\ rev_{22} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{n} > Mu_{n}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''} \end{aligned}$$

$$FU \coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_n}{Mu_n} = 1.00$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

Factor de utilización.

2.7. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.

7.6.1. Armadura mínima losas en una dirección. 24.4.3.2. Cuantía mínima de retracción y $As_{minf} := \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$ $As_{minf} \cdot h = 28.8 \frac{cm^2}{m}$ temperatura.

Cuantía mínima por cara.

$$rev_{23} \coloneqq if(As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$$

 $rev_{24} \!\!\coloneqq\!\! \mathbf{if} \left(\! As_p \! \geq \! As_{\!minf} \! \cdot \! h, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) \! = \text{``Ok.''}$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.

7.7.2.3 Separación mínima flexión losas.

$$s_{max.f} \coloneqq min (3 \cdot h, 450 \text{ mm}) = 450 \text{ mm}$$
$$rev_{25} \coloneqq \text{if} (\max (s_{hp}) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''}) = \text{``Ok''}$$
$$rev_{26} \coloneqq \text{if} (\max (s_{hn}) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''}) = \text{``Ok''}$$

Distancia Libre entre Capas Horizontales

```
7.7.2.1 \rightarrow 25.2.2
Distancia libre entre capas horizontales.
```

$s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

$rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras superiores.
$rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras inferiores.

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$ Distancia libre entre capas horizontales.

 $\begin{array}{l} d_{agg} \coloneqq 50 \ \textit{mm} & \mbox{Tamaño nominal máximo del agregado grueso.} \\ s_{hpmin} \coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bp} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \\ rev_{29} \coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hp} \right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} & \mbox{Revisión barras superiores.} \end{array}$

$$s_{hnmin} \coloneqq \max\left(25 \ \boldsymbol{mm}, \max\left(\phi_{bn}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \boldsymbol{mm}$$
$$rev_{210} \coloneqq \mathbf{if}\left(\min\left(s_{hn}\right) < s_{hnmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{`'Ok''}\right) = \text{`'Ok''} \qquad \text{Revisión barras inferiores.}$$

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

 $l_{d} \coloneqq \max\left(d_{p}, 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right)\right) = 148.55 \text{ cm}$

Largo de desarrollo en losa.

Se utilizará gancho en 90°.

$$\begin{split} l_{dh} &\coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ } \textbf{mm}\right) \\ l_{dh} &= 66.9 \text{ } \textbf{cm} \end{split}$$
 Largo de desarro

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm
No. 10 a No. 25	$6d_b$
No. 29 a No. 36	$8d_b$

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 36 \, \boldsymbol{mm}$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max \left(\phi_{bn}, \phi_{bp} \right) = 28.8 \ \textit{cm}$

 $l_{ext} \coloneqq 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp}) = 43.2 \ cm$

ollo en muro.



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

2.8. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

Condición de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} = 1830.59 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &:= 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} = 1189.88 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} = 1167.73 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &:= 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} = 759.02 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{array}{c|c} P_{n_{j}} \coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{j} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k,j} \\ \phi_{j} \coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_{b} \\ \| \underbrace{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \| \underbrace{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.65 \cdot P_{b}}{2 \cdot P_{b}} \end{array} \right| \qquad \begin{array}{c} \phi_{j} \coloneqq \text{if } \phi_{j} < 0.65 \\ \| 0.65 \\ \text{else if } \phi_{j} > 0.9 \\ \| 0.9 \\ \text{else} \\ \| \phi_{j} \\ \end{array} \right| \qquad \begin{array}{c} \text{Factor de Reducción de Resistencia} \\ \text{Resistencia} \\ \end{array}$$

Cargas Axiales

 $\phi P_{n_j} \! \coloneqq \! \phi_j \! \cdot \! P_{n_j}$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

`

Gráfico de Interacción y vectores.


3. DISEÑO A CORTE

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Solicitaciones.

$$d_p = 148.55 \text{ cm}$$
$$Vu \coloneqq 215 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$
$$\phi_c \coloneqq 0.75$$
$$Nu \coloneqq 1605 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

3.2. Corte Nominal Hormigón.

 $Vc_{sax} \coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \cdot d_p$

 $Vc_{sax} = 139.68 \ rac{tonf}{m}$

 $Vc_{trax} = 532.26 \frac{tonf}{m}$

 $Vc = 237.82 \frac{tonf}{m}$

 $Vc_{comp} \coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{14 \cdot h}\right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p$ $Vc_{comp} \equiv 237.82 \ \frac{tonf}{m}$ $Vc_{trax} \coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{3.5 \cdot h}\right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p$ tonf

Altura efectiva sección.

Solicitacion de corte a d del muro

Factor reducción corte.

Carga axial (si Nu >0 \rightarrow compression).

Corte nominal sin carga axial.

Corte nominal con carga axial en compresión.

Corte nominal con carga axial en tracción.

Corte nominal Efectivo.

3.3. Altura minima sección.

 $Vc \coloneqq Vc_{comp}$

$$Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$$

$$d_{min} \coloneqq \left(\frac{Vu}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv 13.38 \text{ cm}$$

$$rev_{31} \coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''}$$

Altura mínima efectiva de la sección.

3.4. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{Vu}{\phi_c} - Vc \qquad Vs_{min} = 48.85 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte nominal mínimo acero.}$$

$$rev_{32} = \text{``Requiere Vs''}$$

$$\phi_{bc} \coloneqq 12 \ mm \qquad \qquad \text{Diámetro estribo de acero .}$$

$$s_c \coloneqq 250 \ mm \qquad \qquad \text{Espaciamiento}$$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{2}{m} \qquad \qquad \text{Número ramas por metro.}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^2\right) \cdot n_{rc} \qquad A_{vc} \equiv 2.26 \ \frac{cm^2}{m} \qquad \text{Area estribo doble por 1m trans.}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_p}{s_c} \qquad Vs \equiv 57.56 \ \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal Acero.}$$

 $rev_{32} \coloneqq if(Vs > Vs_{min}, "Ok", "Rediseñar") = "Ok"$

3.5. Corte Nominal Total

$$Vn \coloneqq Vc + Vs \qquad Vn = 295.38 \frac{tonf}{m}$$

$$\phi Vn \coloneqq \phi_c \cdot Vn \qquad \phi Vn = 221.54 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal reducido.}$$

$$rev_{33} \coloneqq \text{if} (\phi Vn > Vu, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}) = \text{``Ok''}$$

$$FU_c \coloneqq \frac{\phi Vn}{Vu} = 1.03$$

3.6 Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

 $rev_{34} = \text{``Verificar armadura mı́nima''}$ $Av_{min} \coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \qquad 9.6.3.3. \text{ Av min corte}$ $Av_{min} \cdot s_c = 2.08 \ \frac{cm^2}{m}$

$$\begin{split} rev_{35} &\coloneqq \mathbf{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''} \right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &\coloneqq \mathbf{if} \left(Vs_{min} > 0, \mathbf{if} \left(Vs \leq 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''} \right), \text{``-''} \right) = \text{``Ok''} \end{split}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

 $s_{max} \coloneqq min \left(450 \ mm, 3 \ h \right) = 450 \ mm$

 $rev_{37} \coloneqq \mathbf{if} \left(Vs_{min} \! > \! 0 \,, \mathbf{if} \left(s_c \! < \! s_{max} \,, \text{``Ok.''} \,, \text{``Mod. s.''} \right) , \text{``-''} \right) \! = \text{``Ok.''}$

LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Losa Superior Borde Aberturas Túnel Rectangular

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$ fy := 420 MPa

$$\begin{array}{l} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.85 \\ \text{else if } f'c \geq 55 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.65 \\ \text{else} \\ \| 0.85 - \frac{0.05 \ (f'c - 28 \ \textbf{MPa})}{7 \ \textbf{MPa}} \\ \end{array} \right\|$$

Altura Losa

Ancho losa

Recubrimiento

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

2.1. Geometría.



$$Aslat \coloneqq 0 \ \frac{cm^2}{m}$$



2.2. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 450 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$
$$Mu_n \coloneqq 332 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Solicitación máxima positiva. Centro

Solicitación máxima negativa. Apoyos.

Carga Axial y Momento en Centro de la Losa

C1:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H	[188]			$\left[450\right]$	
C2:	1,2 D + 1,0 L + 1,6 H	173			338	
C3:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H	$Pu_1 := 139$	tonf	$Mu_1 \coloneqq$	334	tonf•m
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E	284	m	1	428	\boldsymbol{m}
C5:	0,9 D + 1,2 H + 1,4 E	251			189	

Carga Axial y Momento en Apoyos de la Losa

C1:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H		[1605]	1		$\begin{bmatrix} 332 \end{bmatrix}$	
C2:	1,2 D + 1,0 L + 1,6 H		187			266	
C3:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H	$Pu_2 \coloneqq$	1200	tonf	$Mu_2 \coloneqq$	200	
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E	2	187	m	2	305	\boldsymbol{m}
C5:	0,9 <i>D</i> + 1,2 <i>H</i> + 1,4 E		60			181	

2.3. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

 $\phi_{bp_{1}} := 28 \ mm$ $\phi_{bp_{2}} := \phi_{bp_{1}} = 28 \ mm$ $\phi_{bp_{3}} := \phi_{bp_{1}} = 28 \ mm$ $\phi_{bp_{4}} := \phi_{bp_{1}} = 28 \ mm$

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Diámetro de la barra 4ta linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 200 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 200 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 200 \text{ mm}$$

$$s_{hp_4} := s_{hp_1} = 200 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.4 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 11.05 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 15.7 \text{ cm}$$

$$s_{capp_4} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{3 \cdot s_{vp}}{2} + \phi_{bp_2} = 20.35 \text{ cm}$$

Diametro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} := 36 \text{ mm}$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 36 \text{ mm}$
 $\phi_{bn_3} := \phi_{bn_1} = 36 \text{ mm}$

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

 $s_{vn} := 65 \text{ mm}$ $s_{hn_1} := 175 \text{ mm}$ $s_{hn_2} := s_{hn_1} = 175 \text{ mm}$ $s_{hn_3} := s_{hn_1} = 175 \text{ mm}$ $s_{capn_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.8 \text{ cm}$ Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Separación entre barras refuerzo 4ta línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Distancia desde CG a borde de Capa 4.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1.

$$s_{capn_2} \coloneqq rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 11.85 \text{ cm}$$
Distancia desde CG a borde de Capa 2.
$$s_{capn_3} \coloneqq rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 16.9 \text{ cm}$$
Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Numero de capas.

$$n_p := 3$$
Número capas inferiores (M+) $n_n := 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$$d_p \coloneqq h - s_{capp}_{n_p} = 144.3 \ cm$$
 Altura efectiva hasta barras inferiores.
 $d_p' \coloneqq h - s_{capn}_{n_n} = 153.2 \ cm$ Altura efectiva hasta barras superiores.

2.4. Calculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

~

$$Mu_p = 450 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

m

 $FU \coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_p}{Mu_p} = 1.08$

$$\begin{split} As_{p} &\coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 92.36 \frac{cm^{2}}{m} & \text{ Are} \\ a &\coloneqq \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 15.51 \ cm \\ Mn_{p} &\coloneqq As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 540.13 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Me} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 486.12 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Me} \\ rev_{21} &\coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''} \end{split}$$

Momento solicitante de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal negativo.

Momento nominal negativo reducido.

Factor de utilización.

2.5. Calculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 332 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f := 0.9$$

Desarrollo

$$\begin{aligned} As_{n} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 58.16 \frac{cm^{2}}{m} \\ a &:= \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 9.77 \ cm \\ Mn_{n} &:= As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 369.46 \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{n} &= 332.52 \frac{tonf \cdot m}{m} \\ rev_{22} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{n} > Mu_{n}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) \end{aligned}$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_f \cdot Mn_n > Mu_n, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$
$$FU \coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_n}{Mu_n} = 1.00$$
Factor de utilización.

2.7. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.7.6.1. Armadura mínima losas en
una dirección. $As_{minf} := \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$ 24.4.3.2. Cuantía mínima de
retracción y temperatura. $As_{minf} \cdot h = 28.8 \frac{cm^2}{m}$ Cuantía mínima por cara. $rev_{23} := if (As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."<math>rev_{24} := if (As_p \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.

7.7.2.3 Separación mínima flexión losas.

$$s_{max.f} \coloneqq min (3 \cdot h, 450 \text{ mm}) = 450 \text{ mm}$$
$$rev_{25} \coloneqq if (max (s_{hp}) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''}) = \text{``Ok''}$$
$$rev_{26} \coloneqq if (max (s_{hn}) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''}) = \text{``Ok''}$$

Distancia Libre entre Capas Horizontales $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.2$

Distancia libre entre capas horizontales.

 $rev_{27} := \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$ Revisión barras superiores. $rev_{28} := \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$ Revisión barras inferiores.

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

 $d_{aaa} \coloneqq 50 \ mm$

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$ Distancia libre entre capas horizontales.

Tamaño nominal máximo del agregado grueso.

$$\begin{split} s_{hpmin} &\coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bp} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \\ rev_{29} &\coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hp} \right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras superiores.} \\ s_{hnmin} &\coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bn} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \\ rev_{210} &\coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hn} \right) < s_{hnmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras inferiores.} \end{split}$$

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

 $l_d \coloneqq \max\left(d_p, 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right)\right) = 144.3 \text{ cm}$

Largo de desarrollo en losa.

Se utilizará gancho en 90°.

$$l_{dh} \coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ mm}\right)$$

$$l_{dh} = 66.9 \ cm$$

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm					
No. 10 a No. 25	6 <i>d</i> _b					
No. 29 a No. 36	$8d_b$					

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 36 \, \boldsymbol{mm}$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max \left(\phi_{bn}, \phi_{bp} \right) = 28.8 \ \textit{cm}$

 $l_{ext} := 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp}) = 43.2 \ cm$

Largo de desarrollo en muro.



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

2.8. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

Condición de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} = 1829.47 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &:= 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} = 1189.16 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} = 1157.22 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &:= 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} = 752.19 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \end{split}$$

m

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{array}{c|c} P_{n_{j}} \coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{j} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k,j} \\ \phi_{j} \coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_{b} \\ & \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 2 \cdot P_{n_{j}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 2 \cdot P_{n_{j}} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.65 \cdot P_{b}}{2 \cdot P_{b}} \end{array} \right\| & \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 0.9 \\ \text{else} \\ \left\| \begin{array}{c} \phi_{j} \\ \phi_{j} \end{array} \right\| \\ \phi_{j} \end{array} \right\| \\ \phi_{j} \end{array} \right\|$$

Cargas Axiales

 $\phi P_{n_j}\!\coloneqq\!\phi_j\!\cdot\!P_{n_j}$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

Gráfico de Interacción y vectores.



3. DISEÑO A CORTE

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Solicitaciones.

$$d_p = 144.3 \text{ cm}$$
$$Vu \coloneqq 215 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$
$$\phi_c \coloneqq 0.75$$
$$Nu \coloneqq 1605 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Altura efectiva sección.

Solicitacion de corte a **d** del muro

Factor reducción corte.

Carga axial (si Nu >0 \rightarrow compression).

3.2. Corte Nominal Hormigón.

$$\begin{aligned} Vc_{sax} &\coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa \cdot d_p} \\ Vc_{sax} &\equiv 135.68 \ \frac{tonf}{m} \\ Vc_{comp} &\coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{14 \cdot h}\right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p \\ Vc_{comp} &\equiv 231.02 \ \frac{tonf}{m} \\ Vc_{trax} &\coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{3.5 \cdot h}\right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p \\ Vc_{trax} &\equiv 517.03 \ \frac{tonf}{m} \end{aligned}$$

• •

 $Vc \coloneqq Vc_{comp}$

. . . .

$$Vc = 231.02 \frac{tonf}{m}$$

. .

Corte nominal sin carga axial.

Corte nominal con carga axial en compresión.

Corte nominal con carga axial en tracción.

Corte nominal Efectivo.

3.3. Altura minima sección.

$$Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$$

$$d_{min} \coloneqq \left(\frac{Vu}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv 15.24 \text{ cm}$$

$$rev_{31} \coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''}$$

Altura mínima efectiva de la sección.

3.4. Corte Nominal Acero

_

$Vs_{min} \coloneqq \frac{Vu}{\phi_c} - Vc$	$Vs_{min} = 55.65 \; rac{tonf}{m}$	Corte nominal mínimo acero.
rev_{32} = "Requiere Vs"		
$\phi_{bc} \coloneqq 12 \ mm$		Diámetro estribo de acero .
$s_c \coloneqq 250 \ mm$		Espaciamiento
$n_{rc} \coloneqq \frac{2}{m}$		Número ramas por metro.
$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^2\right) \cdot n_{rc}$	$A_{vc} = 2.26 \ rac{cm^2}{m}$	Area estribo doble por1m trans.
$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_p}{s_c}$	$Vs = 55.92 \ \frac{tonf}{m}$	Corte Nominal Acero.
$rev_{32} \coloneqq \mathbf{if} \left(Vs > Vs_{min}, "Ok", "For the second second$	$\operatorname{Rediseñar}") = "Ok"$	

3.5. Corte Nominal Total

Vn-286.93 tonf
v n = 200.55 m
$\phi Vn = 215.2 \frac{tonf}{m}$

Corte Nominal reducido.

 $rev_{33}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\big(\phi Vn\!>\!Vu\,,\text{``Ok''}\,,\text{``Rediseñar''}\big)\!=\!\text{``Ok''}$

$$FU_c \coloneqq \frac{\phi Vn}{Vu} = 1.00$$

3.6 Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{aligned} rev_{34} &= \text{``Verificar armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &:= \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \\ 9.6.3.3. \text{ Av min corte} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 2.08 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &:= \text{if } \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &:= \text{if } \left(Vs_{min} > 0, \text{if } \left(Vs \le 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``Ok''} \end{aligned}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

 $s_{max} := min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$

$$rev_{37} \coloneqq if(Vs_{min} > 0, if(s_c < s_{max}, "Ok.", "Mod. s."), "-") = "Ok."$$

MURO SEGÚN ACI 318 - 14 Muro Lateral Túnel Rectangular

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

fy := 420 *MPa*

Es := 210000 *MPa*

$$\begin{array}{l} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.85 \\ \text{else if } f'c \geq 55 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.65 \\ \text{else} \\ \| 0.85 - \frac{0.05 \ (f'c - 28 \ \textbf{MPa})}{7 \ \textbf{MPa}} \\ \end{array} \right\|$$

1.2. Geometría.

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .



2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

2.1. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 74 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$
$$Mu_n \coloneqq 460 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Solicitación máxima positiva. Centro.

Solicitación máxima negativa. Apoyo.

Carga Axial y Momento en Centro del Muro (M+)

C1: C2: C3: C4: C5:	$\begin{array}{l} 1,2 \ D + 1,6 \ L + 1,6 \ H \\ 1,2 \ D + 1,0 \ L + 1,6 \ H \\ 1,2 \ D + 1,0 \ L + 0,9 \ H \\ 1,2 \ D + 1,0 \ L + 1,2 \ H + 1,4 \ E \\ 0,9 \ D + 1,2 \ H + 1,4 \ E \end{array}$	$Pu_1{\coloneqq} \Biggl[$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 272 \end{bmatrix}$	$\frac{tonf}{m}$	$Mu_1 \coloneqq$	$\begin{bmatrix} 0\\0\\0\\0\\74\end{bmatrix}$	$rac{tonf \cdot m}{m}$
C5:	0.9 D + 1.2 H + 1.4 E	l	272				74

Carga Axial y Momento en Apoyos Superior (M-)

C1: $1,2 D + 1,6 L + 1,6 H$ C2: $1,2 D + 1,0 L + 1,6 H$ C3: $1,2 D + 1,0 L + 0,9 H$ C4: $1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E$ C5: $0,9 D + 1,2 H + 1,4 E$	$Pu_{2} \coloneqq \begin{bmatrix} 472 \\ 395 \\ 384 \\ 398 \\ 210 \end{bmatrix} \frac{tonf}{m}$	$Mu_2 \coloneqq \begin{bmatrix} 460\\ 357\\ 353\\ 365\\ 148 \end{bmatrix} \frac{tonf \cdot m}{m}$
---	---	---

Carga Axial y Momento en Apoyos Inferior (M-)

C1: C2: C3: C4: C5:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H 1,2 D + 1,0 L + 1,6 H 1,2 D + 1,0 L + 0,9 H 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E 0.9 D + 1.2 H + 1.4 E	Pu_3 :=	613 540 435 494 321	$\frac{tonf}{m}$	Mu_3 :=	267 249 182 238 193	$rac{tonf \cdot m}{m}$
C5:	0,9 <i>D</i> + 1,2 <i>H</i> + 1,4 E		321			193	

2. Disposición Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

$$\phi_{bp_1} := 22 \ mm$$

 $\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 22 \ mm$
 $\phi_{bp_3} := \phi_{bp_1} = 22 \ mm$

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$\begin{split} s_{vp} &:= 65 \ \textit{mm} \\ s_{hp_1} &:= 150 \ \textit{mm} \\ s_{hp_2} &:= s_{hp_1} = 150 \ \textit{mm} \\ s_{hp_3} &:= s_{hp_1} = 150 \ \textit{mm} \\ s_{capp_1} &:= rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.1 \ \textit{cm} \\ s_{capp_2} &:= rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 10.45 \ \textit{cm} \\ s_{capp_3} &:= rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 14.8 \ \textit{cm} \end{split}$$

Diámetro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} \coloneqq 32 \text{ mm}$$

$$\phi_{bn_2} \coloneqq \phi_{bn_1} = 32 \text{ mm}$$

$$\phi_{bn_2} \coloneqq \phi_{bn_1} = 32 \text{ mm}$$

Diámetro de la barra principal. 1ra linea. Diámetro de la barra 2da linea. Diámetro de la barra 3ra linea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} := 65 \ mm$$

 $s_{hn_1} := 150 \ mm$
 $s_{hn_2} := s_{hn_1} = 150 \ mm$
 $s_{hn_3} := s_{hn_1} = 150 \ mm$
 $s_{capn_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.6 \ cm$
 $s_{capn_2} := rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 11.45 \ cm$
 $s_{capn_3} := rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 16.3 \ cm$
Número de capas.

 $n_p \coloneqq 1$ $n_n \coloneqq 2$

Altura efectivas sección.

$$\begin{split} d_{p} &:= h - s_{capp}_{n_{p}} = 133.9 \ \textit{cm} \\ \\ d_{p}' &:= h - s_{capn}_{n_{n}} = 128.55 \ \textit{cm} \end{split}$$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Número capas inferiores (M+) Número capas superiores (M-)

Altura efectiva hasta barras inferiores. Altura efectiva hasta barras superiores.

