



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio paramétrico del comportamiento estructural de
muros prefabricados de hormigón.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Rodríguez Ferrando, Anna

Tutor/a: Gisbert Doménech, Carlos Miguel

Cotutor/a: Fernández Prada, Miguel Ángel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio paramétrico del comportamiento estructural de
muros prefabricados de hormigón.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Rodríguez Ferrando, Anna

Tutor/a: Gisbert Doménech, Carlos Miguel

Cotutor/a: Fernández Prada, Miguel Ángel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Estudio paramétrico del comportamiento estructural de muros prefabricados de hormigón.

Presentado por

Anna Rodríguez Ferrando

Para la obtención del

Grado en Ingeniería Civil

Curso: 2024/2025

Fecha: Septiembre de 2024

Tutor: Gisbert Doménech, Carlos Miguel

Cotutor: Fernández Prada, Miguel Ángel



AGRADECIMIENTOS

Antes de comenzar el trabajo me gustaría dar las gracias a mis tutores Carlos Gisbert y Miguel Ángel Fernández, por la infinita paciencia que han tenido conmigo, guiarme a lo largo del trabajo y apoyarme.



RESUMEN

En el presente documento se desarrolla mi Trabajo de Fin de Grado, con el que concluiré mis estudios en el Grado de Ingeniería Civil.

El objetivo principal de este estudio es el análisis, estudio y evaluación de los parámetros de dimensionamiento y diseño del alzado de muros ménsula prefabricados. Para ello, se ha desarrollado una hoja de cálculo que automatiza los cálculos para un diseño óptimo.

El trabajo se estructura en 7 bloques diferenciados:

- Estado del arte relativo a los muros y al estado actual de los prefabricados, se estudia la situación y los retos actuales que afronta el mundo de la ingeniería y los prefabricados.
- Planteamiento del problema, en el que se define claramente el problema a abordar, destacando las limitaciones de transporte.
- Condicionantes de diseño, se establecen los condicionantes que regirán el diseño del muro.
- Cálculo y dimensionamiento, se detalla la metodología empleada para la automatización de cálculos y para poder abordar el problema.
- Análisis paramétrico. Una vez generada la hoja de cálculo se realiza un estudio con el objetivo de minimizar el coste del alzado de los muros, abordando el problema del canto constante y el canto variable.
- Estudio de la necesidad de armadura de cortante. Enfocado en muros de canto constante, se analiza cuándo es posible prescindir de la armadura de cortante sin comprometer la seguridad estructural, considerando que hacerlo puede generar soluciones más pesadas o costosas.
- Aplicación a un caso real. Se realiza el diseño y dimensionamiento de un muro ménsula para la contención de tierras en una carretera de la provincia de Castellón. Para ello, se tienen en cuenta los resultados obtenidos en los estudios realizados anteriormente, obteniendo un muro que cumpla con la normativa y sea económicamente óptimo.



RESUM

En aquest document es desenvolupa el meu Treball de Fi de Grau, amb el qual conclouré els meus estudis en el Grau d'Enginyeria Civil.

L'objectiu principal d'aquest estudi és l'anàlisi, l'estudi i l'avaluació dels paràmetres de dimensionament i disseny de l'alçat de murs mènsula prefabricats. Per fer-ho, s'ha desenvolupat un full de càlcul que automatitza els càlculs per a un disseny òptim.

El treball s'estructura en 7 blocs diferenciats:

- Estat de l'art relatiu als murs i a l'estat actual dels prefabricats: s'estudia la situació i els reptes actuals que afronta el món de l'enginyeria i els prefabricats.

- Plantejament del problema: es defineix clarament el problema a abordar, destacant les limitacions de transport.

- Condicionants de disseny: s'estableixen els condicionants que regiran el disseny del mur.

- Càlcul i dimensionament: es detalla la metodologia emprada per a l'automatització de càlculs i per a poder abordar el problema.

- Anàlisi paramètric: un cop generada la fulla de càlcul, es realitza un estudi amb l'objectiu de minimitzar el cost de l'alçat dels murs, abordant el problema del cant constant i del cant variable.

- Estudi de la necessitat d'armadura de tallant: enfocat en murs de cant constant, s'analitza quan és possible prescindir de l'armadura de tallant sense comprometre la seguretat estructural, considerant que fer-ho pot generar solucions més pesades o costoses.

- Aplicació a un cas real: es realitza el disseny i el dimensionament d'un mur mènsula per a la contenció de terres en una carretera de la província de Castelló. Per a això, es tenen en compte els resultats obtinguts en els estudis realitzats anteriorment, obtenint un mur que compleixi la normativa i sigui econòmicament òptim.



ABSTRACT

This document develops my Final Degree Project, with which I will conclude my studies in the Civil Engineering Degree.

The main objective of this study is the analysis, study and evaluation of the sizing and design parameters of the elevation of prefabricated cantilever walls. For this purpose, a spreadsheet has been developed to automate the calculations for an optimal design.

The work is structured in 7 different blocks:

- State of the art regarding walls and the current state of prefabricated elements: the current situation and challenges facing the engineering and prefabrication sectors are analyzed.
- Problem statement: the issue to be addressed is clearly defined, highlighting transportation limitations.
- Design constraints: the constraints that will govern the wall design are established.
- Calculation and sizing: the methodology used for automating calculations and tackling the problem is detailed.
- Parametric analysis: once the spreadsheet is generated, a study is conducted with the aim of minimizing the cost of wall elevations, addressing both constant and variable thickness issues.
- Study of the need for shear reinforcement: focused on walls with constant thickness, it analyzes when it is possible to omit shear reinforcement without compromising structural safety, considering that doing so might result in heavier or more expensive solutions.
- Application to a real case: the design and sizing of a cantilever wall for retaining soil on a road in the province of Castellón is carried out. For this, the results obtained in the previous studies are taken into account, resulting in a wall that complies with regulations and is economically optimal.



ÍNDICE DE LA MEMORIA

1)	ANTECEDENTES Y OBJETO	11
2)	OBJETIVOS DEL TFG	13
3)	REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	14
	3.1 TIPOLOGÍA DE MUROS PREFABRICADOS.....	14
	3.1.1 MUROS DE GRAVEDAD.....	14
	3.1.2 MUROS MÉNSULA O MUROS DE CONTENCIÓN.....	15
	3.1.2.1 Muros en L.....	16
	3.1.2.2 Muros de contrafuertes.....	17
	3.1.2.3 Muros Tensiter.....	17
	3.1.3 MUROS DE TIERRA ARMADA.....	17
	3.1.3.1 Suelo reforzado	17
	3.1.3.2 Paneles	17
	3.2 PREFABRICACIÓN.....	19
	3.2.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	19
	3.2.2 PROBLEMAS Y DESAFÍOS	20
	3.3 SOLUCIONES COMERCIALES	21
4)	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	28
5)	CONDICIONANTES DE DISEÑO	29
	5.1 PARÁMETROS	29
	5.1.1 GEOMETRÍA	29
	5.1.2 MATERIALES.....	30
	5.1.3 ACCIONES	30
	5.2 RESTRICCIONES.....	33
	5.2.1 CONDICIONES DE TRANSPORTE	33
	5.2.2 CONDICIONES DE CÁLCULO.....	34
	5.2.3 LIMITACIONES GEOMÉTRICAS.....	35
	5.2.4 CONDICIONES GEOTÉCNICAS	36
	5.2.5 CONDICIONES ECONÓMICAS.....	36
6)	CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO.....	37
	6.1 NORMATIVA EMPLEADA.....	37
	6.2 GEOMETRÍA	38
	6.3 MATERIALES.....	39
	6.4 CÁLCULO DE ACCIONES	39



6.5 EQUILIBRIO FRENTE A VUELCO Y DESLIZAMIENTO	41
6.6 ROTURA POR TENSIONES NORMALES.....	44
6.7 CORTANTE.....	47
6.8 RASANTE.....	49
6.9 DETALLES CONSTRUCTIVOS.....	50
6.10 FISURACIÓN.....	51
7) ANÁLISIS PARAMÉTRICO.....	53
7.1 CANTO CONSTANTE	54
7.2 CANTO VARIABLE.....	76
7.3 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS PARAMÉTRICO	96
8) ESTUDIO DE CORTANTE	97
8.1 CANTO CONSTANTE	98
9) APLICACIÓN A UN CASO REAL.....	102
9.1 CASO 1. SOLUCIÓN CON ARMADURA DE CORTANTE.....	104
9.2 CASO 2. SOLUCIÓN SIN ARMADURA DE CORTANTE.....	108
9.3 DISPOSICIÓN FINAL	113
10) CONCLUSIONES	115
11) BIBLIOGRAFÍA.....	117
12) ANEXO I. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030.....	120
13) ANEXO II. PLANOS CASO PRÁCTICO	122



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de H y H/x (Fuente: Propia)	13
Figura 2. Muro de gravedad. (Fuente propia, basado en [4])	14
Figura 3. Partes de un muro ménsula (Fuente propia, basado en [5]).....	15
Figura 4. Geometría muro. (Fuente propia)	16
Figura 5. Muro en L (Fuente propia, basado en [5]).....	16
Figura 6. Muro con contrafuertes (Fuente propia, basado en [5]).....	17
Figura 7. Muros tipo Ormak. Panel en T y panel en TT (Fuente [7])	21
Figura 8. Muros tipo Master. (Fuente [7])	21
Figura 9. Proceso constructivo (Fuente [7])	22
Figura 10. Muros en sistema Silo (Fuente [7]).....	23
Figura 11. Detalle de la unión entre piezas (Fuente [7])	23
Figura 12. Muro Evergreen (Fuente: [7]).....	23
Figura 13. Muros Tensiter Tipo N (Fuente: [18])	24
Figura 14. Muros Tensiter Tipo T (Fuente: [18]).....	25
Figura 15. Muros Tensiter- Hombros Tipo S (Fuente: [18])	25
Figura 16. Muros Tensiter Tipo F (Fuente: [18])	26
Figura 17. Muros Tensiter Tipo C (Fuente: [18]).....	26
Figura 18. Limitaciones de transporte según el BOE (Fuente propia, basado en [8])	28
Figura 19. Parámetros geométricos (Fuente: propia, basado en [5]).....	29
Figura 20. Limitaciones de transporte según el BOE (Fuente propia, basado en [8])	33
Figura 21. Ejemplo de zapata sin talón (Fuente propia, basado en [5], editado con Cype 3D) ..	35
Figura 22. Ejemplo de zapata sin punta. (Fuente propia, basado en [5], editado con Cype 3D)	35
Figura 23. Ejemplo de zapata con punta y talón. (Fuente propia, basado en [5], editado con Cype 3D)	36
Figura 24. Geometría a introducir (Fuente: propia)	38
Figura 25. Esquema geometría del muro (Fuente: propia)	41
Figura 26. Cuantía de armado necesaria para un muro de dos metros y canto constante. (Fuente propia).....	54
Figura 27. Disposición del armado para un muro de dos metros y canto constante (Fuente propia)	57
Figura 28. Cuantía de armado necesaria para un muro de tres metros y canto constante. (Fuente propia).....	58
Figura 29. Disposición del armado para un muro de tres metros y canto constante (Fuente propia)	60
Figura 30. Cuantía de armado necesaria para un muro de cuatro metros y canto constante. (Fuente propia).....	61
Figura 31. Disposición del armado para un muro de cuatro metros y canto constante (Fuente propia)	63
Figura 32. Cuantía de armado necesaria para un muro de cinco metros y canto constante. (Fuente propia).....	64
Figura 33. Disposición del armado para un muro de cinco metros y canto constante (Fuente propia)	66
Figura 34. Cuantía de armado necesaria para un muro de seis metros y canto constante. (Fuente propia).....	67
Figura 35. Disposición del armado para un muro de seis metros y canto constante (Fuente propia)	69



Figura 36. Cuantía de armado necesaria para un muro de siete metros y canto constante. (Fuente propia).....	70
Figura 37. Disposición del armado para un muro de siete metros y canto constante (Fuente propia).....	73
Figura 38. Cuantía de armado necesaria para un muro de dos metros y canto variable. (Fuente propia).....	76
Figura 39. Disposición del armado para un muro de dos metros y canto variable (Fuente propia).....	78
Figura 40. Cuantía de armado necesaria para un muro de tres metros y canto variable. (Fuente propia).....	79
Figura 41. Disposición del armado para un muro de tres metros y canto variable (Fuente propia).....	81
Figura 42. Cuantía de armado necesaria para un muro de cuatro metros y canto variable. (Fuente propia).....	82
Figura 43. Disposición del armado para un muro de cuatro metros y canto variable (Fuente propia).....	84
Figura 44. Cuantía de armado necesaria para un muro de cinco metros y canto variable. (Fuente propia).....	85
Figura 45. Disposición del armado para un muro de cinco metros y canto variable (Fuente propia).....	87
Figura 46. Cuantía de armado necesaria para un muro de seis metros y canto variable. (Fuente propia).....	88
Figura 47. Disposición del armado para un muro de seis metros y canto variable (Fuente propia).....	90
Figura 48. Cuantía de armado necesaria para un muro de siete metros y canto variable. (Fuente propia).....	91
Figura 49. Disposición del armado para un muro de siete metros y canto variable (Fuente propia).....	93
Figura 50. Gráfico, precio del muro en función del tipo de canto y la altura, resultados estudio paramétrico. (Fuente propia).....	95
Figura 51. Acción del cortante en muros de canto constante (Fuente propia, basado en [13]).	98
Figura 52. Localización de la Población Tornesa (Fuente [17])	102
Figura 53. Ubicación de los ensayos (Fuente [17]).....	102
Figura 54. Información de los ensayos (Fuente propia)	103
Figura 55. Perfil estratigráfico (Fuente propia).....	103
Figura 56. Cuantía de armado necesaria para muro del caso 1 - aplicación práctica (Fuente propia).....	104
Figura 57. Disposición del armado para un muro de siete metros y canto constante (Fuente propia).....	107
Figura 56. Cuantía de armado necesaria para muro del caso 2 - aplicación práctica (Fuente propia).....	109
Figura 57. Disposición del armado para un muro de siete metros y canto constante (Fuente propia).....	112



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las características de cada tipo de muro. (Fuente propia, basado en [4] y [5])	18
Tabla 2. Características principales muros Tensiter (Fuente: [18]).....	24
Tabla 3. Resumen soluciones comerciales (Fuente propia).....	27
Tabla 4. Limitaciones de transporte según el BOE (Fuente [8])	33
Tabla 5. Geometría a introducir (Fuente propia).....	38
Tabla 6. Datos a introducir. Materiales y acciones. (Fuente: propia)	39
Tabla 7. Ejemplo de resultados del cálculo de empuje activo y pasivo (Fuente: propia).....	42
Tabla 8. Ejemplo de cálculo de esfuerzos debidos a peso propio, relleno y sobrecarga y cálculo de esfuerzos debidos a empujes. (Fuente propia)	43
Tabla 9. Verificaciones geotécnicas (Fuente propia)	43
Tabla 10. Datos geométricos, muro de dos metros y canto constante (Fuente propia)	54
Tabla 11. Cuantía de armado necesaria para un muro de dos metros y canto constante (Fuente propia).....	55
Tabla 12. Muro de 2 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)	56
Tabla 13. Datos geométricos, muro de tres metros y canto constante (Fuente propia).....	57
Tabla 14. Cuantía de armado necesaria para un muro de tres metros y canto constante (Fuente propia)	58
Tabla 15. Muro de 3 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)	60
Tabla 16. Datos geométricos, muro de cuatro metros y canto constante (Fuente propia).....	61
Tabla 17. Cuantía de armado necesaria para un muro de cuatro metros y canto constante (Fuente propia).....	62
Tabla 18. Muro de 4 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)	63
Tabla 19. Datos geométricos, muro de cinco metros y canto constante (Fuente propia).....	64
Tabla 20. Cuantía de armado necesaria para un muro de cinco metros y canto constante (Fuente propia).....	65
Tabla 21. Muro de 5 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)	66
Tabla 22. Datos geométricos, muro de seis metros y canto constante (Fuente propia)	67
Tabla 23. Muro de 6 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)	69
Tabla 24. Muro de seis metros y canto constante. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia).....	69
Tabla 25. Datos geométricos, muro de siete metros y canto constante (Fuente propia)	70
Tabla 26. Cuantía de armado necesaria para un muro de siete metros y canto constante. (Fuente propia).....	71
Tabla 27. Muro de 7 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)	73
Tabla 28. Muro de siete metros y canto constante. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia).....	73
Tabla 29. Resumen resultados de muro de canto constante (Fuente: propia)	74
Tabla 30. Datos geométricos, muro de dos metros y canto variable (Fuente propia)	76
Tabla 31. Cuantía de armado necesaria para un muro de dos metros y canto variable. (Fuente propia).....	77
Tabla 32. Muro de dos metros y canto variable. Despiece del armado (Fuente propia)	78
Tabla 33. Datos geométricos, muro de tres metros y canto variable (Fuente propia).....	79
Tabla 34. Cuantía de armado necesaria para un muro de tres metros y canto variable. (Fuente propia).....	79
Tabla 35. Muro de tres metros y canto variable. Despiece del armado (Fuente propia).....	81



Tabla 36. Datos geométricos, muro de cuatro metros y canto variable (Fuente propia).....	82
Tabla 37. Cuantía de armado necesaria para un muro de cuatro metros y canto variable. (Fuente propia).....	82
Tabla 38. Muro de cuatro metros y canto variable. Despiece del armado (Fuente propia).....	84
Tabla 39. Datos geométricos, muro de cinco metros y canto variable (Fuente propia).....	85
Tabla 40. Cuantía de armado necesaria para un muro de cinco metros y canto variable. (Fuente propia).....	85
Tabla 41. Muro de cinco metros y canto variable. Despiece de armado. (Fuente propia)	87
Tabla 42. Muro de cinco metros y canto variable. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia).....	87
Tabla 43. Datos geométricos, muro de seis metros y canto variable (Fuente propia)	88
Tabla 44. Cuantía de armado necesaria para un muro de seis metros y canto variable (Fuente propia).....	88
Tabla 45. Muro de seis metros y canto variable. Despiece de armado. (Fuente propia).....	90
Tabla 46. Muro de seis metros y canto variable. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia)	90
Tabla 47. Datos geométricos, muro de siete metros y canto variable (Fuente propia)	91
Tabla 48. Cuantía de armado necesaria para un muro de siete metros y canto variable (Fuente propia).....	91
Tabla 49. Muro de siete metros y canto variable. Despiece de armado. (Fuente propia)	93
Tabla 50. Muro de siete metros y canto variable. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia)	93
Tabla 51. Resultados del estudio paramétrico (Fuente propia)	94
Tabla 52. Resultados estudio paramétrico. Precio por metro lineal de muro (Fuente propia)...	94
Tabla 53. Cálculo de V_{Ed} para diferentes alturas y diferentes relaciones H/x . Caso de canto constante (Fuente propia, basado en [13]).....	99
Tabla 54. Cálculo de $V_{Rd,min}$ para diferentes alturas y diferentes relaciones H/x . Caso de canto constante (Fuente propia, basado en [13])	99
Tabla 55. Relación $V_{Ed}/V_{Rd,min}$ para diferentes alturas y diferentes relaciones H/x . Caso de canto constante (Fuente propia, basado en [13])	100
Tabla 56. Reajuste de la proporción H/x para diferentes alturas prescindiendo de la armadura de cortante. Caso de canto constante (Fuente propia, basado en [13])	100
Tabla 57. Resultados del estudio. Caso de canto constante (Fuente propia).....	101
Tabla 58. Geometría muro - Aplicación real caso 1 (Fuente propia).....	104
Tabla 59. Cuantía de armado necesaria para muro del caso 1 - aplicación práctica (Fuente propia).....	105
Tabla 60. Muro de 7 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia).....	107
Tabla 61. Muro de siete metros y canto constante. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia).....	107
Tabla 62. Cálculo del precio por ml para el aplicación real-caso 1 (Fuente propia).....	108
Tabla 63. Resultados estudio de la armadura de cortante (Fuente propia).....	108
Tabla 64. Geometría muro - Aplicación real caso 2 (Fuente propia).....	109
Tabla 65. Cuantía de armado necesaria para muro del caso 1 - aplicación práctica (Fuente propia).....	110
Tabla 66. Muro de 7 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia).....	112
Tabla 67. Cálculo del precio por ml para el aplicación real-caso 1 (Fuente propia).....	112



1) ANTECEDENTES Y OBJETO

En el presente documento se desarrolla mi Trabajo de Fin de Grado, con el que se concluirán mis estudios en el Grado de Ingeniería Civil.

A lo largo de mi formación he despertado curiosidad por el mundo de los prefabricados y la forma en la que estos pueden mejorar los procedimientos constructivos. Hoy en día, el uso de los prefabricados en proyectos de ingeniería civil está en constante crecimiento, debido a sus numerosas ventajas y la necesidad de construcción eficiente en coste y tiempo.

Desde una perspectiva económica, los prefabricados ofrecen precios competitivos en el mercado y tiempos de construcción reducidos. La fabricación fuera de la obra asegura un producto de mayor calidad, por lo que finalmente se obtiene una estructura más durable y segura.

Este trabajo se centra en el estudio detallado del alzado de los muros ménsula de hormigón prefabricados sin contrafuertes, abordando los siguientes puntos:

- Revisión del estado del arte.

Se lleva a cabo un estudio del arte de los muros y un estudio de la situación actual de los prefabricados, específicamente de los muros ménsula. Finalmente, se exploran las opciones disponibles en el mercado.

- Planteamiento del problema.

Definición del problema a abordar, optimizando el diseño del alzado del muro con el objetivo de buscar una solución económica y viable. También se destaca la limitación en el transporte como desafío a abordar. Esta se presenta como la restricción clave que impulsa la búsqueda de soluciones con menos peso.

- Condicionantes de diseño.

Se establecen los condicionantes que regirán el diseño de los muros.

Dichos condicionantes implican la determinación de:

- Una geometría compatible con las restricciones particulares del emplazamiento.
 - Unos materiales que garanticen una adecuada durabilidad y que proporcionen una resistencia adecuada.
 - Acciones, que en la mayor parte de los casos vendrán impuestas por la normativa.
 - Procedimiento constructivo.
- Cálculo y dimensionamiento.

En este apartado se explica la metodología utilizada para abordar el problema, detallando la automatización de los cálculos.



- Análisis paramétrico y estudio de cortante.

Se explora la variación de parámetros para obtener y comparar diferentes diseños para un muro ménsula, encontrando así, una solución óptima.

Inicialmente, se analiza la eficiencia económica entre muros de canto constante y variable.

Seguidamente, se lleva a cabo un estudio específico sobre la necesidad de armadura de cortante. Este análisis es crucial porque, aunque en diseño estructural se suele intentar evitar la armadura de cortante para reducir costes y facilitar el montaje, en estructuras prefabricadas prescindir de esta armadura puede resultar contraproducente. La ausencia de armadura de cortante puede llevar a soluciones más pesadas y menos eficientes.

Se desarrolla un ejemplo en la provincia de Castellón, donde se aborda el diseño de un muro de contención de tierras en una carretera teniendo en cuenta los resultados de este trabajo.

2) OBJETIVOS DEL TFG

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es analizar, evaluar y optimizar los parámetros de diseño del alzado de un muro prefabricado de hormigón armado. En el diseño de elementos prefabricados es muy importante tener en cuenta las limitaciones de transporte, entre otras, ya que soluciones que excedan determinados límites de peso o dimensionales no podrán ser transportadas.

Con la finalidad de alcanzar el objetivo planteado, se ha desarrollado una investigación teórica y una hoja de cálculo con la que se calcula el armado del muro, verificando el cumplimiento de los estados límite y proporcionando el peso del elemento prefabricado, el de acero necesario y el coste previsto.

Cabe destacar que la hoja de cálculo utilizada para la automatización de los cálculos de dimensionamiento y diseño ha sido desarrollada exclusivamente por mí como parte de este Trabajo de Fin de Grado. No se han utilizado herramientas o software comerciales previamente existentes, y el desarrollo de esta hoja de cálculo forma una parte esencial y original del presente trabajo.

Con la hoja de cálculo se realizará un estudio paramétrico (modificando variables como la altura del muro, la longitud, el ancho de cimentación, entre otros) para abordar el problema del canto constante y variable en los muros prefabricados de hormigón armado, prescindiendo de contrafuertes. Este enfoque facilita la optimización de materiales y se basa en criterios de costo y cumplimiento de normativa.

Finalmente, con el objetivo de reducir el peso de los muros y facilitar su transporte, se realiza un estudio para ajustar la relación H/x (Siendo H la altura del alzado del muro y H/x el espesor del alzado en el arranque). Tras evaluar los resultados, se propone una fórmula que determina cuándo es posible prescindir de la armadura de cortante en función de la altura y el canto del muro, minimizando así el uso de acero.

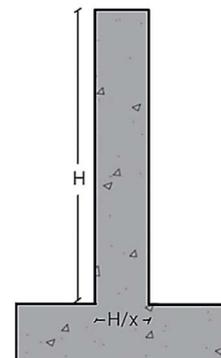


Figura 1. Representación de H y H/x (Fuente: Propia)

3) REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

A continuación, se realiza una investigación teórica sobre las tipologías de muros prefabricados, haciendo hincapié en los muros en ménsula, ya que es el tipo de muro que se va a estudiar en el presente trabajo. Seguidamente se investiga el estado actual de la prefabricación, los retos que afronta y las soluciones que ofrece el mercado actual.

3.1 TIPOLOGÍA DE MUROS PREFABRICADOS

En el ámbito de la ingeniería civil, los muros prefabricados de hormigón desempeñan un papel fundamental en la construcción y estabilización de terrenos. Estas estructuras evolucionan constantemente, con la incorporación de las nuevas tecnologías, nuevos materiales y métodos, por lo que la investigación buscando mejorar su rendimiento y adaptabilidad a los desafíos cambiantes de la ingeniería es un reto actual.

3.1.1 MUROS DE GRAVEDAD

Los muros de gravedad se caracterizan por resistir las fuerzas de empuje del terreno a través de su propio peso, siendo frecuentemente utilizados en muelles marítimos y para contención de tierras. Construidos normalmente con hormigón o mampostería.

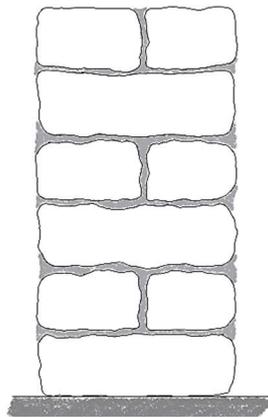


Figura 2. Muro de gravedad. (Fuente propia, basado en [4])

3.1.2 MUROS MÉNSULA O MUROS DE CONTENCIÓN

Un muro en ménsula es un muro de sostenimiento que trabaja a flexión en una dirección, está construido de hormigón armado y es resistente al vuelco y al deslizamiento gracias a la zapata.

Utilizados mayoritariamente para contención de tierras, se caracterizan por su capacidad de soportar altas cargas gracias a su diseño en voladizo.

Los muros están formados por diferentes partes claramente diferenciadas:

- Alzado del muro: medido desde su arranque hasta coronación.
- Trasdós: superficie interna del alzado, está en contacto con el terreno contenido.
- Intradós: superficie externa del alzado.
- Cimentación: zapata corrida bajo el muro, proporciona una base sólida que distribuye uniformemente el peso del muro. Aporta una gran estabilidad frente a vuelco y deslizamiento.
- Punta: parte delantera de la cimentación.
- Talón: parte trasera de la cimentación.
- Terrenos: rellenos de tierra a trasdós e intradós.