2.3. Cálculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 74 \ rac{tonf \cdot m}{m}$$

 $\phi_f \coloneqq 0.9$

Desarrollo

$$\begin{split} As_{p} &\coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 25.34 \frac{cm^{2}}{m} \\ a &\coloneqq \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.26 \ cm \\ Mn_{p} &\coloneqq As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 143.02 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 128.72 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ rev_{21} &\coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''} \\ FU &\coloneqq \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 1.74 \end{split}$$

Momento solicitante de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal negativo.

Momento nominal negativo reducido.

2.4. Cálculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

 $Mu_n = 460 \frac{tonf \cdot m}{m}$ Momento de diseño. $\phi_f = 0.9$

Desarrollo

$$\begin{split} As_{n} &\coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 107.23 \frac{cm^{2}}{m} \\ a &\coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 18.01 \ cm \\ Mn_{n} &\coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 549.02 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{n} &= 494.12 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ rev_{22} &\coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{n} > Mu_{n}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''} \end{split}$$

$$FU \coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_n}{Mu_n} = 1.07$$

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

Factor de utilización.

2.7. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión

 $\begin{aligned} As_{minf} &\coloneqq \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018\\ As_{minf} \cdot h &= 25.2 \ \frac{cm^2}{m}\\ rev_{21} &\coloneqq \mathbf{if} \left(As_n \geq As_{minf} \cdot h, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''}\right) = \text{``Ok.''} \end{aligned}$

 $rev_{22} \coloneqq if(As_p \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$

7.6.1. Armadura mínima losas en una dirección.24.4.3.2. Cuantía mínima de retracción y temperatura.

Cuantía mínima por cara.

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.

7.7.2.3 Separación mínima de flexión losas.

 $s_{max.f} \coloneqq min (3 \cdot h, 450 \ mm) = 450 \ mm$ Espaciamiento máximo. $rev_{25} \coloneqq if (max (s_{hp}) < s_{max.f}, "Ok", "Mod. s") = "Ok"$ $rev_{26} \coloneqq if (max (s_{hn}) < s_{max.f}, "Ok", "Mod. s") = "Ok"$

Distancia Libre entre Capas Horizontales

 $s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.2$ Distancia libre entre capas horizontales.

 $rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras inferiores.}$ $rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras superiores.}$

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $s_{hpmin} \coloneqq \max\left(25 \ \boldsymbol{mm}, \max\left(\phi_{bp}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \boldsymbol{mm}$

 $rev_{29} \coloneqq \mathbf{if}\left(min\left(s_{hp}\right) \! < \! s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''}\right) \! = \text{``Ok''}$

 $s_{hnmin} \coloneqq \max\left(25 \ \boldsymbol{mm}, \max\left(\phi_{bn}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \boldsymbol{mm}$

 $rev_{210} \coloneqq if(min(s_{hn}) < s_{hnmin}, "Mod. Svn", "Ok") = "Ok"$

Longitud Desarrollo Flexión

 $l_d := \max(d_p, 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp})) = 133.9 \ cm$

Se utilizará gancho en 90°.

$$\begin{split} l_{dh} &\coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ } mm\right) \\ l_{dh} &= 59.47 \text{ } cm \end{split}$$
 Largo de desarrollo e

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm				
No. 10 a No. 25	$6d_b$				
No. 29 a No. 36	$8d_b$				

$$\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 32 \, mm$$

$$D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 25.6 \ \textit{cm}$$

$$l_{ext} := 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp}) = 38.4 \ cm$$

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$ Distancia libre entre capas horizontales.

Tamaño nominal máximo del agregado grueso.

Revisión barras inferiores.

Revisión barras superiores.

Largo de desarrollo en muro.

7.7.3.3.

- ^{*}dh

Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.



 $d_{agg} \coloneqq 50 \ mm$

6. Diagrama de Interacción

Compresión Pura

$$P_{no} \coloneqq 0.8 \cdot (0.85 \cdot f'c \cdot (h - As_n) + As_n \cdot fy) \qquad P_{no} \equiv 3201.53 \frac{tonf}{m}$$

$$\phi P_{no} \coloneqq 0.65 \cdot P_{no} \qquad \phi P_{no} \equiv 2081 \frac{tonf}{m}$$

Condicion de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} = 1655.34 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &:= 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} = 1075.97 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} = 875.57 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &:= 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} = 569.12 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de "curva de interacción"

$$\begin{split} \phi_{j} &\coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.7 \cdot P_{b} \\ \| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.65 \cdot P_{b}}{2 \cdot P_{b}} \end{split} \qquad \phi_{j} &\coloneqq \text{if } \phi_{j} < 0.65 \\ \| 0.65 \\ \text{else if } \phi_{j} > 0.9 \\ \| 0.9 \\ \text{else} \\ \| \phi_{j} \\ \end{pmatrix} \qquad Factor de Reducción de Resistencia \end{aligned}$$

 \boldsymbol{m}

Cargas Axiales

$$\phi P_{n_j} \coloneqq \phi_j \boldsymbol{\cdot} P_{n_j}$$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

	9.33			1602.66			[326.5]			0.82
	18.67			2957.17			388.44			0.76
	28			4111.01			430.23			0.7
	37.33			5105.71			456.04			0.65
	46.67			6363.59			499.7			0.65
-	56			7637.73			534.63			0.65
	65.33			8911.87	LN		559.38	tonf.m		0.65
<i>c</i> _=	74.67	cm	$\phi P_{n_i} =$	10281.13	<u>101 N</u>	$\phi M_{n_i} =$	569.33		$\phi_{i} =$	0.65
J	84		Ĵ	11893.78	\boldsymbol{m}	Ĵ	555.73	\boldsymbol{m}	J	0.65
	93.33			13470.47			533.68			0.65
	102.67			14992.16			504.41			0.65
	112			16472.59			467.16			0.65
	121.33			17880.08			423.43			0.65
	130.67			19262.65			371.26			0.65
	140			20666.45			307.58			0.65



3. DISEÑO A CORTE FUERA DEL PLANO.

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Geometría.



3.2. Solicitaciones.



3.3. Corte Nominal Hormigón.

 $\begin{aligned} Vc_{sax} &\coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \cdot d_p \\ Vc_{sax} &\equiv 125.9 \ \frac{tonf}{m} \\ Vc_{comp} &\coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{14 \cdot h \cdot b} \right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p \\ Vc_{comp} &\equiv 156.7 \ \frac{tonf}{m} \\ Vc_{trax} &\coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{3.5 \cdot h \cdot b} \right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p \\ Vc_{trax} &\equiv 249.12 \ \frac{tonf}{m} \end{aligned}$

 $Vc \coloneqq Vc_{comp}$

$$Vc = 156.7 \frac{tonf}{m}$$

Corte a dx de la losa.

Factor reducción corte.

Carga axial (si Nu >0 \rightarrow compression).

Corte nominal sin carga axial.

Corte nominal con carga axial en compresión.

Corte nominal con carga axial en tracción.

Corte nominal Efectivo.

3.4. Altura mínima sección.

$$Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$$

$$d_{min} \coloneqq \left(\frac{V_u}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv 9.3 \text{ cm}$$

$$rev_{31} \coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''}$$

Altura mínima efectiva de la sección.

3.5. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{V_u}{\phi_c} - Vc = 33.96 \frac{tonf}{m}$$

 rev_{32} = "Requiere Vs"

$$\phi_{bc} \coloneqq 12 \ \textbf{mm}$$

$$s_{c} \coloneqq 250 \ \textbf{mm}$$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{2}{m}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^{2}\right) \cdot n_{rc} = 2.26 \ \frac{cm^{2}}{m}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_{p}}{s_{c}} = 51.89 \ \frac{tonf}{m}$$

Corte nominal mínimo acero.

Diámetro estribo de acero.

Espaciamiento

Número ramas por metro.

Área estribo por metro.

Corte Nominal Acero.

$rev_{32}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!V\!s\!\!>\!\!V\!s_{\!m\!i\!n}, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}\!\right)\!=\!\text{``Ok''}$

3.6. Corte Nominal Total

$$Vn \coloneqq Vc + Vs \qquad Vn \equiv 208.59 \frac{tonf}{m}$$

$$\phi Vn \coloneqq \phi_c \cdot Vn \qquad \phi Vn \equiv 156.44 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal reducido.}$$

$$rev_{33} \coloneqq \text{if} (\phi Vn > V_u, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}) \equiv \text{``Ok''}$$

$$FU_c \coloneqq \frac{\phi Vn}{V_u} \equiv 1.09$$

3.6. Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{aligned} rev_{34} &= \text{``Verificar armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &\coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \end{aligned} 9.6.3.3. \text{ Av minima de corte.} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 2.08 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &\coloneqq \text{if } \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok'''} \\ rev_{36} &\coloneqq \text{if } \left(Vs_{min} > 0, \text{if } \left(Vs \le 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``Ok'''} \end{aligned}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

$$\begin{split} s_{max} &\coloneqq \min \left(450 \ \textit{mm}, 3 \ h \right) \!=\! 450 \ \textit{mm} \\ rev_{37} &\coloneqq \mathbf{if} \left(Vs_{min} \!>\! 0, \mathbf{if} \left(s_c \!<\! s_{max}, \text{``Ok.''}, \text{``Mod. s.''} \right), \text{``-''} \right) \!= \text{``Ok.''} \end{split}$$

3.7. Malla Longitudinal.



160

LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Losa Inferior Túnel Rectangular

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

fy := 420 *MPa*

$$\begin{array}{l} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \; \textit{MPa} \\ & \parallel 0.85 \\ & \text{else if } f'c \geq 55 \; \textit{MPa} \\ & \parallel 0.65 \\ & \text{else} \\ & \parallel 0.85 - \frac{0.05 \; (f'c - 28 \; \textit{MPa})}{7 \; \textit{MPa}} \end{array} = 0.84$$

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

1.2. Geometría.



Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

<i>h</i> :=180 <i>cm</i>	Altura losa.
<i>b</i> := 100 <i>cm</i>	Ancho losa.
<i>rec</i> := 5 <i>cm</i>	Recubrimiento.
$Aslat \coloneqq 0 \ \frac{cm^2}{m}$	Refuerzo superficial.

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

2.1. Solicitaciones

 $Mu_p \coloneqq 801 \frac{\textit{tonf} \cdot m}{m}$ $Mu_n \coloneqq 128 \frac{\textit{tonf} \cdot m}{m}$

Solicitación máxima negativa. Centro

Solicitación máxima positiva. Apoyos.

Carga Axial y Momento en Apoyos de la Losa

C1:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H	[1	186]			$\left[\begin{array}{c} 38 \end{array}\right]$	
C2:	1,2 D + 1,0 L + 1,6 H	1	187	4 6		60	tonfm
C3:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H	$Pu_1 \coloneqq$	98	tonj	$Mu_1 \coloneqq$	0	$tonj \cdot m$
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E	1	140	m	-	71	\boldsymbol{m}
C5:	0,9 <i>D</i> + 1,2 <i>H</i> + 1,4 E	[1	158			128	

Carga Axial y Momento en Centro de la Losa

C1:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H	[180			801	
C2:	1,2D + 1,0L + 1,0H	D	185	tonf	7.4	703	$tonf \cdot m$
CA:	1,2D + 1,0L + 0,9H 1,2D + 1,0L + 1,2H + 1,4F	$Pu_2 \coloneqq$	94	\overline{m}	$Mu_2 \coloneqq$	579 664	
C5:	1,2D + 1,0L + 1,2H + 1,4L 0.9D + 1.2H + 1.4E		$150 \\ 154$			$\frac{004}{426}$	

2.2. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Superiores. (M-)

$\phi_{bp_1} = 36 \ mm$	
$\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 36$	i mm
$\phi_{bp_3} = \phi_{bp_1} = 36$	5 mm
$\phi_{bp_4} \coloneqq \phi_{bp_1} \equiv 36$	i mm

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Diámetro de la barra 4ta linea.

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_4} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.8 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 11.85 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 16.9 \text{ cm}$$

$$s_{capp_4} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{3 \cdot s_{vp}}{2} + \phi_{bp_2} = 21.95 \text{ cm}$$

Diámetro Barras Inferiores.(M+)

$$\phi_{bn_1} := 28 \text{ mm}$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 28 \text{ mm}$
 $\phi_{bn_3} := \phi_{bn_1} = 28 \text{ mm}$

Espaciamiento Barras Inferiores. (M+)

 $s_{vn} := 65 mm$ $s_{hn_1} := 175 mm$ $s_{hn_2} := s_{hn_1} = 175 mm$ $s_{hn_3} := s_{hn_1} = 175 mm$ Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Separación entre barras refuerzo 4ta línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Distancia desde CG a borde de Capa 4.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea.

$$\begin{split} s_{capn_1} &\coloneqq rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.4 \ \textit{cm} \\ s_{capn_2} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 11.05 \ \textit{cm} \\ s_{capn_3} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 15.7 \ \textit{cm} \end{split}$$
 Distancia desde CG a borde de Capa 2.
Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Número de capas.

$$n_p \coloneqq 2$$
Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$d_p \coloneqq h - s_{capp}_{n_p} = 168.15 \ \textit{cm}$	Altura efectiva hasta barras inferiores.
$d_p' \coloneqq h - s_{capn_{n_p}} = 173.6$ cm	Altura efectiva hasta barras superiores

2.3. Cálculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

 $Mu_p \!=\! 801 \; \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$ $\phi_f\!\coloneqq\!0.9$

Desarrollo

$$As_{p} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 135.72 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 22.79 \ cm$$

$$Mn_{p} \coloneqq As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 911.13 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{p} = 820.01 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$rev_{21} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñan} \right)$$

Momento solicitante de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal negativo.

Momento nominal negativo reducido.

tor de utilización.

2.4. Cálculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_n = 128 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f := 0.9$$

Desarrollo

$$As_{n} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 35.19 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 5.91 \ cm$$

$$Mn_{n} \coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p'} - \frac{a}{2} \right) = 257.15 \ \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{n} = 231.44 \ \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{n} > Mu_{n}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right)$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_f \cdot Mn_n > Mu_n, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$

 $FU \coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_n}{Mu_n} = 1.81$ Factor de utilización.

2.5. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.7.6.1. Armadura mínima losas en
una dirección. $As_{minf} := \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$ 24.4.3.2. Cuantía mínima de
retracción y temperatura. $As_{minf} \cdot h = 32.4 \frac{cm^2}{m}$ Cuantía mínima por cara. $rev_{23} := if (As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.	7.7.2.3 Separación mínima de flexión losas.
$s_{max.f} \coloneqq min(3 \cdot h, 450 \ mm) = 450 \ mm$	
$rev_{25} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hp} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	"
$rev_{26} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hn} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	22

Distancia Libre entre Capas Horizontales

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.2$ Distancia libre entre capas horizontales.

$s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

$rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras inferiores.
$rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras superiores.

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$ Distancia libre entre capas horizontales.

$$\begin{split} & d_{agg} \coloneqq 50 \ \textit{mm} \\ & \text{Tamaño nominal máximo del agregado grueso.} \\ & s_{hpmin} \coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bp} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \\ & rev_{29} \coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hp} \right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \\ & \text{Revisión barras inferiores.} \\ & s_{hnmin} \coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bn} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \end{split}$$

 $rev_{210} \coloneqq if(min(s_{hn}) < s_{hnmin}, "Mod. Svn", "Ok") = "Ok"$ Revisión barras superiores.

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

$$l_d \coloneqq \max\left(d_p, 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right)\right) = 168.15 \text{ cm}$$

Largo de desarrollo en losa.

Se utilizará gancho en 90°.

$$l_{dh} \coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ } mm\right)$$
$$l_{dh} = 66.9 \text{ } cm$$
Largo de desarro

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm
No. 10 a No. 25	$6d_b$
No. 29 a No. 36	$8d_b$

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 36 \, \boldsymbol{mm}$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 28.8 \ \boldsymbol{cm}$

 $l_{ext} := 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp}) = 43.2 \ cm$

ollo en muro.



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

2.8. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

$$\begin{aligned} A_{st} &:= As_p + As_n = 170.9 \ \frac{cm^2}{m} \\ P_{no} &:= 0.80 \cdot (0.85 \cdot f'c \cdot (h - A_{st}) + A_{st} \cdot fy) \\ \phi P_{no} &:= 0.65 \cdot P_{no} \end{aligned} \qquad P_{no} = 2744.75 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{no} &= 2744.75 \ \frac{tonf}{m} \end{aligned}$$

Condición de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} = 1791.81 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &:= 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} = 1164.68 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} = 1493.68 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &:= 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} = 970.89 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{split} P_{n_{j}} \coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{j} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k,j} \\ \phi_{j} \coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_{b} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.65 \cdot P_{b}}{2 \cdot P_{b}} \\ \end{matrix} \right\|$$

de

Cargas Axiales

 $\phi P_{n_j} \! \coloneqq \! \phi_j \! \cdot \! P_{n_j}$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

Gráfico de Interacción y vectores.


3. DISEÑO A CORTE

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Solicitaciones.

$$d_p = 168.15 \ cm$$

 $Vu := 253 \ \frac{tonf}{m}$
 $\phi_c := 0.75$

Nu := 201 *tonf*

Altura efectiva sección.

Solicitación de Corte a dp de muro.

Factor reducción corte.

Carga axial (si Nu >0 \rightarrow compression).

3.2. Corte Nominal Hormigón.

$$\begin{aligned} Vc_{sax} &\coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa \cdot d_p} \\ Vc_{sax} &= 158.11 \ \frac{tonf}{m} \\ Vc_{comp} &\coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{14 \cdot h \cdot b} \right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p \\ Vc_{comp} &= 170.47 \ \frac{tonf}{m} \\ Vc_{trax} &\coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{3.5 \cdot h \cdot b} \right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p \\ Vc_{trax} &\equiv 207.57 \ \frac{tonf}{m} \end{aligned}$$

 $Vc \coloneqq Vc_{comp}$

$$Vc = 170.47 \frac{tonf}{m}$$

Corte nominal sin carga axial.

Corte nominal con carga axial en compresión.

Corte nominal con carga axial en tracción.

Corte nominal Efectivo.

3.3. Altura mínima sección.

$$Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$$

$$d_{min} \coloneqq \left(\frac{Vu}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv 45.71 \text{ cm}$$

$$rev_{31} \coloneqq if \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''}$$

Altura mínima efectiva de la sección.

3.4. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{Vu}{\phi_c} - Vc \qquad Vs_{min} = 166.86 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte nominal minimo acero.}$$

$$rev_{32} = \text{``Requiere Vs''}$$

$$\phi_{bc} \coloneqq 12 \text{ mm} \qquad \text{Diámetro estribo de acero .}$$

$$s_c \coloneqq 150 \text{ mm} \qquad \text{Espaciamiento}$$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{3}{m} \qquad \text{Número ramas por metro.}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^2\right) \cdot n_{rc} \qquad A_{vc} \equiv 3.39 \frac{cm^2}{m} \qquad \text{Área estribo por metro.}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_p}{s_c} \qquad Vs \equiv 162.9 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal Acero.}$$

 $rev_{33}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!Vs\!>\!Vs_{min}, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}\!\right)\!=\!\text{``Rediseñar''}$

3.5. Corte Nominal Total

$$Vn \coloneqq Vc + Vs \qquad Vn = 333.37 \frac{tonf}{m}$$

$$\phi Vn \coloneqq \phi_c \cdot Vn \qquad \phi Vn = 250.03 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal reducido.}$$

 $rev_{33}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\big(\phi Vn\!>\!Vu\,,\text{``Ok''},\text{``Rediseñar''}\big)\!=\!\text{``Rediseñar''}$

$$FU_c \coloneqq \frac{\phi Vn}{Vu} = 0.99$$

3.6 Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{aligned} rev_{34} &= \text{``Verificar armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &:= \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \quad 9.6.3.3. \text{ Av minima de corte.} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 1.25 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &:= \text{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &:= \text{if} \left(Vs_{min} > 0, \text{if} \left(Vs \le 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``Ok''} \end{aligned}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

 $s_{max} := min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$

$$rev_{37} := if(Vs_{min} > 0, if(s_c < s_{max}, "Ok.", "Mod. s."), "-") = "Ok."$$

CONSOLA SEGÚN ACI 318 - 14

Losa Superior Borde Corte Túnel Rectangular

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

$f'c \coloneqq 300 \ \frac{kgf}{cm^2}$	Resistencia a compresión del hormigón.
$Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$	Módulo de elasticidad del hormigón.
$f_y \coloneqq 420 \ \boldsymbol{MPa}$	Resistencia a fluencia del acero.

1.2. Geometría.

1.2. Geometría.		• <u></u> ••
		Nuc Vu $\phi A_{ec} f_{v}$
$h \coloneqq 160 \ cm$	Altura de la consola.	≥ 0.5d
$b \coloneqq 1 m$	Ancho consola.	
$a_v \! \coloneqq \! 1 {oldsymbol m}$	Luz cortante en la consola.	Puntal de compresión
<i>rec</i> := 5 <i>cm</i>	Recubrimiento.	
$\phi_{b1} \coloneqq 32 \ mm$	Diámetro barra a tracción.	
$n_v \coloneqq 2$	Número de capas de barras a tracción.	
s_{bv1} :=150 mm	Separación vertical de capas.	
$d\!\coloneqq\!h\!-\!rec\!-\!\phi_{b1}\!-\!\frac{s_{bv1}}{2}$	Altura efectiva.	
d = 1.44 m		
$rev_1 \coloneqq \mathbf{if} \left(\frac{a_v}{d} < 1, \text{``Ok.''}, \text{``Mot} \right)$	$\operatorname{odificar."} = \operatorname{"Ok."}$	Relación diseño consola.

1.3. Solicitaciones.

$$V_u \coloneqq 337 \frac{tonf}{m}$$
Carga máxima de corte sobre consola. $N_{uc} \coloneqq -211 \frac{tonf}{m}$ Fuerza horizontal de tracción. $rev_1 \coloneqq if (V_u \ge N_{uc} \ge 0.2 \cdot V_u, "Ok", "Modificar") = "Modificar"Fuerza horizontal de tracción. $N_{uc} \coloneqq 0.2 \cdot V_u$ $N_{uc} = 67.4 \frac{tonf}{m}$ (como se encuentra en compresión, se diseño para capacidad minima) $M_u \coloneqq V_u \cdot a_v + N_{uc} \cdot (h-d)$ $M_u \equiv 347.58 \frac{tonf \cdot m}{m}$ Momento sobre consola. $\phi_c \coloneqq 0.75$ Factor de reducción de corte. $\phi_n \coloneqq 0.90$ Factor de reducción axial. $\phi_m \coloneqq 0.90$ Factor de reducción de momento. $V_n \coloneqq min (0.2 \cdot f'c \cdot d, (3.3 MPa + 0.08 \cdot f'c) \cdot d, 11 \cdot d \cdot MPa)$ Corte nominal. $\phi_v \coloneqq \phi_c \cdot V_n = 623.92 \frac{tonf}{m}$ Corte nominal reducido.$

$$rev_2 \coloneqq if(\phi V_n > V_u, "Ok.", "Modificar.") = "Ok."$$

1.4. Requerimientos de Diseño.

$$A_n \coloneqq \frac{N_{uc}}{\phi_n \cdot f_y} \qquad \qquad A_n = 17.49 \ \frac{cm^2}{m}$$

$$\mu \coloneqq 1.4$$

$$A_{vf} \coloneqq \frac{V_u}{\phi_c \cdot f_y \cdot \mu}$$

$$A_f \coloneqq \frac{M_u}{\phi_m \cdot f_y \cdot 0.9 \cdot d}$$

$$A_f = 69.43 \frac{cm^2}{m}$$

$$A_{sc} \coloneqq \max \left(A_f + A_n, \frac{2 \cdot A_{vf}}{3} + A_n, 0.04 \cdot \left(\frac{f'c}{f_y} \right) \cdot d \right)$$

$$A_{sc} = 86.92 \frac{cm^2}{m}$$

Área mínima de tracción.(16.5.4.3)

Coeficiente de fricción. Concreto construido monolíticamente Área mínima de corte. (16.5.4.4)

Área mínima de refuerzo de momento.