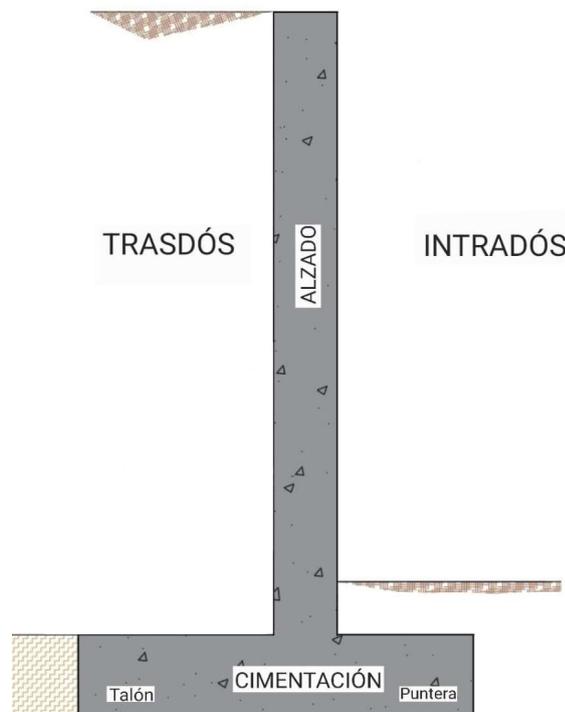


Figura 3. Partes de un muro ménsula (Fuente propia, basado en [5])

Para un correcto entendimiento del estudio, es necesario conocer las siguientes medidas geométricas:

- Altura del muro (H): Medida vertical entre el arranque del muro y su coronación.
- Espesor superior o espesor en coronación (ec): Ancho del muro en coronación
- Espesor inferior o en el arranque del muro (ea): Ancho en arranque (deberá ser siempre mayor o igual al espesor superior).
- Solapes: División en tramos de la armadura vertical, con solape. Para su definición, es necesario especificar número de tramos y altura.

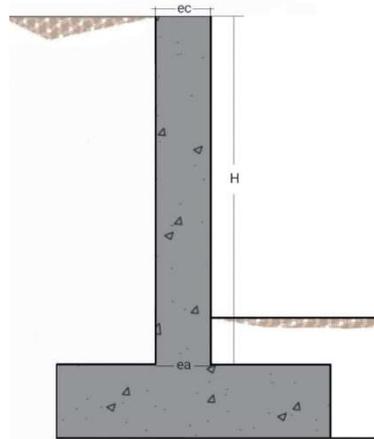


Figura 4. Geometría muro. (Fuente propia)

3.1.2.1 Muros en L

En caso de que el muro en ménsula no tenga punta o talón, se conoce la geometría del muro como “muro en L”. Este tipo de muro se caracteriza por su gran aporte de estabilidad. Son especialmente utilizados en terrenos con pendientes significativas. La fabricación y construcción de este tipo de muro es simple y económicamente ventajosa.

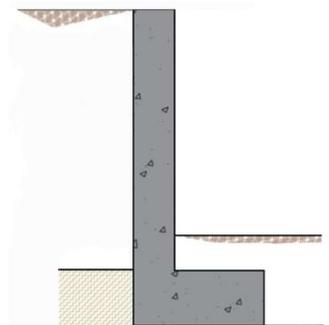


Figura 5. Muro en L (Fuente propia, basado en [5])

3.1.2.2 Muros de contrafuertes

Se construyen cuando hay la necesidad de soportar esfuerzos de gran magnitud, como presas o infraestructuras grandes. Los contrafuertes, proyectados desde la estructura principal del muro, optimizan el uso de material y aumenta la resistencia global del muro.

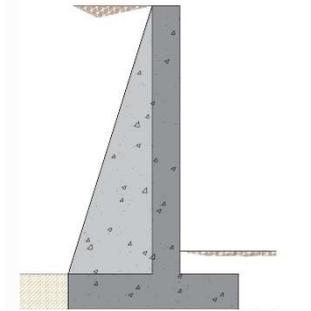


Figura 6. Muro con contrafuertes (Fuente propia, basado en [5])

3.1.2.3 Muros Tensiter

Los muros de contención Tensiter están formados por una sucesión de paneles prefabricados de hormigón armado, colocados sobre una cimentación realizada in situ.

Existen cinco tipos diferentes de muros de contención Tensiter, detallados en el apartado “3.3 Soluciones comerciales”.

3.1.3 MUROS DE TIERRA ARMADA

Los muros de tierra armada son estructuras formadas por capas de suelo compactadas y reforzadas con materiales de alta resistencia a tracción, como bandas metálicas o geotextiles.

3.1.3.1 Suelo reforzado

En los muros de tierra armada con suelo reforzado se utilizan capas de suelo compactado reforzadas con materiales geotextiles o geomallas. Estos refuerzos aumentan la capacidad para resistir esfuerzos de tracción y son muy utilizados en proyectos de infraestructura vial y ferroviaria.

3.1.3.2 Paneles

Este tipo de muros alterna capas de tierra con paneles prefabricados de hormigón. Este tipo de muro es una solución que aporta alta resistencia a los empujes del terreno y es de rápida instalación.

Tabla 1. Resumen de las características de cada tipo de muro. (Fuente propia, basado en [4] y [5])

Característica / Tipo de muro	Muro de gravedad	Muros de ménsula simple	Muros en L	Muros con Contrafuertes	Muros Tensiter tipo T	Muros de tierra armada: suelo reforzado	Muros de tierra armada: paneles
Material	Hormigón, mampostería	Hormigón armado	Hormigón armado	Hormigón armado	Hormigón armado	Tierra compactada, geomallas	Paneles de hormigón, tierra compactada
Altura	Hasta 10 m	Hasta 10 m	Hasta 6 m	Hasta 12 m	Hasta 10 m	Hasta 12 m	Hasta 12 m
Ventajas	Sencillo de construir	Alta capacidad de carga	Fácil instalación	Excelente estabilidad	Alta resistencia, adaptable.	Alta resistencia, adaptable	Rápida instalación, alta resistencia
Desventajas	Voluminoso, costoso	Mayor uso de material	Menor altura	Más material y tiempo de construcción	Complejidad en la base	Requiere materiales de refuerzo	Necesidad de transporte de paneles
Aplicación	Muelles, contención de tierras	Presas y grandes infraestructuras	Terrenos con pendientes	Presas, grandes infraestructuras	Grandes infraestructuras	Infraestructura vial y ferroviaria	Contención de tierras en zonas urbanas



3.2 PREFABRICACIÓN

La prefabricación es un sistema constructivo basado en el diseño y producción de componentes elaborados en serie en una fábrica, fuera de la ubicación final del producto. Según el Ingeniero W. Triebel, la prefabricación puede entenderse como “partes de construcción que no han sido fabricados en el lugar de la obra y tienen que ofrecer la posibilidad de incorporarse a la obra de construcción sin necesidad de posterior elaboración”.

Es a mediados del siglo XVIII cuando se empieza a hacer uso de los métodos de prefabricación, aunque no es hasta principios del siglo XX que, tanto en España como a nivel mundial, se desarrollan técnicas para la prefabricación de hormigón. A mediados del siglo XX se experimenta, a nivel mundial, una alta demanda de vivienda, por lo que se necesita una construcción rápida y eficiente de grandes proyectos. En esta época se empiezan a implementar elementos (paneles y vigas) de hormigón prefabricado en viviendas de España y de todo el mundo. Desde entonces, la prefabricación en elementos de hormigón ha evolucionado y experimentado fuertes cambios de explotación y uso, según la demanda social.

Actualmente, el uso de prefabricados de hormigón está en auge. En 2024, el mercado ha experimentado un crecimiento sostenido, impulsado por la urbanización y la necesidad de técnicas de construcción más eficientes y rápidas. A nivel global, se espera un crecimiento anual del 5,4% en el mercado de prefabricados, reflejado también en la región de Valencia, donde la demanda ha aumentado debido a la inversión en infraestructura y la búsqueda de soluciones más económicas y sostenibles

3.2.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

- Calidad de los materiales y alta versatilidad

Al ser un proceso industrializado, existe un mayor control del hormigón, por lo que el producto final es de mayor calidad. Las piezas poseen una precisión geométrica que en obra no se puede exigir, gracias al empleo de maquinarias durante la producción.

La prefabricación presenta también una alta versatilidad para adaptarse a casi cualquier forma, aplicable a cualquier solución constructiva (puentes y pasarelas, canalizaciones, pavimentación, mobiliario urbano, cerramientos...).

- Reducción de los plazos de ejecución

En las plantas de prefabricación se trabaja en serie, por lo que se elimina el tiempo en blanco entre tareas y, en consecuencia, se reduce el tiempo de ejecución de una pieza.

- Reducción de equipos de obra

Las piezas ya vienen armadas de fábrica, por lo que el trabajo en obra es menor.



- Economía

La utilización repetitiva de los moldes de las piezas amortiza el coste de los mismos. El tiempo de trabajo en obra es menor, por lo que también se reducen gastos fijos como podría ser la mano de obra o la utilización de maquinaria "in situ".

- Otras ventajas

Otras de sus ventajas principales son la seguridad en obra, la disminución de residuos en el periodo de puesta en obra y la posibilidad de reutilizar materiales, lo que significa un ahorro energético y de materias primas.

3.2.2 PROBLEMAS Y DESAFÍOS

- Transporte y manipulación

Los muros ménsula prefabricados pueden llegar a ser pesados y voluminosos, por lo que complica su transporte y requiere equipos especiales para su manipulación e instalación.

- Flexibilidad en el diseño

Los muros en ménsula prefabricados presentan ciertas limitaciones cuando se trata de adaptarse a diseños específicos o a modificaciones durante el proceso de construcción.

Dado que para su producción se utilizan moldes fijos, cualquier cambio en las especificaciones del proyecto requiere fabricación de nuevos moldes, aumentando así el coste final y el tiempo de producción.

- Coste

La inversión inicial tanto en moldes como en maquinaria para la producción de los prefabricados puede ser significativa, por lo que puede suponer una barrera para pequeños proyectos.

3.3 SOLUCIONES COMERCIALES

En este apartado se pretende conocer las soluciones de mercado para muros prefabricados comercializados en España.

- Muros tipo Ormak

Muros muy versátiles, tanto para anchuras y alturas de panel como para las solicitaciones a las que puede estar sometido. Con la tipología Ormak se han realizado muros de hasta 18 metros de altura.

Existen dos tipos de paneles; con un solo nervio (forma en T) o con 2 nervios (forma en TT), tal y como se muestra en la siguiente ilustración:

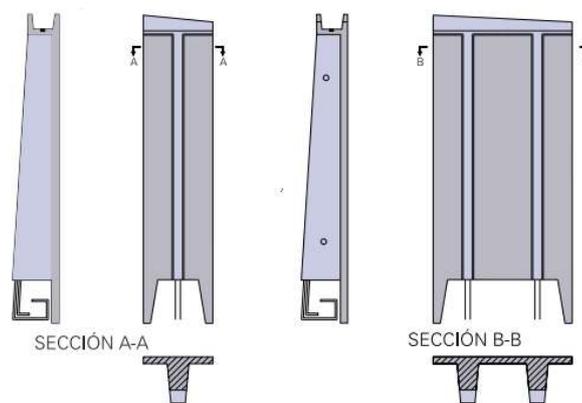


Figura 7. Muros tipo Ormak. Panel en T y panel en TT (Fuente [7])

- Muros tipo Master

Este tipo de muro permite una anchura variable de entre 2 y 2.4 metros y alturas de hasta 12 metros.

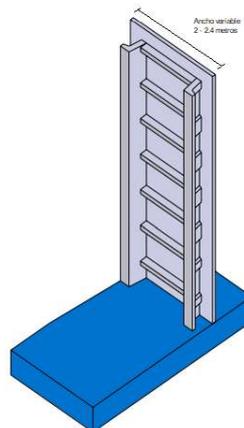


Figura 8. Muros tipo Master. (Fuente [7])

- Proceso constructivo de los muros Ormak y Master

El transporte hasta la obra se realiza con camiones tráiler, por lo que la obra deberá disponer de accesos adecuados para este tipo de vehículos.

Los paneles se descargarán con una grúa utilizando los puntos de amarre (primera imagen de la ilustración que hay a continuación). Para su almacenamiento, las piezas se colocarán en horizontal.

Para su colocación, los paneles se apoyarán por medio de las patas en el hormigón de nivelación, preparada anteriormente con un espesor mínimo de 10 centímetros. Los paneles se colocarán uno al lado del otro y se sujetarán mediante sargentas, latiguillos o grapas tipo “U”. Cada tres placas deberán colocarse puntales o tirantes a ambos lados del relleno, que se podrán retirar pasadas las 24 horas tras el hormigonado de la zapata.

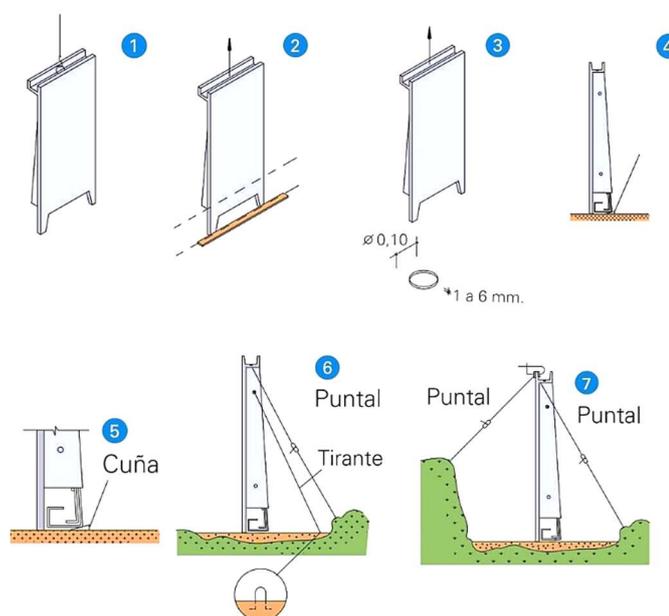


Figura 9. Proceso constructivo (Fuente [7])

- Muros en sistema Silos

Muros en ménsula fabricados con la zapata ya incorporada, lo que permite reducir el tiempo de ejecución ya que puede rellenarse tan pronto como se coloca.

A diferencia de las tipologías explicadas anteriormente, éste es móvil. Es decir, puede manejarse fácilmente con grúa o carretilla elevadora. Para su montaje, se colocan las piezas una al lado de la otra y se encajan, tal y como se puede observar a continuación:

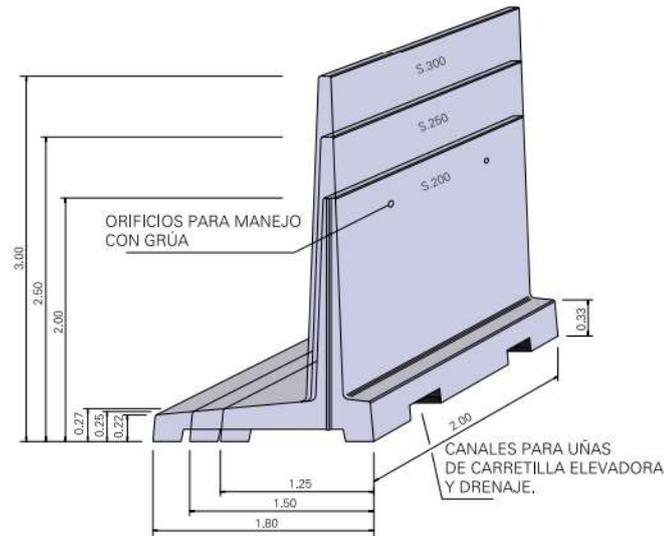


Figura 10. Muros en sistema Silo (Fuente [7])

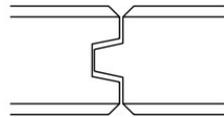


Figura 11. Detalle de la unión entre piezas (Fuente [7])

- Muros Evergreen

Sistema de muro – jardinera. Además de cumplir sus funciones estructurales permite el cultivo de flores y plantas con un crecimiento óptimo de la vegetación. Este tipo de muro ayuda a reducir el impacto ambiental en carreteras, ferrocarriles...

Este tipo de muro se ha empleado durante muchos años en países de Europa (Suiza, Alemania, Francia...) y, hoy en día, se está empezando a utilizar en España.

Igual que los muros con el sistema silo, éstos también son móviles. El montaje es sencillo y no precisa de personal especializado.

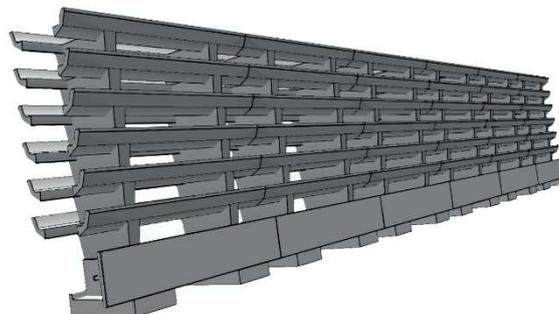


Figura 12. Muro Evergreen (Fuente: [7])

- Muros Tensiter

A continuación, se estudia la gran variedad de muros prefabricados con paneles de hormigón armado que ofrece Tensiter para contención de rellenos.

Tabla 2. Características principales muros Tensiter (Fuente: [18])

Tipo	Altura
N	1.5 - 7 metros
T	5 -13 metros
S	Hasta 12 metros
F	Hasta 13 metros
C	Hasta 9 metros

- Muros Tensiter Tipo N

Se utilizan principalmente para la contención de tierras y encauzamiento de ríos. Se caracteriza por ser un muro nervado en voladizo.

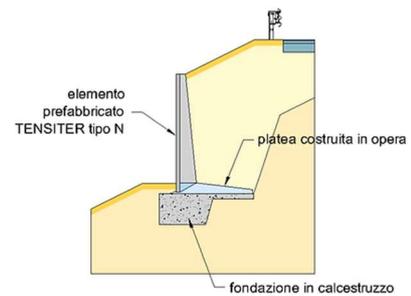


Figura 13. Muros Tensiter Tipo N (Fuente: [18])

- Muros Tensiter Tipo T

Utilizado principalmente en obras de encauzamiento, diques y defensa ribereña. Este tipo de muro incluye un tirante rígido que conecta el elemento prefabricado con la cimentación, proporcionando mayor estabilidad y resistencia.

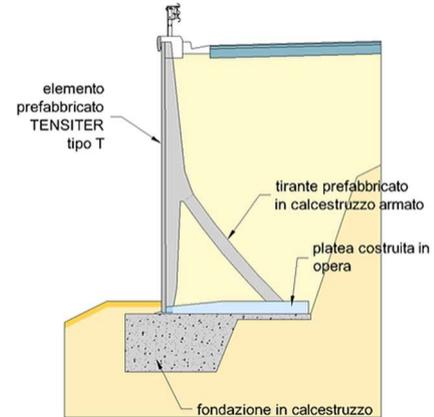


Figura 14. Muros Tensiter Tipo T (Fuente: [18])

- Muros Tensiter – Hombros Tipo S

Este tipo de muro está diseñado específicamente como hombro de puente. Posee secciones mayoradas para soportar las cargas adicionales de las estructuras de puentes. Son utilizados en situaciones donde se requiere alta resistencia estructural.

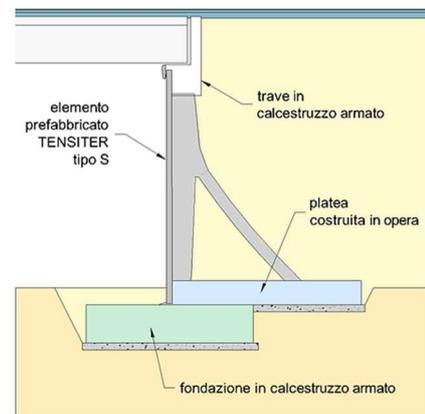


Figura 15. Muros Tensiter- Hombros Tipo S (Fuente: [18])

- Muros Tensiter Tipo F

Utilizado principalmente para la contención de tierras. La platea estabilizadora se encuentra a mitad de la altura del muro, lo que reduce la necesidad de excavación y facilita la instalación en terrenos difíciles de trabajar.

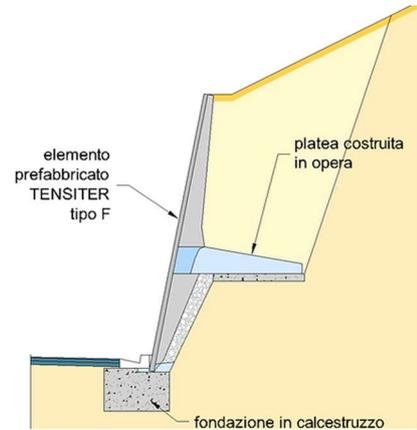


Figura 16. Muros Tensiter Tipo F (Fuente: [18])

- Muros Tensiter Tipo C

Muros utilizados principalmente para la contención de tierras. Igual que los muros Tensiter Tipo C, este es un muro nervado en voladizo.

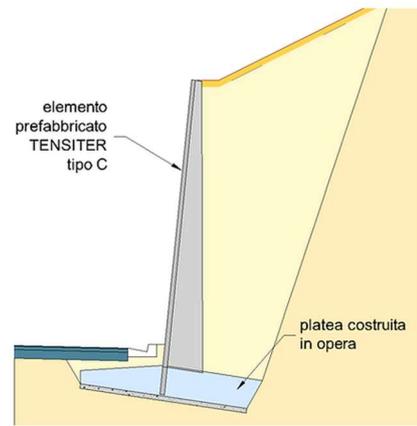


Figura 17. Muros Tensiter Tipo C (Fuente: [18])



Tabla 3. Resumen soluciones comerciales (Fuente propia)

<i>Tipo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Aplicaciones</i>
<i>Muros tipo Ormak</i>	Alta versatilidad, soporta grandes solicitaciones	Grandes infraestructuras
<i>Muros tipo Master</i>	Anchura adaptable, construcción eficiente	Infraestructura general
<i>Muros en sistema Silo</i>	Reducción de tiempo, fácil manejo	Estructuras temporales y móviles
<i>Muros Tensiter Tipo N</i>	Alta capacidad de carga	Contención de tierras, hidráulicas
<i>Muros Tensiter Tipo T</i>	Mayor estabilidad y resistencia	Encauzamiento, diques
<i>Muros Tensiter Tipo S</i>	Alta resistencia estructural	Hombros de puente
<i>Muros Tensiter Tipo F</i>	Instalación en terrenos difíciles	Infraestructuras viales y ferroviarias
<i>Muros Tensiter Tipo C</i>	Adecuado para pendientes	Contención de tierras

4) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de elementos prefabricados de hormigón en el mundo de la ingeniería civil, tal y como se ha visto anteriormente, es cada vez más común. Eso es gracias a la calidad del producto final, su versatilidad constructiva y la eficiencia en términos de plazos y costos.

Sin embargo, uno de los retos que desafían los prefabricados es el transporte, donde las limitaciones de longitud y peso imponen restricciones significativas.

La normativa actual española limita la longitud máxima de transporte a camiones articulados de 16,5 metros, sin embargo, la longitud de la estructura que puede transportarse dentro de este tipo de vehículos se ve restringida a 12 metros. Esto es especialmente relevante en zonas con carreteras y condiciones de tráfico desfavorables, donde las restricciones son aún más significativas. Además, el peso total permitido para el conjunto del camión, incluyendo la cabeza tractora y la plataforma, no puede superar las 40 toneladas. De estas, el peso de la estructura transportada debe ajustarse a un máximo de 24 toneladas, dado que la cabeza tractora y la plataforma pueden sumar hasta 16 toneladas. Por tanto, la carga útil máxima que se puede transportar en la plataforma es de 24 toneladas.

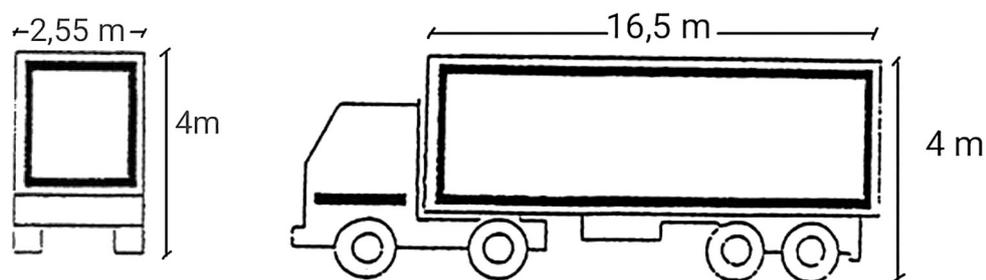


Figura 18. Limitaciones de transporte según el BOE (Fuente propia, basado en [8])

Es por eso por lo que se plantea como problema central la necesidad de buscar soluciones que minimicen el coste final de un muro ménsula sin ignorar las exigencias de las normativas vigentes en España. Este desafío implica una revisión detallada y una optimización de los parámetros de diseño y dimensionamiento de los muros ménsula de hormigón prefabricado.

El problema se centra en la automatización del proceso de dimensionamiento del alzado de un muro de hormigón prefabricado, considerando tanto casos de canto constante como de canto variable. Además, se realiza un estudio paramétrico que permite distinguir cuándo es más conveniente emplear uno u otro tipo de canto. En este contexto, también se aborda la necesidad de armadura de cortante, evaluando en qué situaciones es posible optimizar el diseño del muro prescindiendo de esta armadura, con el objetivo de reducir costes y simplificar el proceso constructivo.

5) CONDICIONANTES DE DISEÑO

En el ámbito de la ingeniería civil, la optimización económica de las obras siempre ha sido uno de los grandes objetivos. Siguiendo esta línea, se plantean los siguientes condicionantes, ajustándose a la normativa vigente y buscando soluciones eficientes que no comprometan ni la seguridad ni la calidad.

Desde un punto de vista general, el problema de optimización se define como la maximización o minimización del valor adoptado por la función objetivo F , sujeta a $g_i(v, p)$ para $i=1, \dots, k$, donde v es un vector con las variables de diseño, p es un vector con los parámetros y cada función g_i representa una de las restricciones al problema. Para cada valor de las variables de diseño, la función objetivo tiene un valor distinto y define un punto en el espacio de las soluciones.

En el presente trabajo se estudian diferentes funciones objetivo:

- Peso de la pieza prefabricada, estando este factor directamente relacionado con la facilidad de transporte de la misma.
- Coste de la pieza prefabricada, considerando que se prefabrica en la misma obra y que por tanto se puede despreciar el coste de transporte.

5.1 PARÁMETROS

5.1.1 GEOMETRÍA

- Altura del alzado del muro (H)
- Longitud de la zapata (B)
- Espesor en coronación (ec)
- Ángulo del intradós con la horizontal
- Ángulo del trasdós con la horizontal
- Canto de cimentación (c)
- Longitud de punta de la zapata (lp)
- Longitud de talón de la zapata (lt)
- Recubrimiento: resulta imprescindible considerar los condicionantes impuestos por las condiciones de durabilidad y resistencia al fuego que influyen en el comportamiento de la estructura. En el caso del muro ménsula, rara vez se deben tener en consideración las limitaciones impuestas por la situación accidental de incendio.