Área refuerzo principal a tracción.

$$rev_{3} = "Controla (b)"$$

$$A_{sc} = 86.92 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$A_{h} := 0.5 \cdot (A_{sc} - A_{n})$$

$$A_{h} = 34.72 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$A_{tot} := A_{sc} + A_{h}$$

$$A_{tot} = 121.64 \frac{cm^{2}}{m}$$

Caso que controla Asc.

Refuerzo principal a tracción.

Área total estribos.

Área total acero en el plano de corte.

 $rev_4\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!A_{sc}\!\geq\!\!A_{sc}, \text{``Ok.''}, \text{``Modificar.''}\!\right)\!=\!\text{``Ok.''}$

- 1.5. Acero a Tracción.
- $A_{sc} = 86.92 \ \frac{cm^2}{m}$

 $\phi_{b1} = 32 \, \mathbf{mm}$

 $s_{bh1}\!\coloneqq\!175~\pmb{mm}$

 $s_{bv1}\!=\!150~\textit{mm}$

 $n_v = 2$

$$A_{scf} \coloneqq n_v \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{b1}^2}{4} \cdot \left(\frac{1}{s_{bh1}}\right) \qquad A_{scf} \equiv 91.91 \frac{cm^2}{m}$$
$$rev_5 \coloneqq \mathbf{if} \left(A_{scf} > A_{sc}, \text{``Ok.''}, \text{``Modificar.''}\right) = \text{``Ok.''}$$

Área minima requerida.

Diámetro barra a tracción.

Separación horizontal.

Separación vertical de capas.

Número de capas de barras a tracción. Área dispuesta.

1.6. Acero en Estribos.

 $A_h = 34.72 \ \frac{cm^2}{m}$ Área mínima requerida. $h \coloneqq \frac{2}{3} \cdot d = 96.2 \ cm$ Altura de consola. $\phi_{b2} \coloneqq 12 \ mm$ Diámetro barra de estribo. $s_{bh} \coloneqq 175 \ mm$ Separación horizontal. $s_{bv} \coloneqq 175 \ mm$ Separación vertical. $\pi \cdot \phi_{b2}^2$ (1)



Área dispuesta.

$$A_{hf} \coloneqq \frac{n \cdot \varphi_{b2}}{4} \cdot \left(\frac{1}{s_{bh}}\right) \cdot \frac{n}{s_{bv}} = 35.53 \frac{cm}{m}$$
$$rev_6 \coloneqq \mathbf{if} \left(A_{hf} > A_h, \text{``Ok.''}, \text{``Modificar.''}\right) = \text{``Ok.''}$$

1.7. Verificaciones.



Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.

7.7.2.3 Separación mínima flexión losas.

 $s_{max.f} \coloneqq min(3 \cdot h, 450 \ mm) = 450 \ mm$ $rev_{25} \coloneqq \mathbf{if}(s_{bh1} < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''}) = \text{``Ok''}$

Distancia Libre entre Capas Horizontales

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.2$ Distancia libre entre capas horizontales.

 $s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

 $rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{bv1} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$

Espaciamiento Mínimo Estribos

 $s_{max} := min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$

 $s_{bh} = 175 \ mm$

 $s_{bv} = 0.18 \ m$

 $rev_{37} \coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{bh}, s_{bv} \right) < s_{max}, "Ok.", "Mod. s." \right) = "Ok."$

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

 $l_d \coloneqq \max(d, 12 \cdot \phi_{b1}) = 144.3 \ cm$

Se utilizará gancho en 90°.

$$\begin{split} l_{dh} \coloneqq \max & \left(\frac{0.24 \cdot f_y}{\sqrt{f' c \cdot MPa}} \cdot \phi_{b1}, 8 \cdot \phi_{b1}, 150 \ \textit{mm} \right) \\ l_{dh} = 59.47 \ \textit{cm} \end{split}$$

Largo de desarrollo en losa.

Largo de desarrollo en muro.



 $D_b := 8 \cdot \phi_{b1} = 25.6 \ cm$

$$l_{ext} := 12 \cdot \phi_{b1} = 38.4$$
 cm



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Losa Superior Transversal Túnel Rectangular

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$ fy := 420 MPa

Es := 210000 *MPa*

$$\begin{array}{l} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.85 \\ \text{else if } f'c \geq 55 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.65 \\ \text{else} \\ \| 0.85 - \frac{0.05 \ (f'c - 28 \ \textbf{MPa})}{7 \ \textbf{MPa}} \\ \end{array} \right\|$$

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

2.1. Geometría.



 $b \coloneqq 100 \ \mathbf{cm}$

rec := 5 *cm*

$$Aslat \coloneqq 0 \frac{cm^2}{m}$$

2

Altura Losa
Ancho losa
Recubrimiento



2.2. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 105 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$
$$Mu_n \coloneqq 125 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Carga Axial y Momento Positiva.

C1: 1,2 D + 1,6 L + 1,6 HC2: 1,2 D + 1,0 L + 1,6 HC3: 1,2 D + 1,0 L + 0,9 HC4: 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 EC5: 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E

Carga Axial y Momento Negativa.

C2: $1,2 D + 1,0 L + 1,6 H$	
C3: $1,2 D + 1,0 L + 0,9 H$	
C4: $1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1$,4 E
C5: 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E	

2.3. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

$\phi_{bp_1} = 25 \ mm$	
$\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 25$	5 mm
$\phi_{bp_3} = \phi_{bp_1} = 25$	5 mm

Solicitación máxima positiva.

Solicitación máxima negativa.

	2100		$\left[105\right]$	
	1900	tonf	74	tonf.m
$Pu_1 \coloneqq$	1135		81	
	1495	m	93	\boldsymbol{m}
	250		78	

$Pu_2 \coloneqq \begin{bmatrix} 575 \\ 778 \\ 428 \\ 610 \\ 997 \end{bmatrix}$	$rac{tonf}{m}$	$Mu_2 \coloneqq$	$125 \\ 125 \\ 63 \\ 100 \\ 96$	$rac{tonf \cdot m}{m}$
--	-----------------	------------------	---------------------------------	-------------------------

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.25 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 10.75 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 15.25 \text{ cm}$$

Diametro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} := 25 \text{ mm}$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 25 \text{ mm}$
 $\phi_{bn_3} := \phi_{bn_1} = 25 \text{ mm}$

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} := 05 \text{ mm}$$

$$s_{hn_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_2} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_3} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capn_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.25 \text{ cm}$$

$$s_{capn_2} := rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 10.75 \text{ cm}$$

$$s_{capn_3} := rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 15.25 \text{ cm}$$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Numero de capas.

$$n_p \coloneqq 1$$
Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$$d_p := h - s_{capp}_{n_p} = 153.75 \ cm$$
 Altura efectiva hasta barras inferiores.
 $d_p' := h - s_{capn}_{n_p} = 153.75 \ cm$ Altura efectiva hasta barras superiores.

2.4. Calculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 105 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
 Momento solicitante de diseño.
 $\phi_f \coloneqq 0.9$ Factor de reducción de flexión.

Desarrollo

$$\begin{split} As_{p} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 32.72 \frac{cm^{2}}{m} & \text{ Area de refuerzo a flexión.} \\ a &:= \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 5.5 \ cm \\ Mn_{p} &:= As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 211.64 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Momento nominal negativo.} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 190.47 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Momento nominal negativo reducido.} \\ rev_{21} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.'''} \\ FU &:= \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 1.81 & \text{Factor de utilización.} \end{split}$$

2.5. Calculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 125 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

m

$$\begin{aligned} As_{n} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 32.72 \frac{cm^{2}}{m} \\ a &:= \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 5.5 \ cm \\ Mn_{n} &:= As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 211.64 \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{n} &= 190.47 \frac{tonf \cdot m}{m} \\ rev_{22} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{n} > Mu_{n}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) \end{aligned}$$

Factor de reducción de flexión.

Momento de diseño.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

2.7. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.

$$As_{minf} := \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$$
$$As_{minf} \cdot h = 28.8 \frac{cm^2}{m}$$

7.6.1. Armadura mínima losas en una dirección.24.4.3.2. Cuantía mínima de retracción y temperatura.

Cuantía mínima por cara.

$$rev_{23} \coloneqq if(As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$$

 $rev_{24} \! \coloneqq \! \mathbf{if} \left(\! As_p \! \geq \! As_{\! minf} \! \cdot \! h \,, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) \! = \text{``Ok.''}$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.

7.7.2.3 Separación mínima flexión losas.

$$s_{max.f} \coloneqq min (3 \cdot h, 450 \text{ mm}) = 450 \text{ mm}$$
$$rev_{25} \coloneqq \text{if} (max (s_{hp}) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''}) = \text{``Ok''}$$
$$rev_{26} \coloneqq \text{if} (max (s_{hn}) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''}) = \text{``Ok''}$$

Distancia Libre entre Capas Horizontales

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.2$ Distancia libre entre capas horizontales.

$s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

 $d_{aaa} \coloneqq 50 \ mm$

 $rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$ Revisión barras superiores. $rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$ Revisión barras inferiores.

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$ Distancia libre entre capas horizontales.

Tamaño nominal máximo del agregado grueso.

$$s_{hpmin} \coloneqq \max\left(25 \ \textbf{mm}, \max\left(\phi_{bp}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \textbf{mm}$$

$$rev_{29} \coloneqq \mathbf{if}\left(\min\left(s_{hp}\right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''}\right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras superiores.}$$

$$s_{hnmin} \coloneqq \max\left(25 \ \textbf{mm}, \max\left(\phi_{bn}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \textbf{mm}$$

$$rev_{210} \coloneqq \mathbf{if}\left(\min\left(s_{hn}\right) < s_{hnmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''}\right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras inferiores.}$$

184

Longitud Desarrollo Flexión

 $l_d \coloneqq \max\left(d_p, 12 \boldsymbol{\cdot} \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right)\right) = 153.75 \ \textit{cm}$

Se utilizará gancho en 90°.

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm	
No. 10 a No. 25	$6d_b$	
No. 29 a No. 36	8 <i>d</i> _b	

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 25 \, mm$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max \left(\phi_{bn}, \phi_{bp} \right) = 20 \ \boldsymbol{cm}$

 $l_{ext} \coloneqq 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 30 \ cm$

Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.



Largo de desarrollo en losa.



7.7.3.3.

2.8. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

$$\begin{aligned} A_{st} &:= As_{p} + As_{n} = 65.45 \frac{cm^{2}}{m} \\ P_{no} &:= 0.80 \cdot (0.85 \cdot f'c \cdot (h - A_{st}) + A_{st} \cdot fy) \\ \phi P_{no} &:= 0.65 \cdot P_{no} \end{aligned} \qquad \qquad P_{no} = 3474.9 \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{no} &= 2258.68 \frac{tonf}{m} \end{aligned}$$

Condición de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} = 1887 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &:= 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} = 1226.55 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} = 1011.95 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &:= 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} = 657.77 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{split} P_{n_j} \coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_j + \sum_{k=1}^n A_k \cdot fs_{k,j} \\ \phi_j \coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_b \\ \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 2 \cdot P_{n_j} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 2 \cdot P_{n_j} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_j}} \\ 1 + \frac{0.65 \cdot P_b}{1 + \frac{p_j}{2 \cdot P_{n_j}}} \end{array} \right\| \left\| \phi_j \\ 0.9$$

Cargas Axiales

 $\phi P_{n_j} \! \coloneqq \! \phi_j \! \cdot \! P_{n_j}$

 $\begin{array}{l} \textbf{Momentos} \\ \phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right) \end{array}$

Gráfico de Interacción y vectores.



3. DISEÑO A CORTE

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Solicitaciones.

$$d_p = 153.75 \text{ cm}$$
$$Vu \coloneqq 165 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$
$$\phi_c \coloneqq 0.75$$

3.2. Corte Nominal Hormigón.

$$Vc \coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa \cdot d_p}$$

$$Vc = 144.57 \frac{tonf}{m}$$
Corte nominal sin carga axial.

Altura efectiva sección.

Factor reducción corte.

Solicitacion de corte a **d** del muro.

3.3. Altura mínima sección.

$$\begin{split} Vcx &\coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \\ d_{min} &\coloneqq \left(\frac{Vu}{\phi_c} - Vc \right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} = 20.66 \ \textit{cm} \qquad \text{Altura mínima efectiva de la sección.} \\ rev_{31} &\coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \leq d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''} \right) = \text{``Ok''} \end{split}$$

3.4. Corte Nominal Acero

$Vs_{min} \coloneqq \frac{Vu}{\phi_c} - Vc = 75.43 \frac{tonf}{m}$	Corte nominal mínimo acero.
rev_{32} = "Requiere Vs"	
$\phi_{bc} \! \coloneqq \! 12 {m mm}$	Diámetro estribo de acero .
$s_c \coloneqq 250 \ mm$	Espaciamiento
$n_{rc} \coloneqq \frac{3}{m}$	Número ramas por metro.

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^{2}\right) \cdot n_{rc} = 3.39 \frac{cm^{2}}{m}$$
Area estribo
$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_{p}}{s_{c}} = 89.37 \frac{tonf}{m}$$
Corte Nomir

doble por1m trans.

nal Acero.

 $rev_{32}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!Vs\!>\!Vs_{min}, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}\!\right)\!=\!\text{``Ok''}$

3.5. Corte Nominal Total

 $Vn \coloneqq Vc + Vs \qquad Vn = 233.93 \frac{tonf}{m}$ $\phi Vn \coloneqq \phi_c \cdot Vn \qquad \phi Vn = 175.45 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal reducido.}$ $rev_{33} \coloneqq if(\phi Vn > Vu, "Ok", "Rediseñar") = "Ok"$ dVn

$$FU_c \coloneqq \frac{\phi v n}{V u} = 1.06$$

3.6 Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{aligned} rev_{34} &= \text{``Verificar armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &\coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \end{aligned} \qquad 9.6.3.3. \text{ Av min corte} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 2.08 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &\coloneqq \text{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &\coloneqq \text{if} \left(Vs_{min} > 0, \text{if} \left(Vs \leq 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``Ok''} \end{aligned}$$

Espaciamiento mínimo

$$s_{max} := min (450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$$
$$rev_{37} := if (Vs_{min} > 0, if (s_c < s_{max}, "Ok.", "Mod. s."), "-") = "Ok."$$

MURO SEGÚN ACI 318 - 14 Muro Transversal Túnel Rectangular

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

fy := 420 *MPa*

 $Es \coloneqq 210000 \ MPa$

$$\begin{array}{c|c} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \ \textbf{MPa} \\ & \parallel 0.85 \\ \text{else if } f'c \geq 55 \ \textbf{MPa} \\ & \parallel 0.65 \\ \text{else} \\ & \parallel 0.85 - \frac{0.05 \ (f'c - 28 \ \textbf{MPa})}{7 \ \textbf{MPa}} \end{array} \end{vmatrix} = 0.84$$

1.2. Geometría.

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .



2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

2.1. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 195 \frac{\textit{tonf} \cdot m}{m}$$
$$Mu_n \coloneqq 119 \frac{\textit{tonf} \cdot m}{m}$$

Solicitación máxima positiva.

Solicitación máxima negativa.

360

481

335

520

 $Pu_1 \coloneqq 240$

tonf

 \boldsymbol{m}

195

185

184

159

 $Mu_1 \coloneqq 125$

ton

 \boldsymbol{m}

•*m*

Carga Axial y Momento Positiva.

C1:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H
C2:	1,2 D + 1,0 L + 1,6 H
C3:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E
C5:	0,9 <i>D</i> + 1,2 <i>H</i> + 1,4 E

Carga Axial y Momento Negativa.

C1:	1,2 <i>D</i> + 1,6 <i>L</i> + 1,6 <i>H</i>	
C2:	1,2 <i>D</i> + 1,0 <i>L</i> + 1,6 <i>H</i>	
C3:	1,2 <i>D</i> + 1,0 <i>L</i> + 0,9 <i>H</i>	
C4:	1,2 <i>D</i> + 1,0 <i>L</i> + 1,2 <i>H</i> + 1,4 <i>E</i>	
C5:	0,9 <i>D</i> + 1,2 <i>H</i> + 1,4 E	

$Pu_2 \coloneqq \begin{bmatrix} 152\\60\\81\\111\\25 \end{bmatrix} \frac{tonf}{m}$	$Mu_2 \coloneqq \begin{bmatrix} 84\\ 95\\ 40\\ 99\\ 110 \end{bmatrix}$	$\left rac{tonf \cdot m}{m} ight $
--	--	---------------------------------------

2. Disposición Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

 $\phi_{bp_1} := 32 \text{ mm}$ $\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 32 \text{ mm}$ $\phi_{bp_3} := \phi_{bp_1} = 32 \text{ mm}$ Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 200 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 200 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 200 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.6 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 11.45 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 16.3 \text{ cm}$$

Diámetro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} := 28 \ mm$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 28 \ mm$
 $\phi_{bn_3} := \phi_{bn_1} = 28 \ mm$

CF

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} \coloneqq 63 \text{ mm}$$

$$s_{hn_1} \coloneqq 200 \text{ mm}$$

$$s_{hn_2} \coloneqq s_{hn_1} = 200 \text{ mm}$$

$$s_{hn_3} \coloneqq s_{hn_1} = 200 \text{ mm}$$

$$s_{capn_1} \coloneqq rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.4 \text{ cm}$$

$$s_{capn_2} \coloneqq rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 11.05 \text{ cm}$$

$$s_{capn_3} \coloneqq rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 15.7 \text{ cm}$$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Número de capas.

$$n_p \coloneqq 1$$
Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$$d_p := h - s_{capp}_{n_p} = 133.4 \ cm$$
 Altura efectiva hasta barras inferiores.
 $d_p' := h - s_{capn}_{n_p} = 133.6 \ cm$ Altura efectiva hasta barras superiores.

2.3. Cálculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 195 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
 Momento solicitante de diseño.
 $\phi_f := 0.9$ Factor de reducción de flexión.

Desarrollo

$$\begin{split} As_{p} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 40.21 \frac{cm^{2}}{m} & \text{ Area de refuerzo a flexión.} \\ a &:= \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 6.75 \ cm & \text{ Momento nominal negativo.} \\ Mn_{p} &:= As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 223.93 \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Momento nominal negativo.} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 201.54 \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Momento nominal negativo reducido.} \\ rev_{21} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{"Ok.", "Rediseñar"} \right) = \text{"Ok."} \\ FU &:= \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 1.03 & \text{ Factor de utilización.} \end{split}$$

2.4. Cálculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 119 \frac{\textit{tonf} \cdot m}{m}$$
$$\phi_f := 0.9$$

Desarrollo

$$As_{n} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 30.79 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 5.17 \ cm$$

$$Mn_{n} \coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p'} - \frac{a}{2} \right) = 172.75 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{n} = 155.48 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Factor de utilización.

Momento nominal positivo reducido.

2.7. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión

$$As_{minf} \coloneqq \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$$
$$As_{minf} \cdot h = 25.2 \frac{cm^2}{m}$$

7.6.1. Armadura mínima losas en una dirección.24.4.3.2. Cuantía mínima de retracción y temperatura.

Cuantía mínima por cara.

$$rev_{21} \coloneqq if(As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$$

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(As_p \ge As_{minf} \cdot h, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.	7.7.2.3 Separación mínima de flexión losas.
$s_{max.f} \coloneqq min(3 \cdot h, 450 \ mm) = 450 \ mm$	Espaciamiento máximo.
$rev_{25} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hp} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	
$rev_{26} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hn} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	
Distancia Libre entre Capas Horizontales	7.7.2.1→25.2.2 Distancia libre entre capas horizontales.
s_{vmin} := 25 mm	-

- $rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$ $rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$
- Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $d_{agg}\!\coloneqq\!50~\textit{mm}$

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$ Distancia libre entre capas horizontales.

Revisión barras inferiores.

Revisión barras superiores.

Tamaño nominal máximo del agregado grueso.

$$grueso.$$

$$s_{hpmin} \coloneqq \max \left(25 \ \textbf{mm}, \max \left(\phi_{bp} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textbf{mm}$$

$$rev_{29} \coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hp} \right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras inferiores.}$$

$$s_{hnmin} \coloneqq \max \left(25 \ \textbf{mm}, \max \left(\phi_{bn} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textbf{mm}$$

$$rev_{210} \coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hn} \right) < s_{hnmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras superiores.}$$

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

$$l_d \coloneqq \max\left(d_p, 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right)\right) = 133.4 \text{ cm}$$

Largo de desarrollo en muro.

Se utilizará gancho en 90°.

$$\begin{split} l_{dh} &\coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ } mm\right) \\ l_{dh} &= 59.47 \text{ } cm \end{split}$$
 Largo de desa

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm		
No. 10 a No. 25	$6d_b$		
No. 29 a No. 36	$8d_b$		

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 32 \, mm$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 25.6 \ \boldsymbol{cm}$

 $l_{ext} \coloneqq 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 38.4 \text{ cm}$

Largo de desarrollo en losa.



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

6. Diagrama de Interacción

Compresión Pura

$$P_{no} \coloneqq 0.8 \cdot (0.85 \cdot f'c \cdot (h - As_n) + As_n \cdot fy) \qquad P_{no} \equiv 2955.21 \frac{tonf}{m} \qquad \text{ACI-14}$$

$$\phi P_{no} \coloneqq 0.65 \cdot P_{no} \qquad \phi P_{no} \equiv 1920.88 \frac{tonf}{m}$$

Condicion de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} = 1583.71 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &:= 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} = 1029.41 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} = 805.13 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &:= 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} = 523.33 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de "curva de interacción"

$$\begin{split} \phi_{j} &:= \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.7 \cdot P_{b} \\ \| \underbrace{ \begin{array}{c} 0.9 \\ 2 \cdot P_{n_{j}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \| \underbrace{ \begin{array}{c} 0.9 \\ 2 \cdot P_{n_{j}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{0.65 \cdot P_{b}} \\ \end{array} \right\| \\ \phi_{j} &:= \text{if } \phi_{j} < 0.65 \\ \| 0.65 \\ \text{else if } \phi_{j} > 0.9 \\ \| 0.9 \\ \text{else} \\ \| \phi_{j} \\ \end{array} \right|$$

Factor de Reducción de Resistencia

Cargas Axiales

$$\phi P_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot P_{n_j}$$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

	9.33 18.67 28			$\begin{array}{c} 1248.47 \\ 2657.88 \\ 3854.79 \end{array}$			$\begin{bmatrix} 266.13 \\ 334.18 \\ 380.81 \end{bmatrix}$			$\begin{array}{c} 0.84 \\ 0.77 \\ 0.71 \end{array}$
	37.33 46.67 56 65.33			$\begin{array}{r} 4883.88\\ 6063.35\\ 7337.49\\ 8611.63\end{array}$			$410.51 \\ 447.67 \\ 482.6 \\ 507.35$			$ \begin{array}{c} 0.66 \\ 0.65 \\ 0.65 \\ 0.65 \end{array} $
c_=	74.67 84 93.33 102.67	cm	$\phi P_{n_j} =$	$\begin{array}{c} 9885.77\\ 11414.75\\ 12937.85\\ 14415.69\end{array}$	$\frac{kN}{m}$	$\phi M_{n_j} = 1$	521.91 511.48 491.21 463.38	$rac{tonf \cdot m}{m}$	$\phi_j =$	$\begin{array}{c} 0.65 \\ 0.65 \\ 0.65 \\ 0.65 \end{array}$
	$112 \\ 121.33 \\ 130.67 \\ 140$			$\begin{array}{c} 15859.58\\ 17277.35\\ 18609.24\\ 19990.08 \end{array}$			427.34 382.63 332.73 269.8			$0.65 \\ 0.65 \\ 0.65 \\ 0.65 \\ 0.65$



3. DISEÑO A CORTE FUERA DEL PLANO.

3.1. Geometría.



En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.2. Solicitaciones.

$V_u \coloneqq 52 \frac{tonf}{m}$	Corte a dx de la losa.
$\phi_c := 0.75$	Factor reducción corte.

3.3. Corte Nominal Hormigón.

$$Vc \coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \cdot d_p$$
$$Vc \equiv 125.43 \ \frac{tonf}{m}$$

3.4. Altura mínima sección.

$$\begin{split} &Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \\ &d_{min} \coloneqq \left(\frac{V_u}{\phi_c} - Vc \right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv -15.37 \ \textit{cm} \\ &rev_{31} \coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \leq d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''} \right) = \text{``Ok''} \end{split}$$

Corte nominal Efectivo.

Altura mínima efectiva de la sección.

3.5. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{V_u}{\phi_c} - Vc = -56.1 \frac{tonf}{m}$$

 rev_{32} = "No quiere Vs"

$$\phi_{bc} \coloneqq 16 \ \textbf{mm}$$

$$s_{c} \coloneqq 200 \ \textbf{mm}$$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{2}{m}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^{2}\right) \cdot n_{rc} = 4.02 \ \frac{cm^{2}}{m}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_{p}}{s_{c}} = 114.87 \ \frac{tonf}{m}$$

Corte nominal mínimo acero.

Diámetro estribo de acero.

Espaciamiento

Número ramas por metro.

Área estribo por metro.

Corte Nominal Acero.

 $rev_{32}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!V\!s\!\!>\!\!V\!s_{\!m\!in}\,,\text{``Ok''}\,,\text{``Rediseñar''}\!\right)\!=\!\text{``Ok''}$

3.6. Corte Nominal Total

$Vn \coloneqq Vc + Vs$	$Vn = 240.3 \frac{tonf}{m}$	
$\phi V n \coloneqq \phi_c \cdot V n$	$\phi Vn = 180.23 \ rac{tonf}{m}$	Corte Nominal reducido.
$rev_{33} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi Vn > V_u, \text{``Ol} \right)$	k", "Rediseñar") = "Ok"	
$FU_c \!\coloneqq\! \frac{\phi Vn}{V_u} \!=\! 3.47$		

3.6. Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

9.6.3.3. Av minima de corte.

$$\begin{split} rev_{34} &= \text{``No require armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &\coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \\ Av_{min} \cdot s_c &= 1.67 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &\coloneqq \text{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &\coloneqq \text{if} \left(Vs_{min} > 0, \text{if} \left(Vs \leq 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``-''} \end{split}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

$$s_{max} \coloneqq min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$$

$$rev_{37} \coloneqq if(Vs_{min} > 0, if(s_c < s_{max}, "Ok.", "Mod. s."), "-") = "-"$$

3.7. Malla Transversal.

$$\begin{split} \rho_t &:= \mathbf{if} \left(V_u \le 0.5 \cdot \phi_c \cdot Vc \,, 0.0020 \,, 0.0025 \right) = 0.0025 & |\rho_t := \\ \rho_t &:= \mathbf{if} \left(A_{vc} < \rho_t \cdot h \,, \rho_t \,, A_{vc} \right) = 0.0025 & \text{ho} \\ \rho_t \cdot h &= 35 \, \frac{\mathbf{cm}^2}{\mathbf{m}} \\ rev_{38} &:= \mathbf{if} \left(\rho_t \cdot h < As_p + As_n \,, \text{``Ok.''} \,, \text{``Mod. As.''} \right) = \text{``Ok.''} \end{split}$$

 ho_l : cuantía de refuerzo vertical (|). ho_t : cuantía de refuerzo horizontal (-).



LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Losa Inferior Transversal Túnel Rectangular

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$ fy := 420 MPa

$$\begin{array}{c} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.85 \\ \text{else if } f'c \geq 55 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.65 \\ \text{else} \\ \| 0.85 - \frac{0.05 \ (f'c - 28 \ \textbf{MPa})}{7 \ \textbf{MPa}} \\ \end{array} \right\|$$

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

2.1. Geometría.





2.2. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 90 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$
$$Mu_n \coloneqq 100 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Carga Axial y Momento Positiva.

C1: 1,2 D + 1,6 L + 1,6 HC2: 1,2 D + 1,0 L + 1,6 HC3: 1,2 D + 1,0 L + 0,9 HC4: 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 EC5: 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E

Carga Axial y Momento Negativa.

C1:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H
C2:	1,2 D + 1,0 L + 1,6 H
C3:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E
C5:	0,9 <i>D</i> + 1,2 <i>H</i> + 1,4 E
C3: C4: C5:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E

2.3. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

$\phi_{bp_1} = 25 \ mm$	
$\phi_{bp_2} \! := \! \phi_{bp_1} \! = \! 25$	5 mm
$\phi_{bp_3} = \phi_{bp_1} = 25$	5 mm

Solicitación máxima positiva.

Solicitación máxima negativa.

$Pu \coloneqq \begin{bmatrix} 220 \\ 75 \\ 88 \\ 87 \\ 139 \end{bmatrix} \frac{tonf}{m}$	$Mu \coloneqq \begin{bmatrix} 90\\81\\30\\62\\65 \end{bmatrix}$	$rac{tonf \cdot m}{m}$
--	---	-------------------------

	215			85 64	
$Pu2 \coloneqq$	$\frac{56}{82}$	tonf	$Mu2 \coloneqq$	04 100	$tonf \cdot m$
	76	\boldsymbol{m}		95	$m{m}$
	$\lfloor 156 \rfloor$			35	

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.25 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 10.75 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 15.25 \text{ cm}$$

Diametro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} := 25 \ mm$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 25 \ mm$
 $\phi_{bn_3} := \phi_{bn_1} = 25 \ mm$

a -65 mm

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} = 0.5 \text{ mm}$$

$$s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_2} = s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_3} = s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capn_1} = rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.25 \text{ cm}$$

$$s_{capn_2} = rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 10.75 \text{ cm}$$

$$s_{capn_3} = rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 15.25 \text{ cm}$$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Numero de capas

$$n_p \coloneqq 1$$
Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$$d_p := h - s_{capp}_{n_p} = 173.75 \ cm$$
 Altura efectiva hasta barras inferiores.
 $d_p' := h - s_{capn}_{n_p} = 173.75 \ cm$ Altura efectiva hasta barras superiores.

2.4. Calculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 90 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

Momento solicitante de diseño.
 $\phi_f := 0.9$
Factor de reducción de flexión.

Desarrollo

$$\begin{split} As_{p} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 32.72 \frac{cm^{2}}{m} & \text{ Area de refuerzo a flexión.} \\ a &:= \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 5.5 \ cm \\ Mn_{p} &:= As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 239.67 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Momento nominal negativo.} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 215.7 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Momento nominal negativo reducido.} \\ rev_{21} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{"Ok."}, \text{"Rediseñar"} \right) = \text{"Ok."} \\ FU &:= \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 2.4 & \text{ Factor de utilización.} \end{split}$$

2.5. Calculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 100 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$As_{n} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 32.72 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 5.5 \ cm$$

$$Mn_{n} \coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p'} - \frac{a}{2} \right) = 239.67 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{n} = 215.7 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{n} > Mu_{n}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right)$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

2.7. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.

$$As_{minf} \coloneqq \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$$
$$As_{minf} \cdot h = 32.4 \frac{cm^2}{m}$$

7.6.1. Armadura mínima losas en una dirección.24.4.3.2. Cuantía mínima de retracción y temperatura.

Cuantía mínima por cara.

$$rev_{23} \coloneqq if(As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$$

 $rev_{24} \!\coloneqq\! \mathbf{if} \left(\! As_p \!\geq\! As_{\!minf} \!\cdot\! h \,, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) \!= \text{``Ok.''}$
Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.

7.7.2.3 Separación mínima flexión losas.

$$s_{max.f} \coloneqq min (3 \cdot h, 450 \ mm) = 450 \ mm$$
$$rev_{25} \coloneqq if (max (s_{hp}) < s_{max.f}, "Ok", "Mod. s") = "Ok"$$
$$rev_{26} \coloneqq if (max (s_{hn}) < s_{max.f}, "Ok", "Mod. s") = "Ok"$$

Distancia Libre entre Capas Horizontales	7.7.2.1→25.2.2 Distancia libre entre capas horizontales.
s_{vmin} := 25 mm	

$rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} \! < \! s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) \! = \text{``Ok''}$	Revisión barras superiores.
$rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras inferiores.

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $d_{agg} \coloneqq 50 \ \mathbf{mm}$

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$ Distancia libre entre capas horizontales.

Tamaño nominal máximo del agregado grueso.

$$\begin{split} s_{hpmin} &\coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bp} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \\ rev_{29} &\coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hp} \right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \\ s_{hnmin} &\coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bn} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \\ rev_{210} &\coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hn} \right) < s_{hnmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \\ \end{split}$$
Revisión barras inferiores.

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

 $l_d \coloneqq \max \left(d_p, 12 \cdot \max \left(\phi_{bn}, \phi_{bp} \right) \right) = 173.75 \ cm$

Largo de desarrollo en losa.

Se utilizará gancho en 90°.

$$\begin{split} l_{dh} &\coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ } mm\right) \\ l_{dh} &= 46.46 \text{ } cm \end{split}$$
 Largo de desa

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm	
No. 10 a No. 25	6 <i>d</i> _b	
No. 29 a No. 36	$8d_b$	

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 25 \, mm$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max \left(\phi_{bn}, \phi_{bp} \right) = 20 \ \boldsymbol{cm}$

 $l_{ext} \coloneqq 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 30 \ cm$

 $_{p}$,150 mm





Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

2.8. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

Condición de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} = 2144 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &:= 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} = 1393.6 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} = 1256.01 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &:= 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} = 816.41 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{array}{ll} P_{n_{j}} \coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{j} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k,j} \\ \phi_{j} \coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_{b} \\ \phi_{j} \coloneqq \text{if } \phi_{j} < 0.65 \\ \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 2 \cdot P_{n_{j}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ else \\ \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 2 \cdot P_{n_{j}} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.65 \cdot P_{b}}{2 \cdot P_{b}} \end{array} \right\| \left\| \phi_{j} \\ \end{array} \right\| \left\| \phi_{j} \\ \phi_{j} \\ \end{array} \right\|$$

Factor de Reducción de Resistencia

Cargas Axiales

 $\phi P_{n_j} \! \coloneqq \! \phi_j \! \cdot \! P_{n_j}$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

Gráfico de Interacción y vectores.



3. DISEÑO A CORTE

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Solicitaciones.

$$d_p = 173.75 \text{ cm}$$
$$Vu \coloneqq 11 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$\phi_c \coloneqq 0.75$

3.2. Corte Nominal Hormigón.

$$Vc \coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \cdot d_p$$
$$Vc \equiv 163.37 \frac{tonf}{m}$$

Altura efectiva sección.

Solicitacion de corte a **d** del muro.

Factor reducción corte.

Corte nominal sin carga axial.

3.3. Altura mínima sección.

$$\begin{split} &Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \\ &d_{min} \coloneqq \left(\frac{Vu}{\phi_c} - Vc \right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} = -40.74 \ \textit{cm} \\ &\text{Altura minima efectiva de la sección.} \\ &rev_{31} \coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \leq d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''} \right) = \text{``Ok''} \end{split}$$

3.4. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{Vu}{\phi_c} - Vc \qquad Vs_{min} = -148.7 \frac{tonf}{m} \quad \text{Corte nominal minimo acero.}$$

$$\phi_{bc} \coloneqq 0 \text{ mm} \qquad \text{Diámetro estribo de acero .}$$

$$s_c \coloneqq 250 \text{ mm} \qquad \text{Espaciamiento}$$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{2}{m} \qquad \text{Número ramas por metro.}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^2\right) \cdot n_{rc} \qquad A_{vc} \equiv 0 \frac{cm^2}{m} \qquad \text{Area estribo doble por 1m trans.}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_p}{s_c} \qquad Vs \equiv 0 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal Acero.}$$

3.5. Corte Nominal Total

$$Vn \coloneqq Vc + Vs \qquad Vn \equiv 163.37 \frac{tonf}{m}$$

$$\phi Vn \coloneqq \phi_c \cdot Vn \qquad \phi Vn \equiv 122.53 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal reducido.}$$

$$rev_{33} \coloneqq \text{if} (\phi Vn > Vu, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}) \equiv \text{``Ok''}$$

$$FU_c \coloneqq \frac{\phi Vn}{Vu} = 11.14$$

3.6 Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

 $rev_{34}\!=$ "No verificar armadura mínima"

$$Av_{min} \coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \qquad 9.6.3.3. \text{ Av min corte}$$
$$Av_{min} \cdot s_c = 2.08 \ \frac{cm^2}{m}$$
$$rev_{35} \coloneqq \mathbf{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Mod. Avc''}$$

 $rev_{36} \!\coloneqq\! \mathbf{if} \left(Vs_{min} \! > \! 0 \,, \mathbf{if} \left(Vs \! \le \! 4 \ Vc \,, ``\mathrm{Ok"} \,, ``\mathrm{Modificar \, Vs"} \right), ``-" \right) \! = ``-"$

Espaciamiento mínimo

 $s_{max} \coloneqq min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$

 $rev_{37} \! \coloneqq \! \mathbf{if} \left(Vs_{min} \! > \! 0 \,, \mathbf{if} \left(s_c \! < \! s_{max} \,, \text{``Ok.''} \,, \text{``Mod. s.''} \right) \,, \text{``-''} \right) \! = \! \text{``-''}$

LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Losa Superior Túnel en Forma de Arco

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

fy := 420 *MPa*

Es := 210000 *MPa*

1.2. Geometría.



Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

<i>h</i> :=140 <i>cm</i>	Altura losa.
<i>b</i> := 100 <i>cm</i>	Ancho losa.
<i>rec</i> := 5 <i>cm</i>	Recubrimiento.
$Aslat \coloneqq 0 \ \frac{cm^2}{m}$	Refuerzo superficial.

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

2.1. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 140 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$
$$Mu_n \coloneqq 50 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Carga Axial y Momento Positiva

C1: 1,2 D + 1,6 L + 1,6 HC2: 1,2 D + 1,0 L + 1,6 HC3: 1,2 D + 1,0 L + 0,9 HC4: 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 EC5: 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E

Carga Axial y Momento Negativa

C1:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H
C2:	1,2 D + 1,0 L + 1,6 H
C3:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E
C5:	0,9 D + 1,2 H + 1,4 E

$Pu_2 \coloneqq$	$\begin{bmatrix} 377 \\ 0 \\ 267 \\ 310 \\ 235 \end{bmatrix}$	$\frac{tonf}{m}$	$Mu_2 \coloneqq$	$ \begin{bmatrix} 18 \\ 0 \\ 16 \\ 40 \\ 50 \end{bmatrix} $	$rac{tonf \cdot m}{m}$
------------------	---	------------------	------------------	---	-------------------------

Solicitación máxima positiva.

Solicitación máxima negativa.

377

344

267

310

235

 $Pu_1 \coloneqq$

tonf

 \boldsymbol{m}

140

79

121

139

64

 $Mu_1 \coloneqq$

 $tonf \cdot m$

 \boldsymbol{m}

2.2. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

$$\phi_{bp_1} := 25 \text{ mm}$$

 $\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 25 \text{ mm}$
 $\phi_{bp_3} := \phi_{bp_1} = 25 \text{ mm}$
 $\phi_{bp_4} := \phi_{bp_1} = 25 \text{ mm}$

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Diámetro de la barra 4ta linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 175 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 175 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 175 \text{ mm}$$

$$s_{hp_4} := s_{hp_1} = 175 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.25 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 10.75 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 15.25 \text{ cm}$$

$$s_{capp_4} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{3 \cdot s_{vp}}{2} + \phi_{bp_2} = 19.75 \text{ cm}$$

Diámetro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} := 22 \text{ mm}$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 22 \text{ mm}$
 $\phi_{bn_3} := \phi_{bn_1} = 22 \text{ mm}$

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} := 65 \text{ mm}$$

 $s_{hn_1} := 150 \text{ mm}$
 $s_{hn_2} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$
 $s_{hn_3} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Separación entre barras refuerzo 4ta línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Distancia desde CG a borde de Capa 4.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea.

$$\begin{split} s_{capn_1} &\coloneqq rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.1 \ \textit{cm} \\ s_{capn_2} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 10.45 \ \textit{cm} \\ s_{capn_3} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 14.8 \ \textit{cm} \\ \end{split}$$
Distancia desde CG a borde de Capa 2.
Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Número de capas.

 $n_p \coloneqq 1$ Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$d_p \coloneqq h - s_{capp}_{n_p} = 133.75 \ \textit{cm}$	Altura efectiva hasta barras inferiores.
$d_p' \coloneqq h - s_{capn_{n_n}} = 133.9$ cm	Altura efectiva hasta barras superiores

2.3. Cálculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 140 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_f := 0.9$$

Desarrollo

$$\begin{aligned} As_{p} &\coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 28.05 \frac{cm^{2}}{m} & \text{ Are} \\ a &\coloneqq \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.71 \ cm \\ Mn_{p} &\coloneqq As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 157.85 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Mo} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} = 142.06 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Mo} \\ rev_{21} &\coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''} \\ FU &\coloneqq \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 1.01 & \text{ Fac} \end{aligned}$$

Momento solicitante de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal negativo.

Momento nominal negativo reducido.

Factor de utilización.

2.4. Cálculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 50 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$\begin{split} As_{n} &\coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 25.34 \frac{cm^{2}}{m} \\ a &\coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.26 \ cm \\ Mn_{n} &\coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 143.02 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{n} &= 128.72 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ rev_{22} &\coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{n} > Mu_{n}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñan'} \right) \end{split}$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_f \cdot Mn_n > Mu_n, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$

 $FU \coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_n}{Mu_n} = 2.57$ Factor de utilización.

2.5. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.7.6.1. Armadura mínima losas en
una dirección.
24.4.3.2. Cuantía mínima de
retracción y temperatura. $As_{minf} := \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$ = 0.0018 $As_{minf} \cdot h = 25.2 \frac{cm^2}{m}$ Cuantía mínima por cara. $rev_{23} := if (As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."<math>rev_{24} := if (As_p \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$

losas. $s_{max.f} \coloneqq min(3 \cdot h, 450 \text{ mm}) = 450 \text{ mm}$ $rev_{25} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hp} \right) \! < \! s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) \! = \text{``Ok''}$ $rev_{26} \coloneqq if(max(s_{hn}) < s_{max.f}, "Ok", "Mod. s") = "Ok"$

Distancia Libre entre Capas Horizontales

7.7.2.1→25.2.2 Distancia libre entre capas horizontales.

$s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

$rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras inferiores.
$rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras superiores.

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

7.7.2.1→25.2.1 Distancia libre entre capas horizontales.

 $d_{aqq} \coloneqq 50 \ \mathbf{mm}$ Tamaño nominal máximo del agregado grueso. $s_{hpmin} \coloneqq \max\left(25 \ \boldsymbol{mm}, \max\left(\phi_{bp}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \boldsymbol{mm}$ $rev_{29} \coloneqq \mathbf{if}(min(s_{hp}) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''}) = \text{``Ok''}$ Revisión barras inferiores. $s_{hnmin} \coloneqq \max\left(25 \ \boldsymbol{mm}, \max\left(\phi_{bn}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \boldsymbol{mm}$ $rev_{210} \coloneqq if(min(s_{hn}) < s_{hnmin}, "Mod. Svn", "Ok") = "Ok"$ Revisión barras superiores.

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.

7.7.2.3 Separación mínima de flexión

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

$$l_d \coloneqq \max\left(d_p, 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right)\right) = 133.75 \text{ cm}$$

Largo de desarrollo en losa.

Se utilizará gancho en 90°.

$$l_{dh} \coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ mm}\right)$$
$$l_{dh} = 46.46 \text{ cm}$$
Largo de desarr

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm
No. 10 a No. 25	$6d_b$
No. 29 a No. 36	$8d_b$

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 25 \, \boldsymbol{mm}$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 20 \ \boldsymbol{cm}$

 $l_{ext} \coloneqq 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 30 \ \textbf{cm}$

Largo de desarrollo en muro.



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

2.6. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

Condición de Balance

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{split} P_{n_{j}} &\coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{j} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k,j} \\ \phi_{j} &\coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_{b} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \right\|_{1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h}} \\ &\text{else} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \right\|_{1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}}} \\ &\text{if } 0.9 \\ &\text{else} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \right\|_{1 + \frac{0.65 \cdot P_{b}}} \end{split} \qquad \begin{aligned} \phi_{j} &\coloneqq \text{if } \phi_{j} < 0.65 \\ \left\| 0.65 \\ e\text{lse if } \phi_{j} > 0.9 \\ e\text{lse} \\ \left\| \phi_{j} \right\| \end{aligned} \qquad Factor de Reduccion de Resistencia \end{aligned}$$

Cargas Axiales

 $\phi P_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot P_{n_j}$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

Gráfico de Interacción y vectores.