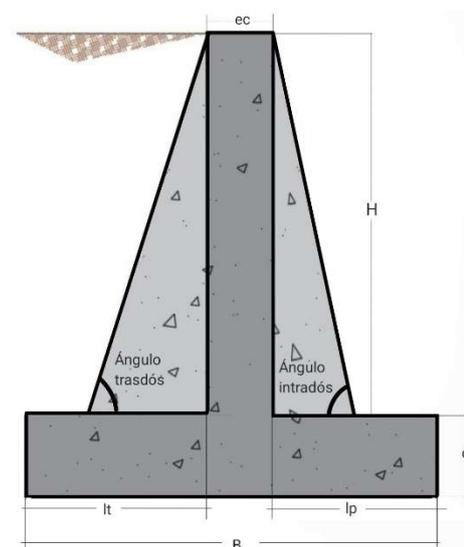


Figura 19. Parámetros geométricos (Fuente: propia, basado en [5])



5.1.2 MATERIALES

El tipo de hormigón se seleccionará en función del ambiente al que estará expuesto, garantizando así que la resistencia característica mínima sea adecuada para las condiciones específicas del entorno. En este estudio no se contempla el incremento de la resistencia del hormigón para acelerar el desmoldado y, por lo tanto, la producción, ya que, a diferencia de las piezas pretensadas, no es necesario. Sin embargo, en el caso de los muros ménsula, se pueden utilizar aceleradores de fraguado que permitan mover y manipular las piezas a edades tempranas, facilitando así el proceso constructivo.

En cuanto al límite elástico del acero, es fundamental determinar si es necesaria una ductilidad elevada, especialmente en zonas sísmicas donde este requisito es esencial para garantizar la seguridad estructural.

5.1.3 ACCIONES

Las acciones que actúan sobre el muro ménsula son, fundamentalmente, los empujes producidos por el peso propio del terreno y las acciones que gravitan sobre el mismo en las proximidades del muro. Para evaluar numéricamente el valor de dichos empujes, se deben proporcionar:

- Densidad del terreno, se descarta la posibilidad de que exista nivel freático en el caso estudiado ya que ello añadiría la necesidad de impermeabilizar las juntas y estudiar el problema hidrogeológico del que se huye siempre al emplear estos muros.
- Ángulo de rozamiento del terreno.
- Cohesión.
- Ángulo de rozamiento y cohesión entre el trasdós del muro y el terreno.
- Ángulo de rozamiento y cohesión entre la base de la cimentación y el terreno.
- Valor de las acciones que gravitan sobre el terreno y que tienen influencia sobre el muro. Estas acciones pueden evaluarse según los siguientes métodos:
 - o Empujes del terreno. Teoría de Rankine

La teoría de Rankine se utiliza para determinar el empuje del suelo sobre el muro. Para ello proporciona ecuaciones para calcular las tensiones en diferentes condiciones (empuje al reposo, empuje activo y empuje pasivo). Cabe destacar que el método de Rankine no tiene en cuenta ni la cohesión del suelo ni la fricción entre el suelo y la estructura.

Empuje al reposo (K_0): El empuje al reposo es la presión lateral que ejerce el terreno sobre la estructura cuando no se permite ningún movimiento. Es decir, el suelo está en el equilibrio sin deformaciones laterales. El coeficiente se calcula como:

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

Donde ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo. El empuje al reposo se utiliza principalmente cuando no se permite ningún movimiento lateral, por ejemplo, en estructuras muy rígidas

Empuje activo (K_a): es el empuje que ocurre cuando la estructura se desplaza ligeramente hacia afuera, como es el caso de los muros de contención. El empuje lateral es menor que al reposo, y se calcula como:

$$K_a = \frac{1 - \sin(\phi)}{1 + \sin(\phi)}$$

Donde ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

El empuje activo se calcula considerando una distribución triangular de presiones a lo largo del muro, donde la presión es máxima en la base y nula en la parte superior.

$$P_a = \frac{1}{2} * K_a * \gamma * H^2$$

Donde:

- γ es el peso unitario del suelo,
- H es la altura del muro.

La fuerza resultante actúa a un tercio de la altura desde la base del muro y debe ser equilibrada en el diseño estructural para asegurar la estabilidad y seguridad del muro prefabricado.

Empuje pasivo (K_p): resistencia del suelo cuando la estructura se mueve hacia él, comprimiéndolo lateralmente. En este caso el empuje lateral es mayor y se calcula como:

$$K_p = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)}$$

Donde ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo

Este coeficiente es determinante en estructuras que reciben grandes empujes del terreno hacia la estructura como pueden ser los muros de sótanos o en estructuras enterradas.

El empuje pasivo se calcula en la punta del muro como:

$$P_p = \frac{1}{2} * K_p * \gamma * H^2$$



Para el presente estudio se descarta el uso del método de Rankine dado que éste no considera el rozamiento entre el muro y el terreno, lo cual es conservador y un aspecto importante a tener en cuenta en muros.

- Método gráfico de Coulomb

El método de Coulomb se utiliza para determinar las fuerzas de empuje de tierras sobre estructuras de contención. A diferencia de la teoría de Rankine vista anteriormente, este método considera la influencia de la cohesión del suelo, el ángulo de fricción interna y el ángulo de inclinación de la superficie del terreno y del muro.

En el presente estudio se calcula el empuje activo en el talón y el empuje pasivo en la punta haciendo uso de la formulación propuesta por Coulomb, tal y como se verá en el apartado “Estabilidad frente a vuelco y deslizamiento” de esta misma memoria.

- Casos particulares obtenidos de la teoría de la elasticidad bidimensional:
 - Carga lineal p (kN/m) a una distancia a (m).
 - Carga uniforme q (kN/m²) que empieza a una distancia d (m) y tiene un ancho b (m).
 - Carga puntual P (kN) a una distancia d (m).
 - Otras...

5.2 RESTRICCIONES

5.2.1 CONDICIONES DE TRANSPORTE

Los muros están diseñados teniendo en cuenta las restricciones del Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos, en las que se establece que los camiones articulados no deben superar los 16.5 metros de longitud ni los 2.5 metros de anchura. (Publicado en el BOE núm. 22, de 26 de enero de 1999, páginas 3015 a 3288).

Tabla 4. Limitaciones de transporte según el BOE (Fuente [8])

	Metros
Longitud	
Vehículos de motor excepto autobuses (1).	12,00
Remolques (1).	12,00
Vehículos articulados excepto autobuses (1).	16,50
Distancia máxima entre el eje de pivote de enganche y la parte trasera del semirremolque (1).	12,00
Distancia máxima entre el eje de pivote de enganche y un punto cualquiera de parte delantera del semirremolque, horizontalmente.	2,04
Trenes de carretera (1) y (2).	18,75
La distancia máxima, medida en paralelo al eje longitudinal del tren de carretera, entre los puntos exteriores situados más delante de la zona de carga detrás de la cabina y más atrás del remolque del conjunto de vehículos, menos la distancia entre la parte trasera del vehículo motor y la parte delantera del remolque.	15,65
Distancia máxima, media en paralelo al eje longitudinal del tren de carretera, entre los puntos exteriores situados más delante de la zona de carga detrás de la cabina y más atrás del remolque del conjunto de vehículos.	16,40
Autobuses articulados.	18,75
Autobuses rígidos de 2 ejes.	13,50
Autobuses rígidos de más de 2 ejes.	15,00
Autobuses con remolque, incluido este.	18,75
En el caso de autobuses equipados con accesorios desmontables, como los porta esquís, la longitud del vehículo, accesorios incluidos, no sobrepasará las máximas previstas en este apartado.	
Anchura	
La anchura máxima autorizada, como regla general.	2,55
Superestructuras de vehículos acondicionados (3).	2,60
Autobuses especialmente acondicionados para el traslado de presos (4).	2,60
Altura	
Altura máxima de los vehículos incluida la carga, como norma general.	4,00
Altura máxima de los autobuses de la clase I (urbano).	4,20
Altura máxima de los siguientes vehículos, incluida la carga	
Portavehículos: Camiones (rígidos) y conjuntos de vehículos (trenes de carretera y vehículos articulados), cuando estén especializados en el transporte de vehículos.	4,50
Vehículos grúa: los destinados a la retirada de vehículos accidentados o averiados.	
Vehículos que transportan contenedores cerrados homologados para el transporte combinado o intermodal.	

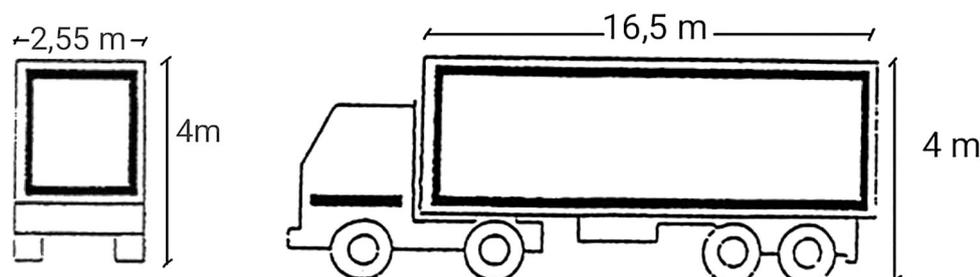


Figura 20. Limitaciones de transporte según el BOE (Fuente propia, basado en [8])

La eficiencia en el transporte es un criterio esencial para minimizar el coste total de la obra, por lo que se busca minimizar el peso total de cada pieza para permitir el transporte de un mayor número de piezas.



Por lo tanto, las limitaciones a tener en cuenta para el transporte son las siguientes:

- **Peso:** en el caso de transporte mediante góndola, se tiene en cuenta que el peso máximo autorizado es de 40 toneladas, según las regulaciones del Ministerio de Transportes. Sin embargo, al considerar el peso de la cabeza tractora y de la plataforma, se establece una carga máxima admisible de 24 toneladas.
- **Anchura:** la normativa establece un ancho máximo de 2.55 metros, pero, por tolerancias, se considera el límite de 2.5 metros.
- **Altura:** la altura máxima permitida es de 4 metros, considerando la altura de la plataforma, por lo que la altura de la pieza a transportar no debe exceder los 3 metros.
- **Longitud:** la longitud máxima de la plataforma, como ya se ha comentado, es de 12 metros. Una longitud mayor a 12 metros puede transportarse con un permiso especial.

5.2.2 CONDICIONES DE CÁLCULO

Con la aplicación desarrollada se realiza una verificación exhaustiva de los estados límite últimos y de servicio de acuerdo con lo prescrito en los euro-códigos 0, 1, 2 y 7.

Esto incluye la comprobación de la capacidad de la estructura para resistir cargas máximas y la verificación de los criterios de deformaciones y fisuración que afectan a la durabilidad de la estructura. La aplicación desarrollada en la hoja de cálculo para este trabajo automatiza estos cálculos, facilitando el diseño y asegurando el cumplimiento de la normativa actual.

5.2.3 LIMITACIONES GEOMÉTRICAS

La aplicación programada permite el diseño de diferentes zapatas para permitir la adaptación a las condiciones impuestas por el terreno.

- Zapata sin talón: El equilibrio frente a vuelco y deslizamiento se consigue aumentando el tamaño de la zapata para repartir mejor el peso sobre el terreno.

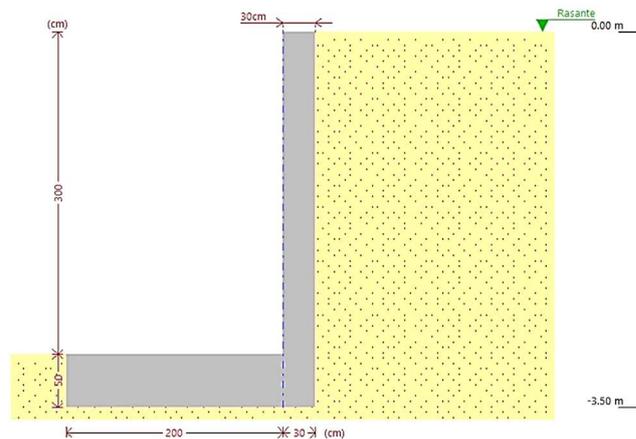


Figura 21. Ejemplo de zapata sin talón (Fuente propia, basado en [5], editado con Cype 3D)

- Zapata sin punta: los condicionantes geotécnicos de equilibrio (vuelco y deslizamiento) se alcanzan con las mínimas dimensiones de la zapata. Por lo que la excavación necesaria es menor. Debe tenerse en cuenta que en caso de que el terreno no sea suficientemente resistente, este tipo de zapata puede tener problemas de asentamiento.

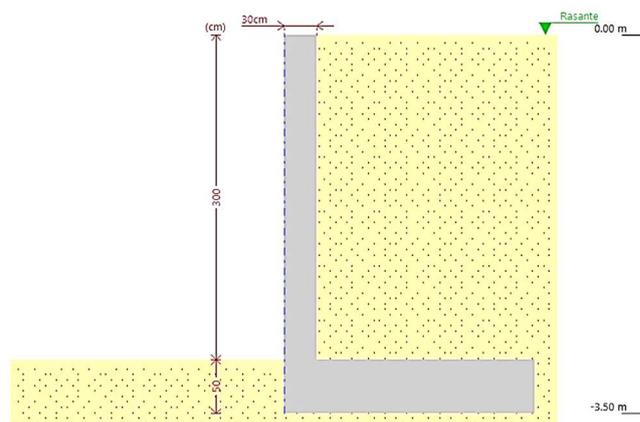


Figura 22. Ejemplo de zapata sin punta. (Fuente propia, basado en [5], editado con Cype 3D)

- Zapata con punta y talón: el diseño de la zapata extendida a ambos lados del alzado del muro ayuda a distribuir la carga de manera uniforme al terreno. Al aumentar el peso de la zapata se mejora su estabilidad frente a vuelco y deslizamiento, aunque se aumenta su coste final y los tiempos de construcción.