3. DISEÑO A CORTE

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Solicitaciones.

$$d_p = 133.75 \text{ cm}$$
$$Vu \coloneqq 117 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$
$$\phi_c \coloneqq 0.75$$

Nu := 377 *tonf*

Altura efectiva sección.

Solicitación de Corte a dp de muro.

Factor reducción corte.

Carga axial (si Nu >0 \rightarrow compression).

3.2. Corte Nominal Hormigón.

$$\begin{split} Vc_{sax} &\coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa \cdot d_p} \\ Vc_{sax} &\equiv 125.76 \ \frac{tonf}{m} \\ Vc_{comp} &\coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{14 \cdot h \cdot b} \right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p \\ Vc_{comp} &\equiv 149.48 \ \frac{tonf}{m} \\ Vc_{trax} &\coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{3.5 \cdot h \cdot b} \right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p \\ Vc_{trax} &\equiv 220.65 \ \frac{tonf}{m} \end{split}$$

 $Vc \coloneqq Vc_{comp}$

$$Vc = 149.48 \frac{tonf}{m}$$

Corte nominal sin carga axial.

Corte nominal con carga axial en compresión.

Corte nominal con carga axial en tracción.

Corte nominal Efectivo.

3.3. Altura mínima sección.

$$Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$$

$$d_{min} \coloneqq \left(\frac{Vu}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv 1.79 \ cm$$

$$rev_{31} \coloneqq if \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''}$$

Altura mínima efectiva de la sección.

3.4. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{Vu}{\phi_c} - Vc \qquad Vs_{min} = 6.52 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte nominal minimo acero.}$$

$$rev_{32} = \text{``Requiere Vs''}$$

$$\phi_{bc} \coloneqq 12 \text{ mm} \qquad \text{Diámetro estribo de acero .}$$

$$s_c \coloneqq 250 \text{ mm} \qquad \text{Espaciamiento}$$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{2}{m} \qquad \text{Número ramas por metro.}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^2\right) \cdot n_{rc} \qquad A_{vc} = 2.26 \frac{cm^2}{m} \qquad \text{Área estribo por metro.}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_p}{s_c} \qquad Vs = 51.83 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal Acero.}$$

$$rev_{33} \coloneqq \text{if } (Vs > Vs_{min}, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}) = \text{``Ok''}$$

3.5. Corte Nominal Total

$Vn \coloneqq Vc + Vs$	$Vn = 201.31 \frac{tonf}{m}$	
$\phi V n \coloneqq \phi_c \cdot V n$	$\phi Vn = 150.98 \frac{tonf}{m}$	Corte Nominal reducido.
$rev_{33} \coloneqq \mathbf{if}(\phi Vn > Vu, "Ok", "R$	ediseñar") = "Ok"	
$FU_c \! \coloneqq \! \frac{\phi Vn}{Vu} \! = \! 1.29$		

3.6 Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{aligned} rev_{34} &= \text{``Verificar armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &:= \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \quad 9.6.3.3. \text{ Av minima de corte.} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 2.08 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &:= \text{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &:= \text{if} \left(Vs_{min} > 0, \text{if} \left(Vs \le 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``Ok''} \end{aligned}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

 $s_{max} := min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$

$$rev_{37} \coloneqq if(Vs_{min} > 0, if(s_c < s_{max}, "Ok.", "Mod. s."), "-") = "Ok."$$

LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Muro-Arco Túnel en Forma de Arco

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

fy := 420 *MPa*

Es := 210000 *MPa*

$$\begin{array}{c|c} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \ \textbf{MPa} \\ & \| 0.85 \\ \text{else if } f'c \geq 55 \ \textbf{MPa} \\ & \| 0.65 \\ \text{else} \\ & \| 0.85 - \frac{0.05 \ (f'c - 28 \ \textbf{MPa})}{7 \ \textbf{MPa}} \\ \end{array} \right\|$$

1.2. Geometría.



Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

<i>h</i> ≔ 140 <i>cm</i>	Altura losa.
<i>b</i> := 100 <i>cm</i>	Ancho losa.
<i>rec</i> := 5 <i>cm</i>	Recubrimiento.
$Aslat \coloneqq 0 \ \frac{cm^2}{m}$	Refuerzo superficial
$l_w \coloneqq 75 \ m$	Largo del muro.
$h_w\!\coloneqq\!2.5~m{m}$	Altura muro.

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

2.1. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 71 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$
$$Mu_n \coloneqq 316 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Carga Axial y Momento Negativo

C1: 1,2 D + 1,6 L + 1,6 HC2: 1,2 D + 1,0 L + 1,6 HC3: 1,2 D + 1,0 L + 0,9 HC4: 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 EC5: 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E

Solicitación máxima positiva.

Solicitación máxima negativa.

$$Pu_{1} \coloneqq \begin{bmatrix} 0\\615\\0\\0\\439 \end{bmatrix} \frac{tonf}{m} \qquad Mu_{1} \coloneqq \begin{bmatrix} 0\\7\\0\\0\\71 \end{bmatrix} \frac{tonf \cdot m}{m}$$

Carga Axial y Momento Positivo

C2: $1,2 D + 1,0 L + 1,6 H$ C3: $1,2 D + 1,0 L + 0,9 H$ C4: $1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E$ C5: $0,9 D + 1,2 H + 1,4 E$	$Pu_2 \coloneqq \begin{bmatrix} 615 \\ 478 \\ 614 \\ 439 \end{bmatrix}$	$\frac{tonf}{m}$	$Mu_2 \coloneqq$	$231 \\ 276 \\ 295 \\ 110$	$rac{tonf \cdot m}{m}$
--	---	------------------	------------------	----------------------------	-------------------------

2.2. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

 $\phi_{bp_{1}} := 22 \text{ mm}$ $\phi_{bp_{2}} := \phi_{bp_{1}} = 22 \text{ mm}$ $\phi_{bp_{3}} := \phi_{bp_{1}} = 22 \text{ mm}$ $\phi_{bp_{4}} := \phi_{bp_{1}} = 22 \text{ mm}$

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Diámetro de la barra 4ta linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_4} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.1 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 10.45 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 14.8 \text{ cm}$$

$$s_{capp_4} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{3 \cdot s_{vp}}{2} + \phi_{bp_2} = 19.15 \text{ cm}$$

Diámetro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} \coloneqq 28 \text{ mm}$$
 $\phi_{bn_2} \coloneqq \phi_{bn_1} \equiv 28 \text{ mm}$
 $\phi_{bn_3} \coloneqq \phi_{bn_1} \equiv 28 \text{ mm}$

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

 $s_{vn} := 65 mm$ $s_{hn_1} := 175 mm$ $s_{hn_2} := s_{hn_1} = 175 mm$ $s_{hn_3} := s_{hn_1} = 175 mm$ Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Separación entre barras refuerzo 4ta línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Distancia desde CG a borde de Capa 4.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea.

$$\begin{split} s_{capn_1} &\coloneqq rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.4 \ \textit{cm} \\ s_{capn_2} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 11.05 \ \textit{cm} \\ s_{capn_3} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 15.7 \ \textit{cm} \end{split}$$
 Distancia desde CG a borde de Capa 2.
Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Número de capas.

$$n_p \coloneqq 1$$
Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 2$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$d_p \coloneqq h - s_{capp}_{n_p} = 133.9 \ \textit{cm}$	Altura efectiva hasta barras inferiores.
$d_{p}' \! \coloneqq \! h \! - \! s_{capn_{n_{n}}} \! = \! 128.95 \ {\it cm}$	Altura efectiva hasta barras superiores

2.3. Cálculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

 $Mu_p \!=\! 71 \; \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$ $\phi_f = 0.9$

Desarrollo

$$\begin{aligned} As_{p} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 25.34 \frac{cm^{2}}{m} & \text{ Are} \\ a &:= \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.26 \ cm \\ Mn_{p} &:= As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 143.02 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Me} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 128.72 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Me} \\ rev_{21} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''} \\ FU &:= \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 1.81 & \text{ Factors} \end{aligned}$$

Momento solicitante de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal negativo.

Momento nominal negativo reducido.

Factor de utilización.

2.4. Cálculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 316 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$As_{n} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 70.37 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot fc} = 11.82 \ cm$$

$$Mn_{n} \coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 370.83 \ \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{n} = 333.75 \ \frac{tonf \cdot m}{m}$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

2.5. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.

7.6.1. Armadura mínima losas en una dirección.24.4.3.2. Cuantía mínima de retracción y temperatura.

$$As_{minf} \coloneqq \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$$
$$As_{minf} \cdot h = 25.2 \frac{cm^2}{m}$$

Cuantía mínima por cara.

$$m rev_{23} \coloneqq if \left(As_n \ge As_{minf} \cdot h, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$

$$rev_{24} \coloneqq if(As_p \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.	7.7.2.3 Separación mínima de flexión losas.
$s_{max.f} \coloneqq min(3 \cdot h, 450 \ mm) = 450 \ mm$	
$rev_{25} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hp} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	"

$$rev_{26} \coloneqq if(max(s_{hn}) < s_{max.f}, "Ok", "Mod. s") = "Ok"$$

Distancia Libre entre Capas Horizontales

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.2$ Distancia libre entre capas horizontales.

$s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

$rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras inferiores.
$rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras superiores.

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$ Distancia libre entre capas horizontales.

$$\begin{aligned} d_{agg} &\coloneqq 50 \ \textit{mm} \\ s_{hpmin} &\coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bp} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) \\ = 37.5 \ \textit{mm} \\ rev_{29} &\coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hp} \right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) \\ = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras inferiores.} \\ s_{hnmin} &\coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bn} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) \\ = 37.5 \ \textit{mm} \\ rev_{210} &\coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hn} \right) < s_{hnmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) \\ = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras superiores.} \end{aligned}$$

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

$$l_d := \max(d_p, 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp})) = 133.9 \ cm$$

Largo de desarrollo en losa.

Se utilizará gancho en 90°.

$$\begin{split} l_{dh} &\coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ } mm\right) \\ l_{dh} &= 52.04 \text{ } cm \end{split}$$
 Largo de desarro

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm
No. 10 a No. 25	$6d_b$
No. 29 a No. 36	8 <i>d</i> _b

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 28 \, mm$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 22.4 \ \boldsymbol{cm}$

 $l_{ext} := 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp}) = 33.6 \ cm$

ollo en muro.



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

2.6. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

 \boldsymbol{m}

m

de

Condición de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} &= 1813.26 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &:= 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} &= 1178.62 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} &= 868.17 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &:= 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} &= 564.31 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{split} P_{n_{j}} \coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{j} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k,j} \\ \phi_{j} \coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_{b} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.65 \cdot P_{b}}{2 \cdot P_{b}} \\ \end{matrix} \right\|$$

Cargas Axiales

 $\phi P_{n_j} \! \coloneqq \! \phi_j \! \cdot \! P_{n_j}$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

Gráfico de Interacción y vectores.





3. DISEÑO A CORTE

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Geometría.



$d_x \!=\! 127.5 cm$	Altura efectiva sección.
h=1.4 m	Ancho sección.
$h_w {=} 2.5 \; oldsymbol{m}$	Altura muro.

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.2. Solicitaciones.



3.3. Corte Nominal Hormigón.

$$d_p = 1.34 \ \mathbf{m}$$
$$Vc \coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot \mathbf{MPa}} \cdot d_p$$
$$Vc = 125.9 \ \frac{tonf}{\mathbf{m}}$$

3.4. Altura mínima sección.

$$Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$$

$$d_{min} \coloneqq \left(\frac{V_u}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv 12.63 \text{ cm}$$

$$rev_{31} \coloneqq if \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''}$$

Altura mínima efectiva de la sección.

Corte a dx de la losa.

Factor reducción corte.

Altura efectiva de la sección.

Corte nominal Efectivo.

3.5. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{V_u}{\phi_c} - Vc = 46.1 \frac{tonf}{m}$$

 rev_{32} = "Requiere Vs"

$$\phi_{bc} \coloneqq 12 \ mm$$

 $s_c \coloneqq 200 \ mm$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{2}{m}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^{2}\right) \cdot n_{rc} = 2.26 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_{p}}{s_{c}} = 64.86 \frac{tonf}{m}$$

 $rev_{32}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!Vs\!>\!Vs_{min}, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}\!\right)\!=\!\text{``Ok''}$

Corte nominal mínimo acero.

Diámetro estribo de acero .

Espaciamiento

Número ramas por metro.

Área estribo por metro.

Corte Nominal Acero.

3.6. Corte Nominal Total

$Vn \coloneqq Vc + Vs$	$Vn = 190.76 \frac{tonf}{m}$	
$\phi V n \coloneqq \phi_c \cdot V n$	$\phi Vn = 143.07 \ rac{tonf}{m}$	Corte Nominal reducido.
$rev_{33} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi Vn > V_u, "O \right)$	k", "Rediseñar") = "Ok"	
$FU_c \coloneqq \frac{\phi Vn}{V_u} = 1.11$		

3.6. Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{aligned} rev_{34} &= \text{``Verificar armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &\coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \quad 9.6.3.3. \text{ Av minima de corte.} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 1.67 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &\coloneqq \text{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &\coloneqq \text{if} \left(Vs_{min} > 0, \text{if} \left(Vs \le 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``Ok''} \end{aligned}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

3.7. Malla Longitudinal.



LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Muro Lateral Túnel en Forma de Arco

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \ \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 \ MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

fy := 420 *MPa*

$$\begin{array}{l} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \; \textit{MPa} \\ & \parallel 0.85 \\ & \text{else if } f'c \geq 55 \; \textit{MPa} \\ & \parallel 0.65 \\ & \text{else} \\ & \parallel 0.85 - \frac{0.05 \; (f'c - 28 \; \textit{MPa})}{7 \; \textit{MPa}} \end{array} = 0.84$$

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

1.2. Geometría.



Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

<i>h</i> :=140 <i>cm</i>	Altura losa.
<i>b</i> := 100 <i>cm</i>	Ancho losa.
<i>rec</i> := 5 <i>cm</i>	Recubrimiento.
$Aslat \coloneqq 0 \frac{cm^2}{m}$	Refuerzo superficial.
$l_w \coloneqq 75 \ m$	Largo del muro.
$h_w \coloneqq 2.5 \ m$	Altura muro.

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

2.1. Solicitaciones

$$Mu_{p} \coloneqq 100 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}} \qquad (\text{mínima})$$
$$Mu_{n} \coloneqq 276 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Solicitación máxima positiva.

Solicitación máxima negativa.

Carga Axial y Momento Muro Superior (M-)

C1:
$$1,2 D + 1,6 L + 1,6 H$$

C2: $1,2 D + 1,0 L + 1,6 H$
C3: $1,2 D + 1,0 L + 0,9 H$
C4: $1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E$
C5: $0,9 D + 1,2 H + 1,4 E$
 $Pu_1 \coloneqq \begin{bmatrix} 690\\619\\482\\551\\373 \end{bmatrix} \underbrace{tonf}{m}$
 $Mu_1 \coloneqq \begin{bmatrix} 276\\210\\236\\260\\123 \end{bmatrix} \underbrace{tonf \cdot m}{m}$

Carga Axial y Momento Muro Inferior (M-)

C1: C2: C3: C4:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H 1,2 D + 1,0 L + 1,6 H 1,2 D + 1,0 L + 0,9 H 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E	$Pu_2 \coloneqq \begin{bmatrix} 721 \\ 662 \\ 488 \\ 579 \\ 423 \end{bmatrix}$	$\frac{tonf}{m}$	$Mu_2 \coloneqq$	223 229 130 203 200	$rac{tonf \cdot m}{m}$
C5:	0,9 <i>D</i> + 1,2 <i>H</i> + 1,4 E	[423]		l	209	

2.2. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

$$\phi_{bp_1} := 22 \text{ mm}$$

 $\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 22 \text{ mm}$
 $\phi_{bp_3} := \phi_{bp_1} = 22 \text{ mm}$
 $\phi_{bp_4} := \phi_{bp_1} = 22 \text{ mm}$

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Diámetro de la barra 4ta linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_4} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.1 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 10.45 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 14.8 \text{ cm}$$

$$s_{capp_4} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{3 \cdot s_{vp}}{2} + \phi_{bp_2} = 19.15 \text{ cm}$$

Diámetro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} \coloneqq 28 \text{ mm}$$
 $\phi_{bn_2} \coloneqq \phi_{bn_1} \equiv 28 \text{ mm}$
 $\phi_{bn_3} \coloneqq \phi_{bn_1} \equiv 28 \text{ mm}$

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

 $s_{vn} := 65 \text{ mm}$ $s_{hn_1} := 200 \text{ mm}$ $s_{hn_2} := s_{hn_1} = 200 \text{ mm}$ $s_{hn_3} := s_{hn_1} = 200 \text{ mm}$ Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Separación entre barras refuerzo 4ta línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Distancia desde CG a borde de Capa 4.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea.

$$\begin{split} s_{capn_1} &\coloneqq rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.4 \ \textit{cm} \\ s_{capn_2} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 11.05 \ \textit{cm} \\ s_{capn_3} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 15.7 \ \textit{cm} \end{split}$$
 Distancia desde CG a borde de Capa 2.
Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Número de capas.

$$n_p \coloneqq 1$$
Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 2$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$d_p \coloneqq h - s_{capp}_{n_p} = 133.9 \ \textit{cm}$	Altura efectiva hasta barras inferiores.
$d_{p}' \! \coloneqq \! h \! - \! s_{capn_{n_{n}}} \! = \! 128.95 \ {\it cm}$	Altura efectiva hasta barras superiores

2.3. Cálculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

 $Mu_p \!=\! 100 \; \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$ $\phi_f = 0.9$

Desarrollo

$$\begin{split} As_{p} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 25.34 \frac{cm^{2}}{m} \\ a &:= \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.26 \ cm \\ Mn_{p} &:= As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 143.02 \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 128.72 \frac{tonf \cdot m}{m} \\ rev_{21} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseña} \right) \end{split}$$

Momento solicitante de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal negativo.

Momento nominal negativo reducido.

2.4. Cálculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 276 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$\begin{aligned} As_{n} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 61.58 \frac{cm^{2}}{m} \\ a &:= \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 10.34 \ cm \\ Mn_{n} &:= As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 326.42 \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{n} &= 293.78 \frac{tonf \cdot m}{m} \\ rev_{22} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{n} > Mu_{n}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar'} \right) \end{aligned}$$

Momento de diseño.

Área de refuerzo a flexión.

Factor de reducción de flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

$$\begin{split} rev_{22} &\coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_f \cdot Mn_n > Mu_n, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''} \\ FU &\coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_n}{Mu_n} = 1.06 \end{split}$$
 Factor de utilización.

2.5. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.7.6.1. Armadura mínima losas en
una dirección.
24.4.3.2. Cuantía mínima de
retracción y temperatura. $As_{minf} := \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$ = 0.0018 $As_{minf} \cdot h = 25.2 \frac{cm^2}{m}$ Cuantía mínima por cara. $rev_{23} := if (As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."<math>rev_{24} := if (As_p \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.	7.7.2.3 Separación mínima de flexión losas.
$s_{max.f} \coloneqq min(3 \cdot h, 450 \ mm) = 450 \ mm$	
$rev_{25} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hp} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	"
$rev_{26} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hn} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	"

Distancia Libre entre Capas Horizontales

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.2$ Distancia libre entre capas horizontales.

$s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

$rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras inferiores.
$rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras superiores.

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$ Distancia libre entre capas horizontales.

$$\begin{split} & d_{agg} \coloneqq 50 \ \textit{mm} \\ & \text{Tamaño nominal máximo del agregado grueso.} \\ & s_{hpmin} \coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bp} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \\ & rev_{29} \coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hp} \right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \\ & \text{Revisión barras inferiores.} \\ & s_{hnmin} \coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bn} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \\ & rev_{210} \coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hn} \right) < s_{hnmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{`Ok''} \right) = \text{``Ok''} \\ & \text{Revisión barras superiores.} \end{split}$$
Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

$$l_d := \max(d_p, 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp})) = 133.9 \ cm$$

Largo de desarrollo en losa.

Se utilizará gancho en 90°.

$$\begin{split} l_{dh} &\coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ } \textbf{mm}\right) \\ l_{dh} &= 52.04 \text{ } \textbf{cm} \end{split}$$
 Largo de desarro

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm
No. 10 a No. 25	$6d_b$
No. 29 a No. 36	8 <i>d</i> _b

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 28 \, mm$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 22.4 \ \boldsymbol{cm}$

 $l_{ext} := 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp}) = 33.6 \ cm$

ollo en muro.



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

2.6. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

$$\begin{split} A_{st} &:= A s_p + A s_n = 86.92 \ \frac{cm^2}{m} \\ P_{no} &:= 0.80 \cdot \left(0.85 \cdot f' c \cdot (h - A_{st}) + A_{st} \cdot f y \right) \\ \phi P_{no} &:= 0.65 \cdot P_{no} \end{split} \qquad \begin{array}{l} P_{no} &= 3136.07 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{no} &= 2038.45 \ \frac{tonf}{m} \\ \end{array}$$

Condición de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} = 1777.83 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &:= 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} = 1155.59 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} = 845.02 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &:= 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} = 549.26 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{split} P_{n_{j}} \coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{j} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k,j} \\ \phi_{j} \coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_{b} \\ \| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.5 \cdot P_{b}}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ \end{bmatrix} \end{split} \qquad \begin{aligned} \phi_{j} \coloneqq \text{if } \phi_{j} < 0.65 \\ \| 0.65 \\ \text{else if } \phi_{j} > 0.9 \\ \text{else} \\ \| \phi_{j} \\ \end{bmatrix} \qquad \begin{aligned} \text{Factor de Reducción de Resistencia} \\ \| 0.9 \\ \text{else} \\ \| \phi_{j} \\ \end{bmatrix} \end{split}$$

Cargas Axiales

$$\phi P_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot P_{n_j}$$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

Gráfico de Interacción y vectores.





3. DISEÑO A CORTE

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Geometría.



En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.2. Solicitaciones.

$$V_u \coloneqq 92 \ \frac{tonf}{m}$$
Corte a dx de la losa. $\phi_c \coloneqq 0.75$ Factor reducción corte.

3.3. Corte Nominal Hormigón.

$$Vc \coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \cdot d_p$$
$$Vc \equiv 125.9 \frac{tonf}{m}$$

3.4. Altura mínima sección.

$$Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$$

$$d_{min} \coloneqq \left(\frac{V_u}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv -0.89 \ cm$$

$$rev_{31} \coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''}$$

Corte nominal Efectivo.

Altura mínima efectiva de la sección.

3.5. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{V_u}{\phi_c} - Vc = -3.23 \frac{tonf}{m}$$

 rev_{32} = "No quiere Vs"

$$\phi_{bc} \coloneqq 12 \text{ mm}$$

 $s_c \coloneqq 200 \ mm$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{2}{m}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^{2}\right) \cdot n_{rc} = 2.26 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_{p}}{s_{c}} = 64.86 \frac{tonf}{m}$$

 $rev_{32}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!V\!s\!\!>\!\!V\!s_{\!m\!in}\,,\text{``Ok''}\,,\text{``Rediseñar''}\!\right)\!=\!\text{``Ok''}$

Corte nominal mínimo acero.

Diámetro estribo de acero .

Espaciamiento

Número ramas por metro.

Área estribo por metro.

Corte Nominal Acero.

3.6. Corte Nominal Total

$Vn \coloneqq Vc + Vs$	$Vn = 190.76 \frac{tonf}{m}$	
$\phi V n \coloneqq \phi_c \cdot V n$	$\phi Vn = 143.07 \ rac{tonf}{m}$	Corte Nominal reducido.
$rev_{33} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi Vn > V_u, "On v \in V_u \right)$	$\mathbf{Ok}^{"}, \mathbf{Ck}^{"} = \mathbf{Ok}^{"}$	
$FU_c \! \coloneqq \! \frac{\phi Vn}{V_u} \! = \! 1.56$		

3.6. Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{aligned} rev_{34} &= \text{``No require armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &\coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \quad 9.6.3.3. \text{ Av minima de corte.} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 1.67 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &\coloneqq \text{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &\coloneqq \text{if} \left(Vs_{min} > 0, \text{if} \left(Vs \leq 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``-''} \end{aligned}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

$$s_{max} := min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$$
$$rev_{37} := if(Vs_{min} > 0, if(s_c < s_{max}, "Ok.", "Mod. s."), "-") = "-"$$



LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Losa Inferior Túnel en Forma de Arco

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

fy := 420 *MPa*

Es := 210000 *MPa*

1.2. Geometría.



Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

<i>h</i> :=220 <i>cm</i>	Altura losa.
<i>b</i> := 100 <i>cm</i>	Ancho losa.
<i>rec</i> := 5 <i>cm</i>	Recubrimiento.
$Aslat \coloneqq 0 \ \frac{cm^2}{m}$	Refuerzo superficial.

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

2.1. Solicitaciones

 $Mu_n \coloneqq 211 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$ $Mu_p \coloneqq 1291 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$

Solicitación máxima positiva. Apoyos

Solicitación máxima negativa. Centro.

Carga Axial y Momento en Apoyos de la Losa

C1:
$$1,2 D + 1,6 L + 1,6 H$$

C2: $1,2 D + 1,0 L + 1,6 H$
C3: $1,2 D + 1,0 L + 0,9 H$
C4: $1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E$
C5: $0,9 D + 1,2 H + 1,4 E$
 $Pu_1 \coloneqq \begin{bmatrix} 85\\110\\19\\57\\110\end{bmatrix} \frac{tonf}{m}$
 $Mu_1 \coloneqq \begin{bmatrix} 202\\136\\189\\211\\61\end{bmatrix} \frac{tonf \cdot m}{m}$

Carga Axial y Momento en Centro de la Losa

C1: C2: C3:	$\begin{array}{c} 1,2 \ D + 1,6 \ L + 1,6 \ H \\ 1,2 \ D + 1,0 \ L + 1,6 \ H \\ 1,2 \ D + 1,0 \ L + 0,9 \ H \\ 1,2 \ D + 1,0 \ L + 0,9 \ H \end{array}$	$Pu_2 \coloneqq$	$\begin{bmatrix} 80 \\ 106 \\ 15 \\$	$\frac{tonf}{m}$	$Mu_2 \coloneqq$	$ \begin{array}{r} 1291 \\ 1157 \\ 904 \end{array} $	$\frac{tonf \cdot m}{m}$
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E	2	54	m	2	1022	$m{m}$
C5:	0,9 <i>D</i> + 1,2 <i>H</i> + 1,4 E		$\lfloor 107 \rfloor$			695	

2.2. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

 $\phi_{bp_1} := 36 \text{ mm}$ $\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 36 \text{ mm}$ $\phi_{bp_3} := \phi_{bp_1} = 36 \text{ mm}$ $\phi_{bp_4} := \phi_{bp_1} = 36 \text{ mm}$

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Diámetro de la barra 4ta linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 35 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 175 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 175 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 175 \text{ mm}$$

$$s_{hp_4} := s_{hp_1} = 175 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.8 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 10.35 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 13.9 \text{ cm}$$

$$s_{capp_4} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{3 \cdot s_{vp}}{2} + \phi_{bp_2} = 17.45 \text{ cm}$$

Diámetro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} := 28 \text{ mm}$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 28 \text{ mm}$
 $\phi_{bn_3} := \phi_{bn_1} = 28 \text{ mm}$

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} := 65 \text{ mm}$$

 $s_{hn_1} := 150 \text{ mm}$
 $s_{hn_2} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$
 $s_{hn_3} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Separación entre barras refuerzo 4ta línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Distancia desde CG a borde de Capa 4.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea.

$$\begin{split} s_{capn_1} &\coloneqq rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.4 \ \textit{cm} \\ s_{capn_2} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 11.05 \ \textit{cm} \\ s_{capn_3} &\coloneqq rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 15.7 \ \textit{cm} \end{split}$$
 Distancia desde CG a borde de Capa 2.
Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Número de capas y altura efectiva de la sección.

$$n_p := 3$$
Número capas inferiores (M+) $n_n := 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$$d_p := h - s_{capp}_{n_p} = 206.1 \ cm$$
 Altura efectiva hasta barras inferiores.
 $d_p' := h - s_{capn}_{n_n} = 213.6 \ cm$ Altura efectiva hasta barras superiores

2.3. Cálculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 1291 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$\begin{aligned} As_{p} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 174.49 \frac{cm^{2}}{m} & \text{ Area de res} \\ a &:= \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 29.31 \ cm \\ Mn_{p} &:= As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 1430.72 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Momento} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 1287.65 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{ Momento} \\ rev_{21} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Rediseñar''} \\ FU &:= \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 1.00 & \text{ Factor de} \end{aligned}$$

Momento solicitante de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal negativo.

Momento nominal negativo reducido.

Factor de utilización.

2.4. Cálculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 211 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$As_{n} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 41.05 \frac{cm^{2}}{m} \qquad \text{ Are}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 6.89 \ cm$$

$$Mn_{n} \coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 369.47 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \qquad \text{ Mo}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{n} = 332.52 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \qquad \text{ Mo}$$

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{n} > Mu_{n}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$

$$FU \coloneqq \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{n}}{Mu_{n}} = 1.58 \qquad \text{ Fac}$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

Factor de utilización.

2.5. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.

7.6.1. Armadura mínima losas en una dirección. $As_{minf} := \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$ $As_{minf} \cdot h = 39.6 \frac{cm^2}{m}$ Cuantía mínima por cara

$$rev_{23} \coloneqq if(As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$$

 $rev_{24} \!\coloneqq\! \mathbf{if} \left(\! As_p \!\geq\! As_{minf} \!\cdot\! h, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) \!= \text{``Ok.''}$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.	7.7.2.3 Separación mínima de flexión losas.
$s_{max.f} \coloneqq min(3 \cdot h, 450 \text{ mm}) = 450 \text{ mm}$	
$rev_{25} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hp} \right) < s_{max.f}, "Ok", "Mod. s" \right) = "Ok$	"
$rev_{26} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hn} \right) < s_{max.f}, "Ok", "Mod. s" \right) = "Ok$	"

Distancia Libre entre Capas Horizontales

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.2$ Distancia libre entre capas horizontales.

$s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

 $d_{agg} \coloneqq 50 \ mm$

$rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras inferiores.
$rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras superiores.

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$ Distancia libre entre capas horizontales.

Tamaño nominal máximo del agregado grueso.

$$\begin{split} s_{hpmin} &\coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bp} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \\ rev_{29} &\coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hp} \right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revision barras inferiores.} \\ s_{hnmin} &\coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bn} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \\ rev_{210} &\coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hn} \right) < s_{hnmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revision barras superiores.} \end{split}$$

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

 $l_d \coloneqq \max\left(d_p, 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right)\right) = 206.1 \text{ cm}$

Largo de desarrollo en losa.

Se utilizará gancho en 90°.

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm
No. 10 a No. 25	$6d_b$
No. 29 a No. 36	8 <i>d</i> _b

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 36 \,\, \boldsymbol{mm}$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 28.8 \ \boldsymbol{cm}$

 $l_{ext} \coloneqq 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp}) = 43.2 \ cm$

lo en muro.



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

2.6. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

Condición de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} = 2182.27 \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &:= 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} = 1418.48 \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} = 2271.57 \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &:= 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} = 1476.52 \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{split} P_{n_{j}} &\coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{j} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k,j} \\ \phi_{j} &\coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_{b} \\ \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ 1 + \frac{2}{0.65 \cdot P_{b}} \end{array} \right\| \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.65 \\ 0.9$$

Cargas Axiales

 $\phi P_{n_j} \! \coloneqq \! \phi_j \! \cdot \! P_{n_j}$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

Gráfico de Interacción y vectores.

$$c_{j} = \begin{bmatrix} 7.33 \\ 14.67 \\ 22 \\ 29.33 \\ 36.67 \\ 44 \\ 51.33 \\ 58.67 \\ 66 \\ 73.33 \\ 80.67 \\ 88 \\ 95.33 \\ 102.67 \\ 110 \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3750.38 \\ -2364.23 \\ 402.43 \\ 1690.11 \\ 2867.28 \\ 3947.59 \\ 4942.53 \\ 5861.82 \\ 6713.78 \\ 7505.54 \\ 8303.59 \\ 9304.7 \\ 11306.91 \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kN \\ \phi M_{n_{j}} = \begin{bmatrix} 886.29 \\ 1028.72 \\ 1162.44 \\ 1269.66 \\ 1322.3 \\ 1362.58 \\ 1392.01 \\ 1411.89 \\ 1423.3 \\ 1427.18 \\ 1424.33 \\ 1425.78 \\ 1424.33 \\ 1425.78 \\ 1459.48 \\ 1459.48 \\ 1459.48 \\ 1459.48 \\ 1459.48 \\ 1459.48 \\ 1459.48 \\ 1459.48 \\ 1459.48 \\ 1486.9 \\ 1508.02 \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.9 \\ 0.9 \\ 0.9 \\ 0.9 \\ 0.9 \\ 0.9 \\ 0.89 \\ 0.85 \\ 0.85 \\ 0.81 \\ 0.72 \\ 0.69 \\ 0.67 \\ 0.65 \\ 0.65 \\ 0.65 \\ 0.65 \\ 0.65 \\ 0.65 \end{bmatrix}$$



3. DISEÑO A CORTE

3.1. Solicitaciones.

$$d_p = 206.1 \text{ cm}$$
$$Vu \coloneqq 332 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$
$$\phi_c \coloneqq 0.75$$
$$Nu \coloneqq 85 \text{ tonf}$$

3.2. Corte Nominal Hormigón.

$$\begin{split} Vc_{sax} &\coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \cdot d_p \\ Vc_{sax} &= 193.79 \ \frac{tonf}{m} \\ Vc_{comp} &\coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{14 \cdot h \cdot b} \right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p \\ Vc_{comp} &= 199.03 \ \frac{tonf}{m} \\ Vc_{trax} &\coloneqq 0.17 \cdot \left(1 \ MPa + \frac{Nu}{3.5 \cdot h \cdot b} \right) \cdot \sqrt{\frac{f'c}{MPa}} \cdot d_p \\ Vc_{trax} &\equiv 214.77 \ \frac{tonf}{m} \end{split}$$

 $Vc := Vc_{comp}$

$$Vc = 199.03 \frac{tonf}{m}$$

3.3. Altura mínima sección.

Altura efectiva sección.

Solicitación de Corte a dp de muro.

Factor reducción corte.

Carga axial (si Nu >0 \rightarrow compression).

Corte nominal sin carga axial.

Corte nominal con carga axial en compresión.

Corte nominal con carga axial en tracción.

Corte nominal Efectivo.

 $Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$ $d_{min} \coloneqq \left(\frac{Vu}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv 66.74 \text{ cm}$ $rev_{31} \coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''}$

Altura mínima efectiva de la sección.

3.4. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{Vu}{\phi_c} - Vc \qquad Vs_{min} = 243.63 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte nominal minimo acero.}$$

$$rev_{32} = \text{``Requiere Vs''}$$

$$\phi_{bc} \coloneqq 16 \text{ mm} \qquad \text{Diámetro estribo de acero .}$$

$$s_c \coloneqq 200 \text{ mm} \qquad \text{Espaciamiento}$$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{3}{m} \qquad \text{Número ramas por metro.}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^2\right) \cdot n_{rc} \qquad A_{vc} = 6.03 \frac{cm^2}{m} \qquad \text{Årea estribo por metro.}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_p}{s_c} \qquad Vs = 266.21 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal Acero.}$$

$$rev_{33} \coloneqq \text{if} (Vs > Vs_{min}, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}) = \text{``Ok''}$$

3.5. Corte Nominal Total

$Vn \coloneqq Vc + Vs$ $\phi Vn \coloneqq \phi_c \cdot Vn$	$Vn = 465.24 \frac{tonf}{m}$ $\phi Vn = 348.93 \frac{tonf}{m}$	Corte Nominal reducido.
$rev_{33} \coloneqq if(\phi Vn > Vu, "Ok", "R$	ediseñar") = "Ok"	
$FU_c \! \coloneqq \! \frac{\phi Vn}{Vu} \! = \! 1.05$		

3.6 Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{aligned} rev_{34} &= \text{``Verificar armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &:= \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \quad 9.6.3.3. \text{ Av minima de corte.} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 1.67 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &:= \text{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &:= \text{if} \left(Vs_{min} > 0, \text{if} \left(Vs \le 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``Ok''} \end{aligned}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

 $s_{max} := min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$

$$rev_{37} \coloneqq if(Vs_{min} > 0, if(s_c < s_{max}, "Ok.", "Mod. s."), "-") = "Ok."$$

MURO SEGÚN ACI 318 - 14 Muro-Arco Transversal Túnel en Forma de Arco

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

fy := 420 *MPa*

Es := 210000 *MPa*

$$\begin{array}{l} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.85 \\ \text{else if } f'c \geq 55 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.65 \\ \text{else} \\ \| 0.85 - \frac{0.05 \ (f'c - 28 \ \textbf{MPa})}{7 \ \textbf{MPa}} \\ \end{array} \right\|$$

1.2. Geometría.

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .



2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

2.1. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 39 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$
$$Mu_n \coloneqq 54 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Solicitación máxima positiva.

Solicitación máxima negativa.

 $Mu_1 \coloneqq$

45

40

25

8

 $Pu_1 \coloneqq 40$

tonf

m

36

40

20

39

34

 $tonf \cdot m$

 \boldsymbol{m}

Carga Axial y Momento Positiva.

C1: 1,2 D + 1,6 L + 1,6 H1,2 D + 1,0 L + 1,6 HC2: 1,2 D + 1,0 L + 0,9 HC3: 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 EC4: C5: 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E

Carga Axial y Momento Negativa.

C1:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H]	215			$\left[45\right]$	
C2:	1,2 D + 1,0 L + 1,6 H		187	tonf		25	tonf.m
C3:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H	$Pu_2 \coloneqq$	145		$Mu_2 \coloneqq$	55	
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E		158	m		54	\boldsymbol{m}
C5:	0,9 <i>D</i> + 1,2 <i>H</i> + 1,4 E	L	213			14	

2. Disposición Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

 $\phi_{bp_1}\!\!\coloneqq\!\!22~\pmb{mm}$ $\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 22 \ mm$ $\phi_{bp_3}\!\!\coloneqq\!\phi_{bp_1}\!\!=\!22~\textit{mm}$

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.1 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 10.45 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 14.8 \text{ cm}$$

Diámetro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} := 22 \ mm$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 22 \ mm$
 $\phi_{bn_3} := \phi_{bn_1} = 22 \ mm$

a .- 65 mm

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} := 05 \text{ mm}$$

$$s_{hn_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_2} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_3} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capn_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.1 \text{ cm}$$

$$s_{capn_2} := rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 10.45 \text{ cm}$$

$$s_{capn_3} := rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 14.8 \text{ cm}$$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Número de capas.

$$n_p \coloneqq 1$$
Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$$d_p := h - s_{capp}_{n_p} = 133.9 \ cm$$
 Altura efectiva hasta barras inferiores.
 $d_p' := h - s_{capn}_{n_p} = 133.9 \ cm$ Altura efectiva hasta barras superiores.

2.3. Cálculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 39 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
 Momento solicitante de diseño.
 $\phi_f := 0.9$ Factor de reducción de flexión.

Desarrollo

$$\begin{split} As_{p} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 25.34 \frac{cm^{2}}{m} & \text{Área de refuerzo a flexión.} \\ a &:= \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.26 \ cm \\ Mn_{p} &:= As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 143.02 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{Momento nominal negativo.} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 128.72 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{Momento nominal negativo reducido.} \\ rev_{21} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''} \\ FU &:= \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 3.30 & \text{Factor de utilización.} \end{split}$$

2.4. Cálculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 54 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$As_{n} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 25.34 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.26 \ cm$$

$$Mn_{n} \coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 143.02 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{n} = 128.72 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$max_{n} \coloneqq \frac{128.72}{m} \frac{tonf \cdot m}{m}$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_f \cdot Mn_n > Mu_n, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$
$$FU \coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_n}{Mu_n} = 2.38$$
Factor de utilización.

2.7. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión7.6.1. Armadura mínima losas
en una dirección.
24.4.3.2. Cuantía mínima de
retracción y temperatura. $As_{minf} := \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$ = 0.0018 $As_{minf} \cdot h = 25.2 \frac{cm^2}{m}$ Cuantía mínima por cara. $As_{minf} \cdot h = 25.2 \frac{cm^2}{m}$ Cuantía mínima por cara. $rev_{21} := if (As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."<math>rev_{22} := if (As_p \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.7.7.2.3 Separación mínima de flexión
losas. $s_{max.f} \coloneqq min (3 \cdot h, 450 mm) = 450 mm$ Espaciamiento máximo. $rev_{25} \coloneqq if (max (s_{hp}) < s_{max.f}, "Ok", "Mod. s") = "Ok"</td>$

$$rev_{26} \coloneqq if(max(s_{hn}) < s_{max.f}, "Ok", "Mod. s") = "Ok"$$

$$rev_{28} := if(s_{vn} < s_{vmin}, \text{"Mod. Svn", "Ok"}) = \text{"Ok"}$$
Revisión barras superiores.Distancia Libre entre Barras Paralelas. $7.7.2.1 \rightarrow 25.2.1$
Distancia libre entre capas horizontales. $d_{agg} := 50 \text{ mm}$ Tamaño nominal máximo del agregado
grueso. $s_{hpmin} := \max\left(25 \text{ mm}, \max(\phi_{bp}), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \text{ mm}$ Tamaño nominal máximo del agregado
grueso. $rev_{29} := if(min(s_{hp}) < s_{hpmin}, "Mod. Svp", "Ok") = "Ok"Revisión barras inferiores. $s_{hnmin} := \max\left(25 \text{ mm}, \max(\phi_{bn}), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \text{ mm}$ $rev_{210} := if(min(s_{hn}) < s_{hmmin}, "Mod. Svn", "Ok") = "OkRevisión barras superiores.Longitud Desarrollo Flexión $I_{d1} := \max\left(d_{p}, 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp})\right) = 133.9 \text{ cm}$ Largo de desarrollo en muro.Se utilizará gancho en 90°. $l_{dh} := \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{fc \cdot MPa}} \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp}), 8 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp}), 150 \text{ mm}\right)$
 $l_{dh} = 40.88 \text{ cm}$ Largo de desarrollo en losa.Diámetro de la
Diámetro de la
Diámet$$

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 22 \, mm$

$$D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 17.6 \ \boldsymbol{cm}$$

$$l_{ext} \coloneqq 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 26.4 \text{ cm}$$

Distancia Libre entre Capas Horizontales

 $rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$

 $s_{vmin} \coloneqq 25 \ mm$

Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

ℓ_{dh}

7.7.2.1→25.2.2 Distancia libre entre capas horizontales.

Revisión barras inferiores.

6. Diagrama de Interacción

Compresión Pura

$$P_{no} := 0.8 \cdot (0.85 \cdot f'c \cdot (h - As_n) + As_n \cdot fy) \qquad P_{no} = 2937.66 \frac{tonf}{m}$$

$$\phi P_{no} := 0.65 \cdot P_{no} \qquad \phi P_{no} = 1909.48 \frac{tonf}{m}$$

Condicion de Balance

$$\begin{split} P_b &\coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_b + \sum_{k=1}^n A_k \cdot fs_k \\ \phi P_b &\coloneqq 0.65 \cdot P_b \\ M_b &\coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_b \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_b}{2}\right) + \sum_{k=1}^n \left(A_k \cdot fs_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k\right)\right) \\ \phi M_b &\coloneqq 0.65 \cdot M_b \end{split}$$

$$P_b = 1635.74 \frac{tonf}{m}$$

$$\phi P_b = 1063.23 \frac{tonf}{m}$$

$$M_b = 754.94 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi M_b = 490.71 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

Variables auxiliares para la obtencion de "curva de interacción"

$$\begin{array}{l} \phi_{j} \coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.7 \cdot P_{b} \\ & \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ \hline 2 \cdot P_{n_{j}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \\ & \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ \hline 2 \cdot P_{n_{j}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{0.65 \cdot P_{b}} \end{array} \right\| \\ & \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ \hline 0$$

Factor de Reducción de Resistencia

Cargas Axiales

$$\phi P_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot P_{n_j}$$

Momentos

$$\phi M_{n_j} := \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

$c_j =$	$\begin{array}{c} 5.6\\ 11.2\\ 16.8\\ 22.4\\ 28\\ 33.6\\ 39.2\\ 44.8\\ 50.4\\ 56\\ 61.6\\ 67.2\\ 72.8\\ 78.4\\ 84\\ \vdots \end{array}$	cm	$\phi P_{n_j} =$	$\begin{array}{c} 950.14\\ 1853.94\\ 2669.38\\ 3408.8\\ 4082.37\\ 4698.51\\ 5310.19\\ 6074.67\\ 6839.15\\ 7603.64\\ 8368.12\\ 9132.6\\ 9897.09\\ 10699.52\\ 11576.78\\ \vdots \end{array}$	$\frac{kN}{m}$	$\phi M_{n_j} =$	$\begin{bmatrix} 183.85\\ 235.55\\ 277.84\\ 312.06\\ 339.26\\ 360.36\\ 379.38\\ 406.45\\ 429.85\\ 449.59\\ 465.66\\ 478.07\\ 486.8\\ 489.64\\ 484.4\\ \vdots\\ \end{bmatrix}$	$rac{tonf \cdot m}{m}$	$\phi_j =$	$\begin{bmatrix} 0.85 \\ 0.81 \\ 0.77 \\ 0.73 \\ 0.67 \\ 0.65 $
---------	---	----	------------------	--	----------------	------------------	---	-------------------------	------------	---



3. DISEÑO A CORTE FUERA DEL PLANO.

3.1. Geometría.



En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.2. Solicitaciones.

$$V_u \coloneqq 210 \frac{tonf}{m}$$
Co
$$\phi_c \coloneqq 0.75$$
Fac

3.3. Corte Nominal Hormigón.

$$Vc \coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \cdot d_p$$
$$Vc \equiv 125.9 \frac{tonf}{m}$$

3.4. Altura mínima sección.

$$Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$$

$$d_{min} \coloneqq \left(\frac{V_u}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv 42.21 \text{ cm}$$

$$rev_{31} \coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''}$$

Altura mínima efectiva de la sección.