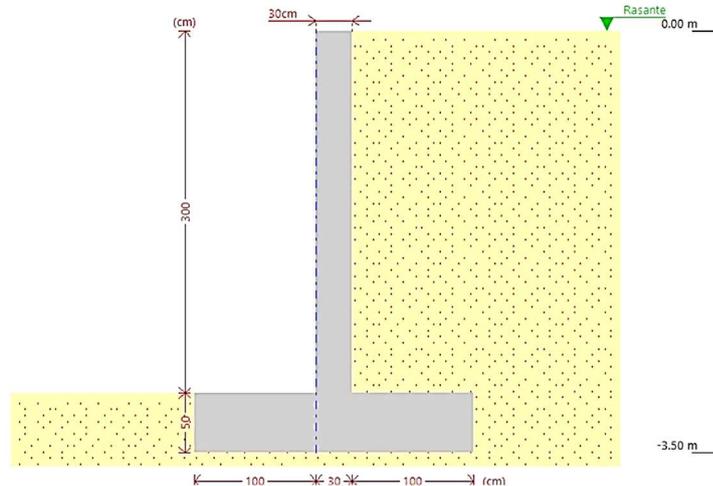


Figura 23. Ejemplo de zapata con punta y talón. (Fuente propia, basado en [5], editado con Cype 3D)

5.2.4 CONDICIONES GEOTÉCNICAS

Desde la hoja de cálculo se permite adaptar las condiciones del terreno a las condiciones específicas del proyecto, por lo que ofrece gran flexibilidad de adaptación. La misma aplicación muestra una advertencia si no se cumplen las verificaciones geotécnicas.

5.2.5 CONDICIONES ECONÓMICAS

Finalmente, cabe destacar que la eficiencia económica es un factor clave en el diseño del proyecto, por lo que siempre se busca utilizar la mínima cantidad de material posible, sin comprometer la calidad y seguridad de la estructura.

La optimización económica no solo tiene en cuenta el uso mínimo de materiales, sino que también tiene en cuenta otros factores como el transporte y la mano de obra.



6) CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO

A continuación, se explica cómo se ha preparado la hoja de cálculo para poder realizar los posteriores análisis.

6.1 NORMATIVA EMPLEADA

La aplicación desarrollada en la hoja de cálculo para el diseño y dimensionamiento de muros en ménsula con canto constante y variable sin contrafuertes sigue las directrices de los Eurocódigos y la normativa vigente española. A continuación, se especifica la normativa empleada en cada uno de los siguientes apartados:

- 6.4 Bases de proyecto

UNE-EN 1990:2019 (Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras. Capítulo 6 y Anexo A)

- 6.5 Equilibrio frente a vuelco y deslizamiento:

UNE-EN 1997-1:2000 (Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales)

- 6.6 Rotura por tensiones normales:

UNE-EN 1992-1-1:2013 (Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, Artículo 6.1)

- 6.7 Cortante:

UNE-EN 1992-1-1:2013 (Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, Artículo 6.2)

- 6.8 Rasante:

UNE-EN 1992-1-1:2013 (Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación)

- 6.10 Fisuración:

UNE-EN 1992-1-1:2013 (Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, Artículo 7.3)

6.2 GEOMETRÍA

Los datos de partida para el cálculo y dimensionamiento son los que se muestran en siguiente imagen:

Tabla 5. Geometría a introducir (Fuente propia)

GEOMETRÍA		
H	4	r
Longitud punta (lp)	0	r
Longitud talón (lt)	1	r
Longitud de la zapata (B)	1,2	r
Altura cimentación (c)	0,4	r
Terreno por encima de la puntera	0,5	r
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	r
Ángulo <i>mín</i> en trasdós	90	gra
Ángulo <i>mín</i> en intradós	90	gra
d'	0,05	r
proporción del espesor (H/X)	16,4268	r

Revisar geometría, no se cumplen las verificaciones geotécnicas

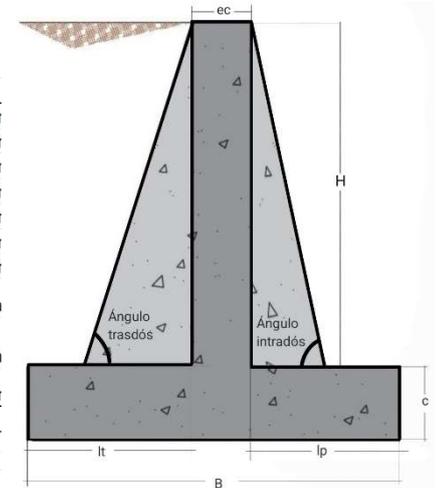


Figura 24. Geometría a introducir (Fuente: propia)

Desde un punto de vista geométrico, deben especificarse todas las dimensiones. Automáticamente, cuando se introduce una geometría que no es estable, la aplicación muestra una advertencia para que se rectifique la geometría del muro. Esta advertencia se muestra cuando el muro no es estable frente a vuelco y/o deslizamiento, los cálculos correspondientes se detallan en el siguiente apartado. (En la imagen anterior se muestra el ejemplo de una geometría no estable con la notificación de la aplicación en la última fila de la tabla mostrada)

Los datos editables de la hoja de cálculo siempre están resaltados con color naranja.

6.3 MATERIALES

Una vez introducida la geometría, el usuario debe introducir las características de los materiales y del terreno:

Tabla 6. Datos a introducir. Materiales y acciones. (Fuente: propia)

MATERIALES				ACCIONES			
Peso específico del terreno	Y	19,67	kN/m ³	Sobrecarga en terreno de talón medido en proyec	q*	10	kN/m
Ángulo de rozamiento interno de	φ'	0,26	radianes	Peso específico del hormigón		25	kN/m ³
Angulo de fricción suelo-muro		0	radianes	Resistencia acero	fyk	500	Mpa
σ admisible		400	Kpa	Resistencia hormigón	fck	25	Mpa
Cohesión	c	15	Kpa				
Pendiente del terreno natural en	β	0					
Pendiente del terreno en puntera		0	radianes				
Clase de ambiente	EC	XC3					

6.4 CÁLCULO DE ACCIONES

Estado Límite Último de Agotamiento

UNE-EN 1992-1-1:2013 (Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación Artículo 6.10)

Para el cálculo de los estados límite últimos se utilizan las expresiones que se muestran a continuación. Cabe destacar que en el presente estudio no es necesario el cálculo en situación de proyecto accidental ni en situación sísmica, por lo que se calcula únicamente la combinación para la situación persistente o transitoria.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p \cdot P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

donde:

- Σ "el efecto combinado de"
- "+" "a combinarse con"
- G_{k,j} Valor característico de las acciones permanentes.
- P Valor de la acción del pretensado.
Puede utilizarse un valor medio, P_m(t) [EN 1990:2002 Art. 4.1.2(6)]
- Q_{k,1} Valor característico de la acción variable determinante.
- ψ_{0,i} Q_{k,i} Valor representativo de combinación de las acciones variables concomitantes
- ψ_{1,1} Q_{k,1} Valor representativo frecuente de la acción variable determinante.
- ψ_{2,i} Q_{k,i} Valores representativos cuasi-permanentes de las acciones variables con la acción determinante o con la acción accidental.
- A_d Valor de cálculo de la acción accidental [ver EN 1991-1-7] A_d=γ_A·A_k
- A_{Ed} Valor de cálculo de la acción sísmica [ver EN 1998] A_{Ed}=γ_A·A_{EK}

Los valores que se utilizan para el cálculo son:

Terreno	Psi_0	Psi_1	Psi_2
Sobrecarga	0,4	0,4	0

	ELS		ELU	
	Fav.	Desf.	Fav.	Desf.
Carga permanente	1	1	1	1,35
Terreno	1	1	1	1,5
Sobrecarga	0	1	0	1,5

Estados Límite de Servicio

UNE-EN 1992-1-1:2013 (Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación Artículo 7)

Para el cálculo de los estados límite de servicio se utilizan las expresiones que se muestran a continuación. Además, cabe destacar que, dado que no tenemos ningún pretensado, el cálculo de la combinación frecuente no es necesario.

Combinación característica

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + "P" + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Combinación casi-permanente

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + "P" + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Σ	"el efecto combinado de"
"+"	"a combinarse con"
$G_{k,j}$	Valor característico de las acciones permanentes.
P	Valor característico de la acción del pretensado, Puede ser un valor superior $P_{k,sup}$ y un valor inferior $P_{k,inf}$ [EN 1990:2002 Art. 4.1.2(6)]
$Q_{k,1}$	Valor característico de la acción variable determinante.
$\psi_{0,i} Q_{k,i}$	Valor representativo de combinación de las acciones variables concomitantes
$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	Valor representativo frecuente de la acción variable determinante.
$\psi_{2,i} Q_{k,i}$	Valores representativos cuasi-permanentes de las acciones variables con la acción determinante

Los valores que se utilizan para el cálculo son:

Terreno	Psi_0	Psi_1	Psi_2
Sobrecarga	0,4	0,4	0

	ELS		ELU	
	Fav.	Desf.	Fav.	Desf.
Carga permanente	1	1	1	1,35
Terreno	1	1	1	1,5
Sobrecarga	0	1	0	1,5

6.5 EQUILIBRIO FRENTE A VUELCO Y DESLIZAMIENTO

UNE-EN 1997-1:2000 (Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales)

Se hace un predimensionamiento del muro teniendo en cuenta las verificaciones geotécnicas.

Se exige una altura de cimentación de $1/10H$ (siendo H la altura del alzado del muro) y se exige también que sea, como mínimo, de 0.4 metros, para cumplir con la normativa.

El ancho de cimentación se predimensiona con 2.5 metros, dado que es un ancho estable para las alturas recomendadas para esta tipología de muros.

El espesor en la unión alzado-cimentación dependerá de la pendiente definida de trasdós e intradós.

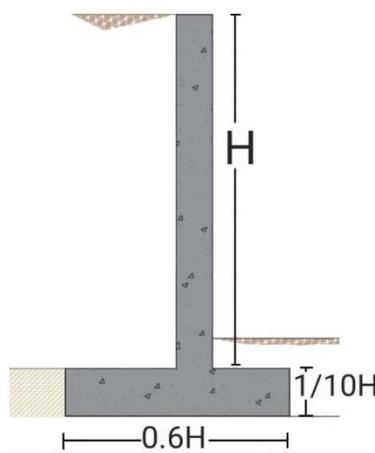


Figura 25. Esquema geometría del muro (Fuente: propia)

A continuación, se procede a realizar el cálculo de los empujes debidos al terreno. Tanto para el cálculo del empuje activo como para el cálculo del empuje pasivo se utiliza la formulación del método de Coulomb.

Primero, se realiza el cálculo del coeficiente K_A :

$$K_A = \left(\frac{\operatorname{cosec} \beta * \operatorname{sen}(\beta - \phi')}{\sqrt{\operatorname{sen}(\beta + \delta)} + \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\delta + \phi') * \operatorname{sen}(\phi' - i)}{\operatorname{sen}(\beta - i)}}} \right)^2$$

Siendo β la pendiente en trasdós, ϕ' el ángulo de rozamiento interno del relleno, δ el ángulo de fricción suelo-muro e "i" la pendiente del terreno natural en el talón.

Seguidamente, se calculan los empujes como

$$0.5 * \gamma * H_{total}^2 * K_A$$

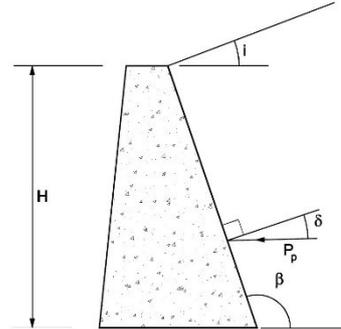
y el empuje activo debido a la sobrecarga

$$H_{total} \cdot K_A \cdot q \cdot \frac{\cos(\beta)}{\cos(i - \beta)}$$

Siendo γ el peso específico del terreno, H_{total} la suma de la altura del alzado del muro más la altura de la cimentación, β la pendiente en trasdós e “i” la pendiente del terreno natural en el talón. A partir de los empujes activos se calculan los empujes verticales y horizontales por trigonometría.

El siguiente paso es calcular el empuje pasivo en la punta. Para ello, primero debe calcularse el coeficiente K_p

$$K_p = \left(\frac{\operatorname{cosec} \beta \cdot \operatorname{sen}(\beta + \phi')}{\sqrt{\operatorname{sen}(\beta - \delta)} \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\delta + \phi') \cdot \operatorname{sen}(\beta + i)}{\operatorname{sen}(\beta - i)}}} \right)^2$$



Siendo beta la pendiente en trasdós, ϕ' el ángulo de rozamiento interno del relleno, δ el ángulo de fricción suelo-muro e “i” la pendiente del terreno natural en el talón.

A diferencia del procedimiento realizado para el cálculo del empuje activo, se realiza solo el cálculo del empuje pasivo, ya que en esta zona no se consideran sobrecargas.

El empuje pasivo se calcula como:

$$0.5 \cdot \gamma \cdot H_{total}^2 \cdot K_p$$

Tabla 7. Ejemplo de resultados del cálculo de empuje activo y pasivo (Fuente: propia)

CÁLCULO DE EMPUJE ACTIVO EN TALÓN					
K_A		Empuje del terreno		Empuje de la sobrecarga	
$K_A = \left[\frac{\operatorname{cosec} \beta \cdot \operatorname{sen}(\beta + \phi')}{\sqrt{\operatorname{sen}(\beta - \delta)} \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\delta + \phi') \cdot \operatorname{sen}(\beta + i)}{\operatorname{sen}(\beta - i)}}} \right]^2$	0,597270665	Altura de la resultante	1,47 m	Altura de la resultante	2,20 m
		Ea	113,72 kN	Ea	26,28 kN
		Ev	2,24 kN	Ev	0,52 kN
		Eh	113,70 kN	Eh	26,27 kN
CÁLCULO DE EMPUJE PASIVO EN PUNTA					
K_p		Empuje pasivo del terreno			
$K_p = \left(\frac{\operatorname{cosec} \beta \cdot \operatorname{sen}(\beta + \phi')}{\sqrt{\operatorname{sen}(\beta - \delta)} \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\delta + \phi') \cdot \operatorname{sen}(\beta + i)}{\operatorname{sen}(\beta - i)}}} \right)^2$	1,674933332	Altura de la resultante	1,80 m		
		Ep	480,35 kN		
		Ev	0,00 kN		
		Eh	480,35 kN		

Seguidamente, se hace el cálculo de los esfuerzos debidos al propio peso, al relleno y a la sobrecarga. Para ello, se calcula el peso de la estructura de hormigón y el momento referido al extremo de la base de la zapata. Adicionalmente, se calculan los esfuerzos debidos a los empujes teniendo en cuenta los resultados que se han obtenido anteriormente. Se calcula el momento referido al extremo de la base de la zapata también.



Tabla 8. Ejemplo de cálculo de esfuerzos debidos a peso propio, relleno y sobrecarga y cálculo de esfuerzos debidos a empujes. (Fuente propia)

ESFUERZOS DEBIDOS A PESO PROPIO, RELLENO y SOBRECARGA							ESFUERZOS DEBIDOS A LOS EMPUJES					
esfuerzos referidos a extremo de la base de la zapata							Esfuerzos referidos a extremo de la base de la zapata					
Zona	Area	Volumen	Peso	Distancia	Momento		Zona	E_v	Distancia	E_h	Distancia	Momento
	m ²	m ³	kN	m		kNm		kN	m	kN	m	m-kN
1	1,723076923	1,723076923	43,08	2,154	92,781	Trasdós (empuje de tierras)	2,24	2,279				5,11
2	0,157692308	0,16	3,94	2,053	8,092	Trasdós (empuje de sobrecarga)	0,52	2,264				1,17
3	0,6	0,60	15,00	2,154	32,308	Trasdós (empuje de tierras)			113,702		1,47	166,76
4	0,157692308	0,16	3,94	2,255	8,890	Trasdós (empuje de sobrecarga)					2,20	57,80
5	0,157692308	0,16	3,10	2,281	7,076		2,76		139,98			218,29
6	8	8,00	157,36	3,308	520,498							
7	0	0,00	0,00	3,615	0,000							
8	0,246394231	0,25	4,85	2,033	9,852	Intradós			480,35		2,20	1056,77
9	10	10,00	196,70	1,000	196,700							
Sobrecarga			10,00	3,268	32,683							
JMATRIO			437,97		908,881							

Por último, se realizan las verificaciones geotécnicas

- Factor de seguridad frente a vuelco: se verifica que los momentos estabilizadores son más del doble que los desestabilizadores.
- Condición de hundimiento: se verifica que $\frac{EN}{B} > 3$
- Factor de seguridad frente a deslizamiento: se verifica que la fuerza resistente es igual o mayor a 1.5 veces el empuje horizontal.
- Relación vuelo/canto: se verifica que la relación es mayor a 2.

Tabla 9. Verificaciones geotécnicas (Fuente propia)

VERIFICACIONES							
Factor de seguridad frente a vuelco		Condición de hundimiento		Factor de seguridad frente a deslizamiento		Relación vuelo/canto	
Factor de seguridad	2	$\frac{\sum N}{B}$	Factor de seguridad	3	Factor de seguridad	1,5	2,5 CUMPLE
Momentos estabilizadores	2183,16 kNm		σ admisible	600 kPa	Fuerza resistente	930,5 kN/m ²	
Momentos desestabilizadores	128,89 kNm		$\Sigma N/B$	95,212657 kN/m ²	Empuje horizontal	79,49 kN	
Factor de seguridad	4,25 CUMPLE		Factor de seguridad	6,3016832 CUMPLE	Factor de seguridad	11,71 CUMPLE	

Tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, cuando una de estas verificaciones no se cumple, se notifica desde la hoja de "Datos a introducir" para que se modifique la geometría del muro. Una vez realizadas todas las verificaciones geotécnicas, se procede al cálculo de acciones.

6.6 ROTURA POR TENSIONES NORMALES

UNE-EN 1992-1-1:2013 (Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación Artículo 6.1)

A continuación se hace el cálculo de la rotura por tensiones normales, es decir, el Estado Límite Último (ELU) de flexión longitudinal, de acuerdo con la normativa vigente. Para ello, se utilizan los dominios de deformación en el diagrama de interacción momento-axil, los cuales dividen el comportamiento estructural en distintas zonas (A-B-C-D-E-F).

Primero, se calculan los valores de cálculo de las resistencias de los materiales como:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \text{ y } f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

Seguidamente, con las acciones en ELU calculadas previamente, se procede al cálculo relativo a los estados límite último de flexión longitudinal.

Para ello, basándonos en los dominios de deformación se procede al cálculo de la profundidad de la fibra neutra, x , para los siguientes tres casos: $x=x_{lim}$, $x=-\infty$ y $x=+\infty$.

Para $x=x_{lim}$, se realizan los cálculos siguiendo las expresiones que se muestran a continuación:

$$x_{lim} = \frac{d}{1 + \frac{f_{yd}}{700}}$$

$$M_{1c}(x_{lim}) = f_{cd} \cdot b \cdot 0,8x_{lim} \cdot \left(d - \frac{0,8x_{lim}}{2} \right)$$

$$M_{2c}(x_{lim}) = f_{cd} \cdot b \cdot 0,8x_{lim} \cdot \left(d' - \frac{0,8x_{lim}}{2} \right)$$

Para $x=-\infty$ se verifica que

	$N_c(-\infty) = 0$	$M_{2c}(-\infty) = 0$
	$M_c(-\infty) = 0$	$M_{1c}(-\infty) = 0$

Y, finalmente, para $x=+\infty$:

$$M_{1c}(\infty) = M_c(\infty) + N_c(\infty) \cdot (d - v_1)$$

$$M_{2c}(\infty) = M_c(\infty) + N_c(\infty) \cdot (d' - v_1)$$

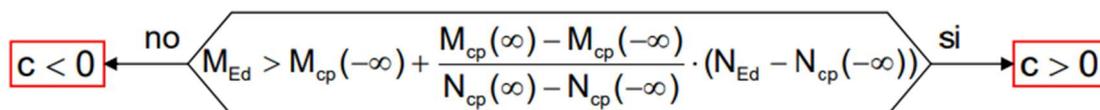
Se procede con el cálculo de M_{1Ed} y M_{2Ed} .

$$M_{1Ed} = M + N * d - \frac{h}{2}$$

$$M_{2Ed} = M + N * d' - \frac{h}{2}$$

Una vez obtenidos estos valores, se determina la zona en la que se encuentra para poder calcular la armadura necesaria.

Para ello, primero se realiza la comprobación de borde como:



Y acto seguido se busca la zona en la que nos encontramos. Para ello, se realizan las comprobaciones por descarte, siguiendo el orden que se muestra a continuación.

Se comprueba si estamos en la zona B, para ello se debe cumplir que:

$$M_{1Ed} < M_{1p}(-\infty)$$

Y el cálculo de la armadura en esta zona se realiza como:

$$A'_s = -\frac{M_{1Ed} - M_{1p}(-\infty)}{f_{yd}(d - d')} \text{ y } A_s = \frac{M_{2Ed} - M_{2p}(-\infty)}{f_{yd}(d - d')}$$

Para el resto de las zonas, el procedimiento a seguir es el mismo que en la zona B; se comprueba si estamos en dicha zona y se calcula el armado con la formulación específica para la zona en cuestión.

Zona C

$$M_{1p}(-\infty) \leq M_{1E} \leq M_{1c}(x_{lim}) + M_{1p}(x_{lim})$$

$$M_{1E} = M_{1c}(x) + M_{1p}(x) + \sigma'_s(x) * A'_s * (d - d')$$

$$\text{Si } x_o \leq x_{lim} \quad A_s = \frac{M_{2Ed} - M_{2c}(x_o) - M_{2p}(x_o)}{f_{yd}(d - d')}$$

$$\text{En el otro caso, } A_s = \frac{-N_{Ed} + N_c(x_o) + N_p(x_o)}{f_{yd}}$$

Zona D

$$M_{1Ed} > M_{1c}(x_{lim}) + M_{1p}(x_{lim})$$

$$M_{2Ed} \geq M_{2c}(x_{lim}) + M_{2p}(x_{lim})$$

$$x = x_{lim}$$

$$A'_s = \frac{M_{1Ed} - (M_{1c}(x_{lim}) + M_{1p}(x_{lim}))}{\sigma'_s(x_{lim})(d - d')}$$

$$A_s = \frac{M_{2Ed} - (M_{2c}(x_{lim}) + M_{2p}(x_{lim}))}{f_{yd}(d - d')}$$



Zona E

$$M_{2c}(\omega) + M_{2p}(\omega) < M_{2Ed} < M_{2c}(x_{lim}) + M_{2p}(x_{lim})$$
$$M_{2E} = M_{2c}(x) + M_{2p}(x) + \sigma'_s(x) * A_s * (d' - d)$$

$$\text{Si } x_o > x_{lim}, A'_s = \frac{M_{1Ed} - M_{1c}(x_o) - M_{1p}(x_o)}{\sigma'_s(x_o)(d - d')}$$
$$\text{Sino, } A'_s = \frac{N_{Ed} - (N_c(x_o) + N_p(x_o) + A_s * \sigma_s(x_o))}{\sigma'_s(x_o)}$$

Zona F

$$M_{2Ed} \leq M_{2c}(\omega) + M_{2p}(\omega)$$
$$x = \omega$$

$$A_s = \frac{M_{2Ed} - (M_{2c}(\omega) + M_{2p}(\omega))}{\sigma_s(\omega)(d - d')}$$
$$A'_s = \frac{N_{Ed} - (N_c(\omega) + N_p(\omega) + A_s * \sigma_s(\omega))}{\sigma'_s(\omega)}$$

6.7 CORTANTE

UNE-EN 1992-1-1:2013 (Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación Artículo 6.2)

En el estudio de cortante, debe verificarse que $V_{Ed} \leq V_{Rd,c,min}$ para que la armadura no sea necesaria. Siendo:

V_{Ed} es el valor de diseño del esfuerzo cortante que debe ser resistido por el alma.

V_{Rd} es el valor de diseño de la resistencia a cortante.

$V_{Rd,c,min}$ es el valor de diseño de la resistencia a cortante mínima.

Para realizar los cálculos se sigue la formulación que se muestra a continuación:

$$V_{Ed} = V_{0d}$$

Siendo V_{0d} el esfuerzo cortante máximo que se espera en la sección del muro debido a las cargas.

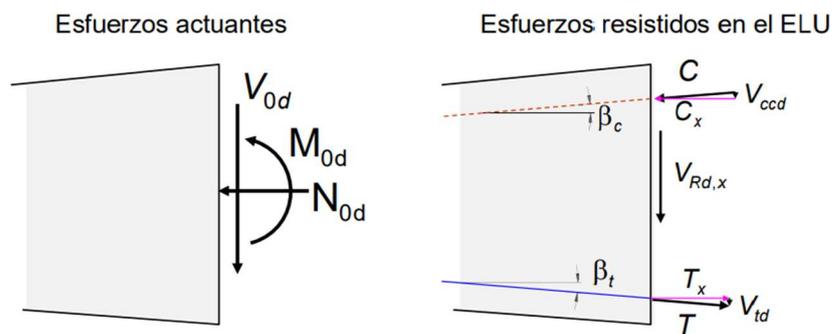
$$V_{Rd,c,min} = \left(\frac{0.075}{\gamma_c} * k^2 * f_{ck}^{\frac{1}{2}} + 0.15 * \sigma_{cp} \right) * b_w * d \text{ con } f_{ck} \leq 60$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$$

$$b_w = 0.5$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,x} + V_{ccd} + V_{td}$$



Finalmente se hace el cálculo de la $\cotg\theta$. Para su cálculo, se utiliza la siguiente formulación:

$$1 \leq \cotg \theta \leq \frac{1 + \sqrt{1 - 4 \cdot \eta^2}}{2 \cdot \eta} \leq 2.5$$

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot b_{w,nom} \cdot z} \leq 0,5$$

$\alpha_{cw} = 1$ en elementos no pretensados

$$v_1 = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right)$$

$$z = 0.9 \cdot d$$

En el caso de que la $\cotg \theta$ esté por debajo de 1, el valor tomado es 1 y, en caso de que el valor sea mayor a 2.5, el valor de $\cotg \theta$ a tomar es de 2.5. En estos dos casos, el cálculo de la armadura a cortante se realiza como $\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed}}{z \cdot f_{ywd} \cdot \cotg \theta}$

En caso de que la $\cotg \theta$ calculada esté entre 1 y 2.5, se recalcula la $\cotg \theta$ con $v_1 = 0.9 - \frac{f_{ck}}{250}$ y el valor de f_{ywd} se reduce a $0.8 \cdot f_{ywd}$

6.8 RASANTE

UNE-EN 1992-1-1:2013 (Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación)

En el estudio de rasante se verifica que $V_{Ed} \leq V_{Rd,i}$

Se realizan los cálculos en a la sección más crítica, en la junta de arranque del fuste del muro.