Corte a dx de la losa.

Factor reducción corte.

Corte nominal Efectivo.

3.5. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{V_u}{\phi_c} - Vc = 154.1 \frac{tonf}{m}$$

 rev_{32} = "Requiere Vs"

$$\phi_{bc} \coloneqq 16 \ mm$$

$$s_{c} \coloneqq 275 \ mm$$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{4}{m}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^{2}\right) \cdot n_{rc} \equiv 8.04 \ \frac{cm^{2}}{m}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_{p}}{s_{c}} = 167.71 \ \frac{tonf}{m}$$

Corte nominal mínimo acero.

Diámetro estribo de acero .

Espaciamiento

Número ramas por metro.

Área estribo por metro.

Corte Nominal Acero.

 $rev_{32}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!V\!s\!\!>\!\!V\!s_{\!m\!in}\,,\text{``Ok''}\,,\text{``Rediseñar''}\!\right)\!=\!\text{``Ok''}$

3.6. Corte Nominal Total

$Vn \coloneqq Vc + Vs$	$Vn = 293.61 \frac{tonf}{m}$	
$\phi V n \coloneqq \phi_c \cdot V n$	$\phi Vn = 220.21 \ rac{tonf}{m}$	Corte Nominal reducido.
$rev_{33} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi Vn > V_u, \text{``Ok''} \right)$, "Rediseñar") = "Ok"	
$FU_c \!\coloneqq\! \frac{\phi Vn}{V_u} \!=\! 1.05$		

3.6. Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{aligned} rev_{34} &= \text{``Verificar armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &\coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \quad 9.6.3.3. \text{ Av minima de corte.} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 2.29 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &\coloneqq \text{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &\coloneqq \text{if} \left(Vs_{min} > 0, \text{if} \left(Vs \leq 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``Ok''} \end{aligned}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

$$s_{max} \coloneqq min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$$

$$rev_{37} := if(Vs_{min} > 0, if(s_c < s_{max}, "Ok.", "Mod. s."), "-") = "Ok."$$

3.7. Malla Transversal.

$$\rho_{t} := \mathbf{if} \left(V_{u} \le 0.5 \cdot \phi_{c} \cdot Vc, 0.0020, 0.0025 \right) = 0.0025$$

$$\rho_{t} := \mathbf{if} \left(A_{vc} < \rho_{t} \cdot h, \rho_{t}, A_{vc} \right) = 0.0025$$

$$\rho_{t} := \mathbf{if} \left(A_{vc} < \rho_{t} \cdot h, \rho_{t}, A_{vc} \right) = 0.0025$$

$$\rho_{t} \cdot h = 35 \frac{cm^{2}}{m}$$

 $rev_{38}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!\rho_t\!\cdot\!h\!<\!\!As_p\!+\!As_n, \text{``Ok.''}, \text{``Mod. As.''}\!\right)\!=\!\text{``Ok.''}$

MURO SEGÚN ACI 318 - 14 Muro Transversal Túnel en Forma de Arco

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

fy := 420 *MPa*

Es := 210000 *MPa*

$$\begin{array}{l} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \; \textit{MPa} \\ & \parallel 0.85 \\ & \text{else if } f'c \geq 55 \; \textit{MPa} \\ & \parallel 0.65 \\ & \text{else} \\ & \parallel 0.85 - \frac{0.05 \; (f'c - 28 \; \textit{MPa})}{7 \; \textit{MPa}} \end{array} = 0.84$$

1.2. Geometría.

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .



$h \coloneqq 140 \ \mathbf{cm}$	Altura Sección
$b := 100 \ cm$	Ancho Muro
<i>rec</i> := 5 <i>cm</i>	Recubrimiento
$Aslat \coloneqq 0 \frac{cm^2}{m}$	Refuerzo superficial.
$l_w \coloneqq 75 \ m$	Largo del muro.
$h_w \coloneqq 7 \boldsymbol{m}$	Altura muro.

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

2.1. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 22 \frac{\textit{tonf} \cdot m}{m}$$
$$Mu_n \coloneqq 89 \frac{\textit{tonf} \cdot m}{m}$$

Solicitación máxima positiva.

Solicitación máxima negativa.

Carga Axial y Momento Positiva.

C1:	1.2 D + 1.6 L + 1.6 H		
C2:	1.2 D + 1.0 L + 1.6 H	$Pu_{\star} := [97] \frac{tonf}{tonf}$	$Mu_{*} = [22] \frac{tonf \cdot m}{2}$
C3:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H	m	$m_1 = [22]$ m
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E		
C5:	0,9 D + 1,2 H + 1,4 E		

Carga Axial y Momento Negativa.

C1: C2: C3: C4:	$\begin{array}{l} 1,2 \ D + 1,6 \ L + 1,6 \ H \\ 1,2 \ D + 1,0 \ L + 1,6 \ H \\ 1,2 \ D + 1,0 \ L + 0,9 \ H \\ 1,2 \ D + 1,0 \ L + 1,2 \ H + 1,4 \ E \end{array}$	$Pu_2 \coloneqq$	$\begin{bmatrix} 145 \\ 155 \\ 130 \\ 129 \end{bmatrix}$	$\frac{tonf}{m}$	Mu_2 :=	81 89 75 83	ton
C4: C5:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 L 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E		$\begin{bmatrix} 129\\ 87 \end{bmatrix}$			$\frac{83}{58}$	

2. Disposición Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

 $\phi_{bp_1} := 22 \text{ mm}$ $\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 22 \text{ mm}$ $\phi_{bp_3} := \phi_{bp_1} = 22 \text{ mm}$ Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

 $\frac{nf \cdot m}{m}$

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.1 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 10.45 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 14.8 \text{ cm}$$

Diámetro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} := 22 \ mm$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 22 \ mm$
 $\phi_{bn_3} := \phi_{bn_1} = 22 \ mm$

0 - 65 mm

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} := 05 \text{ mm}$$

$$s_{hn_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_2} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_3} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capn_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.1 \text{ cm}$$

$$s_{capn_2} := rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 10.45 \text{ cm}$$

$$s_{capn_3} := rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 14.8 \text{ cm}$$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Número de capas.

$$n_p \coloneqq 1$$
Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$$d_p := h - s_{capp}_{n_p} = 133.9 \ cm$$
 Altura efectiva hasta barras inferiores.
 $d_p' := h - s_{capn}_{n_p} = 133.9 \ cm$ Altura efectiva hasta barras superiores.

2.3. Cálculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 22 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
 Momento solicitante de diseño.
 $\phi_f := 0.9$ Factor de reducción de flexión.

Desarrollo

$$\begin{split} As_{p} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 25.34 \frac{cm^{2}}{m} & \text{Area de refuerzo a flexión.} \\ a &:= \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.26 \ cm \\ Mn_{p} &:= As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 143.02 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{Momento nominal negativo.} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 128.72 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{Momento nominal negativo reducido.} \\ rev_{21} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''} \\ FU &:= \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 5.85 & \text{Factor de utilización.} \end{split}$$

2.4. Cálculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 89 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$As_{n} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 25.34 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.26 \ cm$$

$$Mn_{n} \coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p'} - \frac{a}{2} \right) = 143.02 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{n} = 128.72 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Factor de utilización.

Momento nominal positivo reducido.

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_f \cdot Mn_n > Mu_n, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$
$$FU \coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_n}{Mu_n} = 1.45$$

2.7. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión

$$As_{minf} := \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$$
$$As_{minf} \cdot h = 25.2 \frac{cm^2}{m}$$

7.6.1. Armadura mínimalosas en una dirección.24.4.3.2. Cuantía mínima deretracción y temperatura.

Cuantía mínima por cara.

$$rev_{21} \coloneqq \mathbf{if} \left(As_n \ge As_{minf} \cdot h, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$

 $rev_{22} \coloneqq if(As_p \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.	7.7.2.3 Separación mínima de flexión losas.
$s_{max.f} \coloneqq min(3 \cdot h, 450 \ mm) = 450 \ mm$	Espaciamiento máximo.
$rev_{25} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hp} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	
$rev_{26} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hn} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	
Distancia Libre entre Capas Horizontales	7.7.2.1→25.2.2 Distancia libre entre capas horizontales.
$s_{vmin} \coloneqq 25 mm$	

- $rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$ $rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$
- Distancia Libre entre Barras Paralelas.

 $d_{agg} \coloneqq 50 \ mm$

7.7.2.1→25.2.1 Distancia libre entre capas horizontales.

Revisión barras inferiores.

Revisión barras superiores.

Tamaño nominal máximo del agregado grueso. $s_{hpmin} \coloneqq \max\left(25 \ \boldsymbol{mm}, \max\left(\phi_{bp}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \boldsymbol{mm}$ $rev_{29} \coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hp} \right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$ Revisión barras inferiores.

 $s_{hnmin} \coloneqq \max\left(25 \ \boldsymbol{mm}, \max\left(\phi_{bn}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \boldsymbol{mm}$ $rev_{210} \coloneqq if(min(s_{hn}) < s_{hnmin}, "Mod. Svn", "Ok") = "Ok"$

Revisión barras superiores.

276

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

$$l_d := \max(d_p, 12 \cdot \max(\phi_{bn}, \phi_{bp})) = 133.9 \text{ cm}$$

Largo de desarrollo en muro.

Se utilizará gancho en 90°.

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm
No. 10 a No. 25	$6d_b$
No. 29 a No. 36	$8d_b$

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 22 \, \, mm$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 17.6 \ \textbf{cm}$

 $l_{ext} \coloneqq 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 26.4 \text{ cm}$

collo en losa.



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.
6. Diagrama de Interacción

Compresión Pura

$$P_{no} := 0.8 \cdot (0.85 \cdot f'c \cdot (h - As_n) + As_n \cdot fy)$$

$$P_{no} = 2937.66 \frac{tonf}{m}$$

$$\phi P_{no} := 0.65 \cdot P_{no}$$

$$\phi P_{no} = 1909.48 \frac{tonf}{m}$$

Condicion de Balance

$$\begin{split} P_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} \\ M_{b} &:= 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) \\ M_{b} &= 754.94 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de "curva de interacción"

$$\begin{split} \phi_{j} &:= \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.7 \cdot P_{b} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \\ 1 + \frac{0.65 \cdot P_{b}}{2 \cdot P_{b}} \\ \end{split} \right\| \begin{pmatrix} \phi_{j} \\ \phi_{j$$

Cargas Axiales

$$\phi P_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot P_{n_j}$$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

$c_j =$	$\begin{bmatrix} 5.6\\ 11.2\\ 16.8\\ 22.4\\ 28\\ 33.6\\ 39.2\\ 44.8\\ 50.4\\ 56\\ 61.6\\ 67.2\\ 72.8\\ 78.4\\ 84\\ \end{bmatrix}$	cm	$\phi P_{n_j} =$	$\begin{array}{r} 950.14\\ 1853.94\\ 2669.38\\ 3408.8\\ 4082.37\\ 4698.51\\ 5310.19\\ 6074.67\\ 6839.15\\ 7603.64\\ 8368.12\\ 9132.6\\ 9897.09\\ 10699.52\\ 11576.78\end{array}$	$rac{kN}{m}$	$\phi M_{n_j} =$	$\begin{bmatrix} 183.85\\ 235.55\\ 277.84\\ 312.06\\ 339.26\\ 360.36\\ 379.38\\ 406.45\\ 429.85\\ 449.59\\ 465.66\\ 478.07\\ 486.8\\ 489.64\\ 484.4\\ \end{bmatrix}$	$rac{tonf \cdot m}{m}$	$\phi_j =$	$\begin{bmatrix} 0.85 \\ 0.81 \\ 0.77 \\ 0.73 \\ 0.67 \\ 0.65 $
	78.4 84 •			$10699.52 \\ 11576.78 \\ \cdot$			$\begin{array}{c}489.64\\484.4\\\cdot\end{array}$			0.65 0.65
				L :]			[:]			[:]



3. DISEÑO A CORTE FUERA DEL PLANO.

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Geometría.



En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.2. Solicitaciones.

$$V_u \coloneqq 78 \frac{tonf}{m}$$
$$\phi_c \coloneqq 0.75$$

Corte a dx de la losa.

Factor reducción corte.

Corte nominal Efectivo.

3.3. Corte Nominal Hormigón.

$$Vc \coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \cdot d_p$$
$$Vc \equiv 125.9 \ \frac{tonf}{m}$$

3.4. Altura mínima sección.

$$Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa}$$

$$d_{min} \coloneqq \left(\frac{V_u}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} \equiv -6 \ cm \qquad \text{Altura mínima efectiva de la sección.}$$

$$rev_{31} \coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''}$$

3.5. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{V_u}{\phi_c} - Vc = -21.9 \frac{tonf}{m}$$

 rev_{32} = "No requiere Vs"

$$\phi_{bc} \coloneqq 16 \ \mathbf{mm}$$

 $s_c \coloneqq 275 \ mm$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{4}{m}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^{2}\right) \cdot n_{rc} = 8.04 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_{p}}{s_{c}} = 167.71 \frac{tonf}{m}$$

Corte nominal mínimo acero.

Diámetro estribo de acero .

Espaciamiento

Número ramas por metro.

Área estribo por metro.

Corte Nominal Acero.

 $rev_{32}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!Vs\!>\!Vs_{min}, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}\!\right)\!=\!\text{``Ok''}$

3.6. Corte Nominal Total

$Vn \coloneqq Vc + Vs$	$Vn = 293.61 \ \frac{tonf}{m}$	
$\phi V n \coloneqq \phi_c \cdot V n$	$\phi Vn = 220.21 \; rac{tonf}{m}$	Corte Nominal reducido.
$rev_{33} \coloneqq if \left(\phi Vn > V_u, "O t \right)$	k", "Rediseñar") = "Ok"	
$FU_c \! \coloneqq \! \frac{\phi Vn}{V_u} \! = \! 2.82$		

3.6. Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{split} rev_{34} &= \text{``No requiere armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &\coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \quad 9.6.3.3. \text{ Av minima de corte.} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 2.29 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &\coloneqq \text{if } \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &\coloneqq \text{if } \left(Vs_{min} > 0, \text{if } \left(Vs \le 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}\right), \text{``-''}\right) = \text{``-''} \end{split}$$

Espaciamiento Mínimo Estribos

$$s_{max} \coloneqq min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$$

$$rev_{37} := if(Vs_{min} > 0, if(s_c < s_{max}, "Ok.", "Mod. s."), "-") = "-"$$

3.7. Malla Transversal.

$$\begin{split} \rho_t &:= \mathbf{if} \left(V_u \le 0.5 \cdot \phi_c \cdot Vc \,, 0.0020 \,, 0.0025 \right) = 0.0025 & |\rho_t| \\ \rho_t &:= \mathbf{if} \left(A_{vc} < \rho_t \cdot h \,, \rho_t \,, A_{vc} \right) = 0.0025 & \mathbf{ho} \\ \rho_t \cdot h &= 35 \, \frac{cm^2}{m} \\ rev_{38} &:= \mathbf{if} \left(\rho_t \cdot h < As_p + As_n \,, \text{``Ok.''} \,, \text{``Mod. As.''} \right) = \text{``Ok.'''} \end{split}$$

 ρ_l : cuantía de refuerzo vertical (|). ρ_t : cuantía de refuerzo horizontal (-).



LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Losa Superior Transversal Túnel en Forma de Arco

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales.

 $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$

 $fy \coloneqq 420 \ MPa$

$$Es \coloneqq 210000 \ MPa$$

$$\begin{array}{l} \beta_{1} \coloneqq \text{if } f'c \leq 28 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.85 \\ \text{else if } f'c \geq 55 \ \textbf{MPa} \\ \| 0.65 \\ \text{else} \\ \| 0.85 - \frac{0.05 \ (f'c - 28 \ \textbf{MPa})}{7 \ \textbf{MPa}} \\ \end{array} \right\|$$

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

2.1. Geometría.

b := 100 *cm*

h≔140 *cm*

$$rec \coloneqq 5 \ cm$$

$$Aslat \coloneqq 0 \ \frac{cm^2}{m}$$





2.2. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 115 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$
$$Mu_n \coloneqq 30 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Carga Axial y Momento Positiva.

1,2 D + 1,6 L + 1,6 H C1: 1,2 D + 1,0 L + 1,6 HC2: 1,2 D + 1,0 L + 0,9 HC3: 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 EC4: 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E C5:

Carga Axial y Momento Negativa.

C1:	1,2 D + 1,6 L + 1,6 H		
C2:	1,2 D + 1,0 L + 1,6 H		1
C3:	1,2 D + 1,0 L + 0,9 H	$Pu_2 \coloneqq [315] \frac{tonf}{dt}$	$Mu_2 \coloneqq [30] \frac{tonf}{dt}$
C4:	1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E	<i>¹ m</i>	- ' ' <i>m</i>
C5:	0,9 D + 1,2 H + 1,4 E		

350

330

315

255

 $Pu_1 \coloneqq |275$

tonf

 \boldsymbol{m}

2.3. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

 $\phi_{bp_1}\!\!\coloneqq\!\!22~\pmb{mm}$ $\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 22 \, mm$ $\phi_{bp_3} \! := \! \phi_{bp_1} \! = \! 22 \, mm$ Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

 $Mu_1 \coloneqq$

Solicitación máxima negativa.

115

65

110

98

15

 \boldsymbol{m}

 \boldsymbol{m}

Solicitación máxima positiva.

$Pu_2 \coloneqq [315] \frac{tonf}{m} Mu$	$u_2 \coloneqq [30] \frac{tonf \cdot m}{m}$
--	---

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.1 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 10.45 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 14.8 \text{ cm}$$

Diametro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} := 22 \text{ mm}$$

 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 22 \text{ mm}$
 $\phi_{bn_2} := \phi_{bn_1} = 22 \text{ mm}$

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hn_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_2} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_3} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capn_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.1 \text{ cm}$$

$$s_{capn_2} := rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 10.45 \text{ cm}$$

$$s_{capn_3} := rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 14.8 \text{ cm}$$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3. Numero de capas.

$$n_p \coloneqq 1$$
Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$$d_p := h - s_{capp}_{n_p} = 133.9 \ cm$$
 Altura efectiva hasta barras inferiores.
 $d_p' := h - s_{capn}_{n_p} = 133.9 \ cm$ Altura efectiva hasta barras superiores.

2.4. Calculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 115 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
 Momento solicitante de diseño.
 $\phi_f := 0.9$ Factor de reducción de flexión.

Desarrollo

$$\begin{split} As_{p} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 25.34 \frac{cm^{2}}{m} & \text{Área de refuerzo a flexión.} \\ a &:= \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.26 \ cm \\ Mn_{p} &:= As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 143.02 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{Momento nominal negativo.} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 128.72 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{Momento nominal negativo reducido} \\ rev_{21} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.'''} \\ FU &:= \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 1.12 & \text{Factor de utilización.} \end{split}$$

2.5. Calculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 30 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$As_{n} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 25.34 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 4.26 \ cm$$

$$Mn_{n} \coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 143.02 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{n} = 128.72 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Momento nominal positivo reducido.

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_f \cdot Mn_n > Mu_n, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$

 $FU \coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_n}{Mu_n} = 4.29$ Factor de utilización.

2.7. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.

$$As_{minf} \coloneqq \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$$
$$As_{minf} \cdot h = 25.2 \frac{cm^2}{m}$$

7.6.1. Armadura mínima losas en una dirección.24.4.3.2. Cuantía mínima de retracción y temperatura.

Cuantía mínima por cara.

$$rev_{23} \coloneqq if(As_n \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$$

$$rev_{24} \! \coloneqq \! \mathbf{if} \left(\! As_p \! \geq \! As_{minf} \! \cdot \! h \,, \text{``Ok.''} , \text{``Rediseñar''} \right) \! = \text{``Ok.''}$$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.	7.7.2.3 Separación mínima flexión losas.
$s_{max.f} \coloneqq min(3 \cdot h, 450 \ mm) = 450 \ mm$	
$rev_{25} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hp} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	
$rev_{26} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hn} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	
Distancia Libre entre Capas Horizontales	7.7.2.1→25.2.2 Distancia libre entre capas horizontales.
s_{vmin} := 25 mm	
$rev_{27} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vp} \! < \! s_{vmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) \! = \text{``Ok''}$	Revisión barras superiores.
$rev_{28} \coloneqq \mathbf{if} \left(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''}$	Revisión barras inferiores.

Distancia Libre entre Barras Paralelas.

7.7.2.1→25.2.1 Distancia libre entre capas horizontales.

Tamaño nominal máximo del agregado grueso.

$$\begin{aligned} d_{agg} &\coloneqq 50 \ \textit{mm} \end{aligned} \qquad \text{Tamaño nominal máximo del agregado ge} \\ s_{hpmin} &\coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bp} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \end{aligned} \\ rev_{29} &\coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hp} \right) < s_{hpmin}, \text{``Mod. Svp''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras superiores.} \\ s_{hnmin} &\coloneqq \max \left(25 \ \textit{mm}, \max \left(\phi_{bn} \right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg} \right) = 37.5 \ \textit{mm} \end{aligned} \\ rev_{210} &\coloneqq \mathbf{if} \left(min \left(s_{hn} \right) < s_{hnmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''} \right) = \text{``Ok''} \qquad \text{Revisión barras inferiores.} \end{aligned}$$

7.7.3.3.

$$l_d \coloneqq \max\left(d_p, 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right)\right) = 133.9 \ \textit{cm}$$

Largo de desarrollo en losa.

Se utilizará gancho en 90°.

$$\begin{split} l_{dh} &\coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ } \textbf{\textit{mm}}\right) \\ l_{dh} &= 40.88 \text{ } \textbf{\textit{cm}} \end{split}$$
 Largo de desa

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm		
No. 10 a No. 25	6 <i>d</i> _b		
No. 29 a No. 36	8 <i>d</i> _b		

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 22 \, mm$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 17.6 \ \boldsymbol{cm}$

 $l_{ext} \coloneqq 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 26.4 \text{ cm}$

 $_{p}$, 150 mm





Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

2.8. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

$$\begin{aligned} A_{st} &:= As_{p} + As_{n} = 50.68 \ \frac{cm^{2}}{m} \\ P_{no} &:= 0.80 \cdot (0.85 \cdot f'c \cdot (h - A_{st}) + A_{st} \cdot fy) \\ \phi P_{no} &:= 0.65 \cdot P_{no} \end{aligned} \qquad \qquad P_{no} = 3019.32 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{no} &= 1962.56 \ \frac{tonf}{m} \end{aligned}$$

Condición de Balance

$$\begin{split} P_{b} &\coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} &\equiv 1635.74 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &\coloneqq 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} &\equiv 1063.23 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &\coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} &\equiv 754.94 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &\coloneqq 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} &\equiv 490.71 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{split} P_{n_{j}} &\coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{j} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k,j} \\ \phi_{j} &\coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_{b} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \right\|_{1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h}} \\ \text{else} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \right\|_{1 + \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}}} \\ \text{else} \\ \left\| \frac{0.9}{2 \cdot P_{n_{j}}} \right\|_{1 + \frac{0.65 \cdot P_{b}}{2 \cdot P_{b}}} \end{split} \qquad \begin{aligned} \phi_{j} &\coloneqq \text{if } \phi_{j} < 0.65 \\ \left\| 0.65 \\ \text{else} \right\| \phi_{j} > 0.9 \\ \text{else} \\ \left\| \phi_{j} \right\| \end{aligned} \qquad \begin{aligned} Factor \ de \ Reducción \ de \ Resistencia \end{aligned}$$

Cargas Axiales

 $\phi P_{n_j} \! \coloneqq \! \phi_j \! \cdot \! P_{n_j}$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

Gráfico de Interacción y vectores.



3. DISEÑO A CORTE

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Solicitaciones.

$$d_p = 133.9 \ cm$$

$$Vu \coloneqq 183 \frac{cong}{m}$$
$$\phi_c \coloneqq 0.75$$

3.2. Corte Nominal Hormigón.

$$Vc \coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \cdot d_p$$
$$Vc \equiv 125.9 \frac{tonf}{m}$$

3.3. Altura mínima sección.

$$\begin{split} Vcx &\coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \\ d_{min} &\coloneqq \left(\frac{Vu}{\phi_c} - Vc\right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} = 32.35 \ \textit{cm} \\ rev_{31} &\coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \leq d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''}\right) = \text{``Ok''} \end{split}$$

3.4. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{Vu}{\phi_c} - Vc = 118.1 \frac{tonf}{m}$$

 rev_{32} = "Requiere Vs"

 $\phi_{bc} \coloneqq 16 \ \mathbf{mm}$

$$s_c \coloneqq 275 \ mm$$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{3}{m}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}^{2}\right) \cdot n_{rc} = 6.03 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_{p}}{s_{c}} = 125.78 \frac{tonf}{m}$$

 $rev_{32}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!Vs\!>\!Vs_{min}, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}\!\right)\!=\!\text{``Ok''}$

Altura efectiva sección.

Solicitacion de corte a **d** del muro.

Factor reducción corte.

Corte nominal sin carga axial.

Diámetro estribo de acero.

Corte nominal mínimo acero.

Espaciamiento

Número ramas por metro.

Area estribo doble por1m trans.

Corte Nominal Acero.

3.5. Corte Nominal Total

$$Vn \coloneqq Vc + Vs \qquad Vn \equiv 251.69 \frac{tonf}{m}$$

$$\phi Vn \coloneqq \phi_c \cdot Vn \qquad \phi Vn \equiv 188.76 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal reducido.}$$

$$rev_{33} \coloneqq \text{if} (\phi Vn > Vu, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}) \equiv \text{``Ok''}$$

$$FU_c \coloneqq \frac{\phi Vn}{Vu} \equiv 1.03$$

3.6 Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

$$\begin{aligned} rev_{34} &= \text{``Verificar armadura mı́nima''} \\ Av_{min} &\coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \quad 9.6.3.3. \text{ Av min corte} \\ Av_{min} \cdot s_c &= 2.29 \ \frac{cm^2}{m} \\ rev_{35} &\coloneqq \text{if } (A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}) = \text{``Ok''} \\ rev_{36} &\coloneqq \text{if } (Vs_{min} > 0, \text{if } (Vs \leq 4 \ Vc, \text{``Ok''}, \text{``Modificar Vs''}), \text{``-''}) = \text{``Ok''} \end{aligned}$$

Espaciamiento mínimo

 $s_{max} \coloneqq min (450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$

$$rev_{37} \coloneqq if(Vs_{min} > 0, if(s_c < s_{max}, "Ok.", "Mod. s."), "-") = "Ok."$$

LOSA SEGÚN ACI 318 - 14 Losa Inferior Transversal Túnel en Forma de Arco

1. GENERALIDADES.

1.1. Materiales. $f'c := 300 \frac{kgf}{cm^2} = 29.42 MPa$ $Ec := 4700 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} = 25492.88 MPa$ fy := 420 MPa Es := 210000 MPa $\beta_1 := \text{if } f'c \le 28 MPa$ $\| 0.85$ $else \text{ if } f'c \ge 55 MPa$ $\| 0.65$ else $\| 0.85 - \frac{0.05 (f'c - 28 MPa)}{7 MPa} \|$

Resistencia del hormigón H35.

Módulo de elasticidad del hormigón.

Resistencia del acero de refuerzo.

Módulo de elasticidad del acero.

Factor β_1 .

2. DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN.

Se considera como losa en una dirección o como viga larga debido a sus dimensiones.

2.1. Geometría.



 $b \coloneqq 100 \ \textit{cm}$

 $rec := 5 \ cm$

$$Aslat \coloneqq 0 \frac{cm}{m}$$

Altura Losa
Ancho losa
Recubrimiento



2.2. Solicitaciones

$$Mu_p \coloneqq 85 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$
$$Mu_n \coloneqq 215 \frac{\textit{tonf} \cdot \textit{m}}{\textit{m}}$$

Carga Axial y Momento Positiva.

C1: 1,2 D + 1,6 L + 1,6 HC2: 1,2 D + 1,0 L + 1,6 HC3: 1,2 D + 1,0 L + 0,9 HC4: 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 EC5: 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E

Carga Axial y Momento Negativa.

1,2D + 1,0L + 1,0H	
C2: $1,2 D + 1,0 L + 1,6 H$	
C3: $1,2 D + 1,0 L + 0,9 H$	
C4: $1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1$,4 E
C5: 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E	

2.3. Disposición del Refuerzo.

Diametro Barras Inferiores. (M+)

$\phi_{bp_1} = 28 \mathbf{mm}$	
$\phi_{bp_2} := \phi_{bp_1} = 28$	3 mm
$\phi_{bp_3} = \phi_{bp_1} = 28$	3 mm

Solicitación máxima positiva.

Solicitación máxima negativa.



$Pu2 \coloneqq$	$\begin{bmatrix} 62 \\ 67 \\ 36 \\ 46 \end{bmatrix}$	$\left rac{tonf}{m} ight $	$Mu2 \coloneqq$	215185200205	$rac{tonf \cdot m}{m}$
	$\left[\begin{array}{c} 46 \\ 55 \end{array} \right]$			$\begin{array}{c} 205\\ 106 \end{array}$	

Diámetro de la barra principal. 1ra linea.

Diámetro de la barra 2da linea.

Diámetro de la barra 3ra linea.

Espaciamiento Barras Inferiores.(M+)

$$s_{vp} := 65 \text{ mm}$$

$$s_{hp_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_2} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hp_3} := s_{hp_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capp_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bp_1} = 6.4 \text{ cm}$$

$$s_{capp_2} := rec + \phi_{bp_1} + \frac{s_{vp}}{2} = 11.05 \text{ cm}$$

$$s_{capp_3} := rec + \phi_{bp_1} + s_{vp} + 0.5 \cdot \phi_{bp_2} = 15.7 \text{ cm}$$

Diametro Barras Superiores.(M-)

$$\phi_{bn_1} = 28 \ mm$$

 $\phi_{bn_2} = \phi_{bn_1} = 28 \ mm$
 $\phi_{bn_3} = \phi_{bn_1} = 28 \ mm$

0 - 65 mm

Espaciamiento Barras Superiores. (M-)

$$s_{vn} := 05 \text{ mm}$$

$$s_{hn_1} := 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_2} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{hn_3} := s_{hn_1} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{capn_1} := rec + 0.5 \cdot \phi_{bn_1} = 6.4 \text{ cm}$$

$$s_{capn_2} := rec + \phi_{bn_1} + \frac{s_{vn}}{2} = 11.05 \text{ cm}$$

$$s_{capn_3} := rec + \phi_{bn_1} + 0.5 \cdot \phi_{bn_2} + s_{vn} = 15.7 \text{ cm}$$

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Diámetro de la barra 1ra línea. Diámetro de la barra 2da línea. Diámetro de la barra 3ra línea.

Distancia vertical entre capas de barras. Separación entre barras refuerzo 1ra línea. Separación entre barras refuerzo 2da línea. Separación entre barras refuerzo 3ra línea. Distancia desde CG a borde de Capa 1. Distancia desde CG a borde de Capa 2. Distancia desde CG a borde de Capa 3.

Numero de capas

$$n_p \coloneqq 1$$
Número capas inferiores (M+) $n_n \coloneqq 1$ Número capas superiores (M-)

Altura efectivas sección.

$$d_p := h - s_{capp}_{n_p} = 213.6 \ cm$$
 Altura efectiva hasta barras inferiores.
 $d_p' := h - s_{capn}_{n_p} = 213.6 \ cm$ Altura efectiva hasta barras superiores.

2.4. Calculo Momento Nominal Positivo (M+). Barras Inferiores.

$$Mu_p = 85 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
 Momento solicitante de diseño.
 $\phi_f := 0.9$ Factor de reducción de flexión.

Desarrollo

$$\begin{split} As_{p} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{p}} \left(\phi_{bp_{i}}^{2} \cdot s_{hp_{i}}^{-1} \right) = 41.05 \frac{cm^{2}}{m} & \text{Area de refuerzo a flexión.} \\ a &:= \frac{As_{p} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 6.89 \ cm \\ Mn_{p} &:= As_{p} \cdot fy \cdot \left(d_{p} - \frac{a}{2} \right) = 369.47 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{Momento nominal negativo.} \\ \phi_{f} \cdot Mn_{p} &= 332.52 \ \frac{tonf \cdot m}{m} & \text{Momento nominal negativo reducido.} \\ rev_{21} &:= \mathbf{if} \left(\phi_{f} \cdot Mn_{p} > Mu_{p}, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''} \\ FU &:= \frac{\phi_{f} \cdot Mn_{p}}{Mu_{p}} = 3.91 & \text{Factor de utilización.} \end{split}$$

2.5. Calculo Momento Nominal Negativo (M-). Barras Superiores.

$$Mu_n = 215 \frac{tonf \cdot m}{m}$$
$$\phi_f \coloneqq 0.9$$

Desarrollo

$$As_{n} \coloneqq \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n_{n}} \left(\phi_{bn_{i}}^{2} \cdot s_{hn_{i}}^{-1} \right) = 41.05 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$a \coloneqq \frac{As_{n} \cdot fy}{0.85 \cdot f'c} = 6.89 \ cm$$

$$Mn_{n} \coloneqq As_{n} \cdot fy \cdot \left(d_{p}' - \frac{a}{2} \right) = 369.47 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

$$\phi_{f} \cdot Mn_{n} = 332.52 \frac{tonf \cdot m}{m}$$

Momento de diseño.

Factor de reducción de flexión.

Área de refuerzo a flexión.

Momento nominal positivo.

Factor de utilización.

Momento nominal positivo reducido.

$$rev_{22} \coloneqq \mathbf{if} \left(\phi_f \cdot Mn_n > Mu_n, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$
$$FU \coloneqq \frac{\phi_f \cdot Mn_n}{Mu_n} = 1.55$$

2.7. Verificaciones Flexión

Armadura Mínima Flexión.

$$As_{minf} \coloneqq \max\left(0.0014, \frac{0.0018 \cdot 420 \cdot MPa}{fy}\right) = 0.0018$$
$$As_{minf} \cdot h = 39.6 \frac{cm^2}{m}$$

7.6.1. Armadura mínimalosas en una dirección.24.4.3.2. Cuantía mínima deretracción y temperatura.

Cuantía mínima por cara.

$$rev_{23} \coloneqq \mathbf{if} \left(As_n \ge As_{minf} \cdot h, \text{``Ok.''}, \text{``Rediseñar''} \right) = \text{``Ok.''}$$

 $rev_{24} \coloneqq if(As_p \ge As_{minf} \cdot h, "Ok.", "Rediseñar") = "Ok."$

Espaciamiento del Refuerzo a Flexión.	7.7.2.3 Separación mínima flexión losas.
$s_{max.f} \coloneqq min(3 \cdot h, 450 \ mm) = 450 \ mm$	
$rev_{25} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hp} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	
$rev_{26} \coloneqq \mathbf{if} \left(\max \left(s_{hn} \right) < s_{max.f}, \text{``Ok''}, \text{``Mod. s''} \right) = \text{``Ok''}$	
Distancia Libre entre Capas Horizontales	$7.7.2.1 \rightarrow 25.2.2$ Distancia libre entre capas horizontales.
$s_{vmin} = 25 mm$	D · · · / 1
$rev_{27} \coloneqq \operatorname{if}(s_{vp} < s_{vmin}, \operatorname{``Mod. Svp''}, \operatorname{``Ok''}) = \operatorname{``Ok''}$	Revision barras superiores.
$rev_{28} \coloneqq if(s_{vn} < s_{vmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''}) = \text{``Ok''}$	Revisión barras inferiores.
Distancia Libre entre Barras Paralelas.	7.7.2.1→25.2.1 Distancia libre entre capas horizontales.
$d_{agg} \coloneqq 50 \ \boldsymbol{mm}$	Tamaño nominal máximo del
$s_{hpmin} \coloneqq \max\left(25 \ \boldsymbol{mm}, \max\left(\phi_{bp}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \boldsymbol{mm}$	agregado grueso.
$rev_{29} \coloneqq if(min(s_{hp}) < s_{hpmin}, "Mod. Svp", "Ok") = "Ok$	" Revisión barras superiores.

$$\begin{split} s_{hnmin} &\coloneqq \max\left(25 \ \boldsymbol{mm}, \max\left(\phi_{bn}\right), \frac{3}{4} \cdot d_{agg}\right) = 37.5 \ \boldsymbol{mm} \\ rev_{210} &\coloneqq \mathbf{if}\left(\min\left(s_{hn}\right) < s_{hnmin}, \text{``Mod. Svn''}, \text{``Ok''}\right) = \text{``Ok''} \end{split}$$

Revisión barras inferiores.

Longitud Desarrollo Flexión

7.7.3.3.

$$l_d \coloneqq \max\left(d_p, 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right)\right) = 213.6 \ \textit{cm}$$

Largo de desarrollo en losa.

Se utilizará gancho en 90°.

$$l_{dh} \coloneqq \max\left(\frac{0.24 \cdot fy}{\sqrt{f'c \cdot MPa}} \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right), 150 \text{ mm}\right)$$
$$l_{dh} = 52.04 \text{ cm}$$
Largo de dese

Diámetro de la barra	Diámetro interior mínimo de doblado, mm		
No. 10 a No. 25	6 <i>d</i> _b		
No. 29 a No. 36	8 <i>d</i> _b		

 $\max\left(\phi_{bn},\phi_{bp}\right) = 28 \, mm$

 $D_b \coloneqq 8 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 22.4 \ \boldsymbol{cm}$

 $l_{ext} \coloneqq 12 \cdot \max\left(\phi_{bn}, \phi_{bp}\right) = 33.6 \text{ cm}$

l Largo de desarrollo en muro.



Diámetro interior mínimo de doblado.

Largo de desarrollo posterior al doblado.

2.8. Diagrama de Interacción.

Compresión Pura

Condición de Balance

$$\begin{split} P_{b} &\coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k} & P_{b} &\equiv 2652.01 \ \frac{tonf}{m} \\ \phi P_{b} &\coloneqq 0.65 \cdot P_{b} & \phi P_{b} &\equiv 1723.81 \ \frac{tonf}{m} \\ M_{b} &\coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{b} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_{b}}{2}\right) + \sum_{k=1}^{n} \left(A_{k} \cdot fs_{k} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{k}\right)\right) & M_{b} &\equiv 1891.53 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \\ \phi M_{b} &\coloneqq 0.65 \cdot M_{b} & \phi M_{b} &\equiv 1229.5 \ \frac{tonf \cdot m}{m} \end{split}$$

Variables auxiliares para la obtencion de la "curva de interacción"

$$\begin{split} P_{n_{j}} &\coloneqq 0.85 \cdot f'c \cdot a_{j} + \sum_{k=1}^{n} A_{k} \cdot fs_{k,j} \\ \phi_{j} &\coloneqq \text{if } 0.1 \cdot f'c \cdot h < 0.65 \cdot P_{b} \\ \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{f'c \cdot h} \\ \text{else} \\ \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 2 \cdot P_{n_{j}} \\ 1 + \frac{f'c \cdot h}{0.65 \cdot P_{b}} \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ 0.9 \\ \text{else} \\ \left\| \begin{array}{c} \phi_{j} &\coloneqq \text{if } \phi_{j} < 0.65 \\ 0.9 \\ \text{else} \\ \left\| \begin{array}{c} 0.9 \\ \phi_{j} \\ \theta_{j} \end{array} \right\| \right\| \\ \phi_{j} \end{split} \end{split}$$
 Factor de Reducción de Resistencia

Cargas Axiales

 $\phi P_{n_j} \! \coloneqq \! \phi_j \! \cdot \! P_{n_j}$

Momentos

$$\phi M_{n_j} \coloneqq \phi_j \cdot \left(0.85 \cdot f'c \cdot a_j \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a_j}{2} \right) + \sum_{k=1}^n \left(fs_{k,j} \cdot A_k \cdot \left(\frac{h}{2} - d_k \right) \right) \right)$$

Gráfico de Interacción y vectores.



3. DISEÑO A CORTE

En esta sección se diseña el corte fuera del plano.

3.1. Solicitaciones.

$$d_p = 213.6 \text{ cm}$$
$$Vu \coloneqq 78 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$\phi_c\!\coloneqq\!0.75$

3.2. Corte Nominal Hormigón.

$$Vc \coloneqq 0.17 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \cdot d_p$$
$$Vc \equiv 200.84 \frac{tonf}{m}$$

Altura efectiva sección.

Solicitacion de corte a **d** del muro.

Factor reducción corte.

Corte nominal sin carga axial.

3.3. Altura mínima sección.

$$\begin{split} &Vcx \coloneqq 0.66 \cdot \sqrt{f'c \cdot MPa} \\ &d_{min} \coloneqq \left(\frac{Vu}{\phi_c} - Vc \right) \cdot \frac{1}{Vcx} \qquad d_{min} = -26.53 \ \textit{cm} \\ &\text{Altura mínima efectiva de la sección.} \\ &rev_{31} \coloneqq \mathbf{if} \left(d_{min} \le d_p, \text{``Ok''}, \text{``Aumentar h''} \right) = \text{``Ok''} \end{split}$$

3.4. Corte Nominal Acero

$$Vs_{min} \coloneqq \frac{Vu}{\phi_c} - Vc$$
 $Vs_{min} = -96.84 \frac{tonf}{m}$ Corte nominal mínimo acero.

 rev_{32} = "No requiere Vs"

 $\phi_{bc} \coloneqq 0 \ \mathbf{mm}$

 $s_c \coloneqq 250 \ mm$

$$n_{rc} \coloneqq \frac{2}{m}$$

$$A_{vc} \coloneqq \left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{bc}\right)^{2} \cdot n_{rc} \qquad A_{vc} \equiv 0 \frac{cm^{2}}{m}$$

$$Vs \coloneqq \frac{A_{vc} \cdot fy \cdot d_{p}}{s_{c}} \qquad Vs \equiv 0 \frac{tonf}{m}$$

 $rev_{32}\!\coloneqq\!\mathbf{if}\left(\!Vs\!>\!Vs_{min}, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}\!\right)\!=\!\text{``Ok''}$

Diámetro estribo de acero .

Espaciamiento

Número ramas por metro.

Area estribo doble por1m trans.

Corte Nominal Acero.

3.5. Corte Nominal Total

$$Vn \coloneqq Vc + Vs \qquad Vn \equiv 200.84 \frac{tonf}{m}$$

$$\phi Vn \coloneqq \phi_c \cdot Vn \qquad \phi Vn \equiv 150.63 \frac{tonf}{m} \qquad \text{Corte Nominal reducido.}$$

$$rev_{33} \coloneqq \text{if} (\phi Vn > Vu, \text{``Ok''}, \text{``Rediseñar''}) \equiv \text{``Ok''}$$

$$FU_c \coloneqq \frac{\phi Vn}{Vu} \equiv 1.93$$

3.6 Verificaciones de Corte.

Armadura Mínima Corte

 $rev_{34}\!=$ "No verificar armadura mínima"

$$Av_{min} \coloneqq \max\left(0.062 \cdot \frac{\sqrt{f'c \cdot MPa}}{fy}, \frac{0.35 \ MPa}{fy}\right) = 0.0008 \qquad 9.6.3.3. \text{ Av min corte}$$
$$Av_{min} \cdot s_c = 2.08 \ \frac{cm^2}{m}$$
$$rev_{35} \coloneqq \mathbf{if} \left(A_{vc} > Av_{min} \cdot s_c, \text{``Ok''}, \text{``Mod. Avc''}\right) = \text{``Mod. Avc''}$$

 $rev_{36} \!\coloneqq\! \mathbf{if} \left(Vs_{min} \! > \! 0 \,, \mathbf{if} \left(Vs \! \le \! 4 \ Vc \,, ``\mathrm{Ok"} \,, ``\mathrm{Modificar \, Vs"} \right), ``-" \right) \! = \! ``-"$

Espaciamiento mínimo

 $s_{max} \coloneqq min(450 \ mm, 3 \ h) = 450 \ mm$

 $rev_{37} \! \coloneqq \! \mathbf{if} \left(Vs_{min} \! > \! 0 \,, \mathbf{if} \left(s_c \! < \! s_{max} \,, \text{``Ok.''} \,, \text{``Mod. s.''} \right) \,, \text{``-''} \right) \! = \! \text{``-''}$