Se calcula

$$V_{Ed,i} = V_{ed} / (z \cdot b_i)$$

Siendo z (el brazo mecánico) = $0.9d$ y b_i el ancho de la sección

$V_{Rd,i}$ (tensión rasante resistente) se calcula como el mínimo entre V , $V_{Rd,min}$ y V_{Rd}

Siendo:

- $V_{Rd,min} = c \cdot f_{ctd} + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)$
- f_{ctd} (resistencia de cálculo a tracción del hormigón)
- $f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk,0.05} / \gamma_c$
- $f_{ctk,0.05} = 0.7 \cdot f_{ctm}$
- $f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)}$
- $\rho = A_{sw} / (s \cdot b_i)$
- $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$
- $c = 0.2$; $\mu = 0.6$ (superficie Lisa, cargas No dinámicas)
- $V_{Rd} = 0.5 \cdot v \cdot f_{cd}$
- $v = 0.6 \cdot (1 - f_{ck}/250)$
- $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$

Finalmente, si no se cumple que $V_{Ed} < V_{Rd,i}$, se procede al cálculo de la armadura necesaria por rasante como:

$$A_{sw} \geq \frac{V_{Ed} \cdot 8}{z \cdot f_{ywd}} \cdot \cot g(\theta)$$

Siendo A_{sw} el área de la armadura transversal necesaria, V_{Ed} el valor de diseño del esfuerzo cortante, z es el brazo mecánico (que se puede aproximar a $0.9d$), f_{ywd} el límite elástico de cálculo del acero y θ el ángulo de la biela comprimida y el eje longitudinal del elemento.



6.9 DETALLES CONSTRUCTIVOS

Para asegurar la correcta ejecución y durabilidad del diseño del alzado del muro ménsula prefabricado de hormigón, se deben seguir los siguientes detalles constructivos:

- Armadura vertical

La armadura vertical debe cumplir con los siguientes mínimos establecidos por la normativa vigente:

$$A_{sv} = 0.022 * A_c$$

Donde A_{sv} es el área de la armadura vertical y A_c es el área de la sección de hormigón.

La separación máxima entre barras es de 30 centímetros

- Armadura horizontal

El diseño de la armadura horizontal del muro ménsula se hace en función de los resultados obtenidos en flexión longitudinal de manera que:

$$A_s(t) = 0.2 * A_s(l)$$
$$A_s'(t) = 0.2 * A_s'(h)$$

La separación no debe exceder los 30 centímetros en muros de hasta 3 metros de altura y 20 centímetros en muros superiores a 3 metros.

6.10 FISURACIÓN

UNE-EN 1992-1-1:2013 (Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación Artículo 7.3)

En este apartado se determina el cumplimiento del ELS de Fisuración.

Primero se comprueba si la sección fisura.

Dada la clase de exposición que se especifique en “*Datos a introducir*”, se determina la abertura de fisura máxima.

CLASE	Equivalente EHE-08	$w_{m\acute{a}x}$ [mm]	
		Armado ó HP con tend. No adh.	Pretensado
		Combinación cuasipermanente	Combinación frecuente
X0\ XC1	I	0.40	0.20
XC1 \ XC2\ XC3\ XC4 XF1\ XF3	IIa, IIb H	0.30	0.20 ⁽¹⁾
XS1\ XS2 XD1\ XD2\ XD3 XF2\ XF4 XA1	IIIa, IIIb IV F Qa	0.20	Descompresión $\sigma_{c,min}(N_{frec}, M_{frec}) \geq 0$
XS3 XA2\ XA3	IIIc Qb, Qc	0.10	

$$^{(1)} \sigma_{cp}(N_{qp}, M_{qp}) > 0$$

EN 1992-1-1:2004 (Art. 7.3.1)

A continuación, se calcula el momento de fisuración como $M_{fis} = \frac{f_{ctm} * I_b}{h/2}$ siendo I_b la inercia bruta. En el caso de que el momento obtenido mediante la combinación característica y casi-permanente (según se detalla en el apartado de *cálculo de acciones*) supere el valor del momento de fisuración calculado, se considera que la sección ha fisurado.

Se procede al cálculo de la fibra neutra (x). Para ello, se despeja el valor de la siguiente expresión:

$$S_{A-A'}(x) = 0; \frac{1}{2} * b * x^2 + (n - 1) * A'_s * (x - d') + n * A_s * (x - d) = 0$$

Con el valor de x obtenido, se calcula el momento de inercia de la sección fisurada respecto a su centro de gravedad.

$$I_f = \frac{1}{3} * b * x^3 + (n - 1) * A'_s * (x - d')^2 + n * A_s * (x - d)^2$$

Con estos resultados, se realiza una verificación para asegurar que se cumplen todas las limitaciones tensionales establecidas:

Limitaciones tensionales para evitar fisuras longitudinales y micro fisuras de compresión

$$\sigma_{c,max}(N_{caract}, M_{caract},) \leq 0.6f_{ck},$$

$$\sigma_{c,max} = \frac{M_{Ed}}{I_f} (-x).$$

Limitación de tensiones de tracción en la armadura.

$$\sigma_{s,max}(N_{caract}, M_{caract},) \geq -0.8f_{yk},$$
$$\sigma_{c,max} = n \frac{M_{Ed}}{I_f} (d - x).$$

Finalmente se realiza un control de la fisuración, para ello se verifica que:

$$w_k(N_{qp}, M_{qp},) = S_{r,max} * (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sm}) \leq w_{max}$$

El valor de w_{max} ya se ha calculado anteriormente, para el cálculo de $S_{r,max}$ y $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sm}$ se utilizan las siguientes expresiones:

$$S_{r,max} = 3.4c + 0.425 * k_1 * k_2 * \frac{\phi_{eq}}{\rho_{p,eff}}$$

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{b * h_{c,ef}}$$

$$h_{c,ef} = \min(2.5(h - d); \frac{h - x}{3}; \frac{h}{2})$$

$$\phi_{eq} = \frac{n_1 \phi_1^2 + n_2 \phi_2^2}{n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2}$$

$k_1 = 0.8$ para barras con alta adherencia y 0.4 para barras con superficie lisa
 $k_2 = 1$ en tracción pura y 0.5 en flexión

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sm} = \left(\frac{1}{E_s}\right) * (\sigma_s - k_t * \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e * \rho_{p,eff})) \geq \frac{0.6\sigma_s}{E_s}$$



7) ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Una vez preparada la hoja de cálculo, se ha procedido a hacer un estudio paramétrico.

En este análisis, se evalúa el comportamiento con canto constante y variable, considerando diferentes alturas y pendientes.

El objetivo de este estudio es analizar y comparar diferentes diseños muros en términos de:

- Reducción de costos: el objetivo principal del estudio es estudiar, evaluar e identificar las soluciones más económicas sin comprometer la calidad del producto final.
- Optimización de materiales: se busca identificar la cantidad de hormigón y acero necesario para diferentes diseños para minimizar el uso de materiales e, indirectamente, el coste total del muro.
- Eficiencia estructural: se busca que la estructura diseñada sea segura y duradera.
- Viabilidad económica
- Cumplimiento de la normativa
- Facilidad de transporte: los muros propuestos deben cumplir con las restricciones de peso y dimensiones para el transporte.

Para llevar a cabo el estudio, se ha utilizado la hoja de cálculo explicada anteriormente, que permite calcular y diseñar la estructura de hormigón armado.

7.1 CANTO CONSTANTE

Se ha realizado un estudio inicial con muros de canto constante, considerando alturas que varían desde 2 metros hasta 7 metros. Esta elección de altura máxima se basa en criterios prácticos y normativos, ya que alturas superiores suelen requerir diseños más complejos y refuerzos adicionales, lo que podría comprometer la eficiencia del proceso constructivo y aumentar significativamente los costes.

Se ha tomado como espesor de cabeza el 10% de la altura, por lo que, para un muro de 2 metros de altura, el espesor de cabeza (y de todo el alzado) será de 0.2 metros.

Esta relación del 10% es ampliamente utilizada en diseño estructural, ya que proporciona suficiente rigidez al muro sin incurrir en un sobredimensionamiento innecesario que podría afectar la viabilidad del transporte y la instalación de las piezas.

Para un muro de **dos metros** de altura y **canto constante**, con las siguientes características:

Tabla 10. Datos geométricos, muro de dos metros y canto constante (Fuente propia)

H	2	m
Longitud punta (l_p)	1	m
Longitud talón (l_t)	1	m
Longitud de la zapata (B)	2,2	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	1	m
Espesor mínimo en coronación (e_c)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	90	grados
Ángulo mínimo en intradós	90	grados
d'	0,05	m

El armado necesario es el que se muestra a continuación

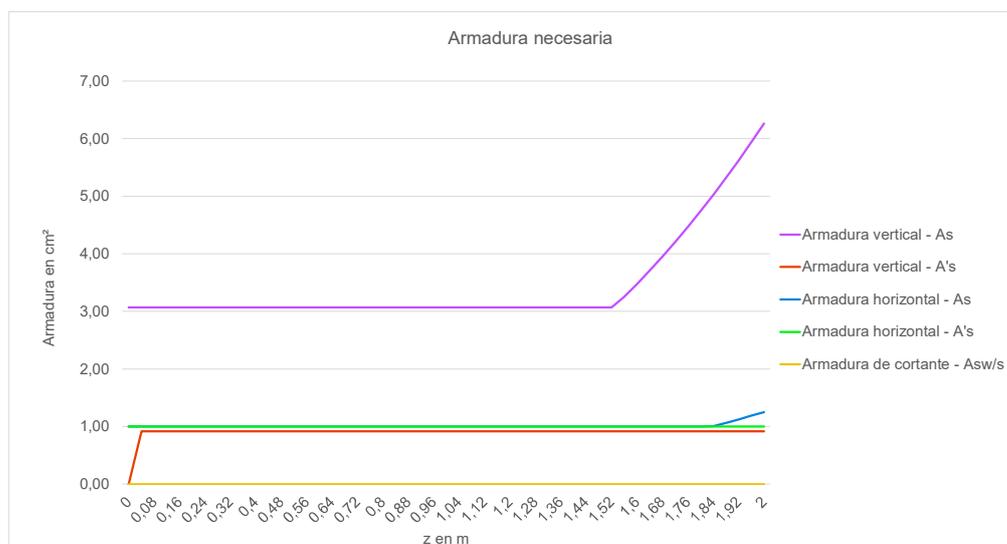


Figura 26. Cuantía de armado necesaria para un muro de dos metros y canto constante. (Fuente propia)



Tabla 11. Cuantía de armado necesaria para un muro de dos metros y canto constante (Fuente propia)

Z m	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As cm ²	A's cm ²	As cm ²	A's cm ²	Asw/s cm ²
0,00	3,07	0,00	1,00	1,00	0,00
0,04	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,08	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,12	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,16	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,20	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,24	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,28	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,32	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,36	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,40	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,44	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,48	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,52	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,56	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,60	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,64	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,68	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,72	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,76	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,80	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,84	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,88	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,92	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,96	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,00	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,04	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,08	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,12	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,16	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,20	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,24	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,28	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,32	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,36	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,40	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,44	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,48	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
1,52	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00



1,56	3,25	0,92	1,00	1,00	0,00
1,60	3,47	0,92	1,00	1,00	0,00
1,64	3,71	0,92	1,00	1,00	0,00
1,68	3,95	0,92	1,00	1,00	0,00
1,72	4,20	0,92	1,00	1,00	0,00
1,76	4,46	0,92	1,00	1,00	0,00
1,80	4,74	0,92	1,00	1,00	0,00
1,84	5,02	0,92	1,00	1,00	0,00
1,88	5,31	0,92	1,06	1,00	0,00
1,92	5,62	0,92	1,12	1,00	0,00
1,96	5,94	0,92	1,19	1,00	0,00
2,00	6,26	0,92	1,25	1,00	0,00

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesita un total de 15.31 kg de acero y 0.4 m³ de hormigón por metro lineal.

Tabla 12. Muro de 2 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D U R A V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	V1	11	10	100 _____2000	0,616537558	2100	1,294728872	4	5,178915489
Vr1	11	10	100 _____440	0,616537558	540	0,332930281	4	1,331721126	
V2	11	8	80 _____2000	0,394584037	2080	0,820734798	4	3,28293919	
Vr2	0	16	160 _____0	1,578336149	160	0,252533784	0	0	
H O R R I Z O N T A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8	_____1000	0,394584037	1000	0,394584037	7	2,762088261
	Hr1	0	20	_____0	2,466150233	0	0	0	0
	H2	0	8	_____1000	0,394584037	1000	0,394584037	7	2,762088261
Hr1	0	20	_____0	2,466150233	0	0	0	0	

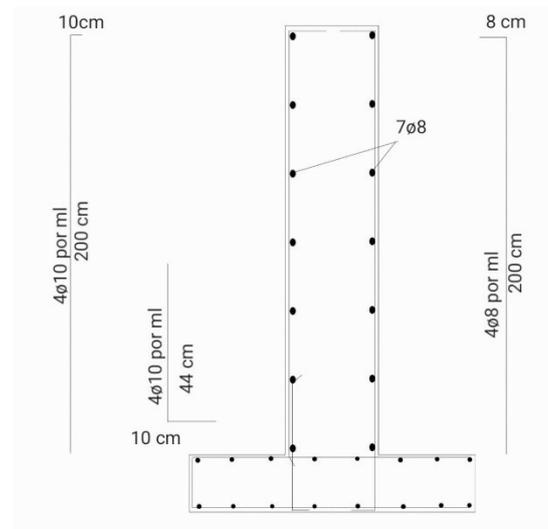


Figura 27. Disposición del armado para un muro de dos metros y canto constante (Fuente propia)

Para un muro de **tres metros** de altura y **canto constante**, con las siguientes características:

Tabla 13. Datos geométricos, muro de tres metros y canto constante (Fuente propia)

H	3	m
Longitud punta (l_p)	1,5	m
Longitud talón (l_t)	1	m
Longitud de la zapata (B)	2,8	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	1,5	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	90	grados
Ángulo mínimo en intradós	90	grados
d'	0,05	m

El armado necesario se muestra a continuación:

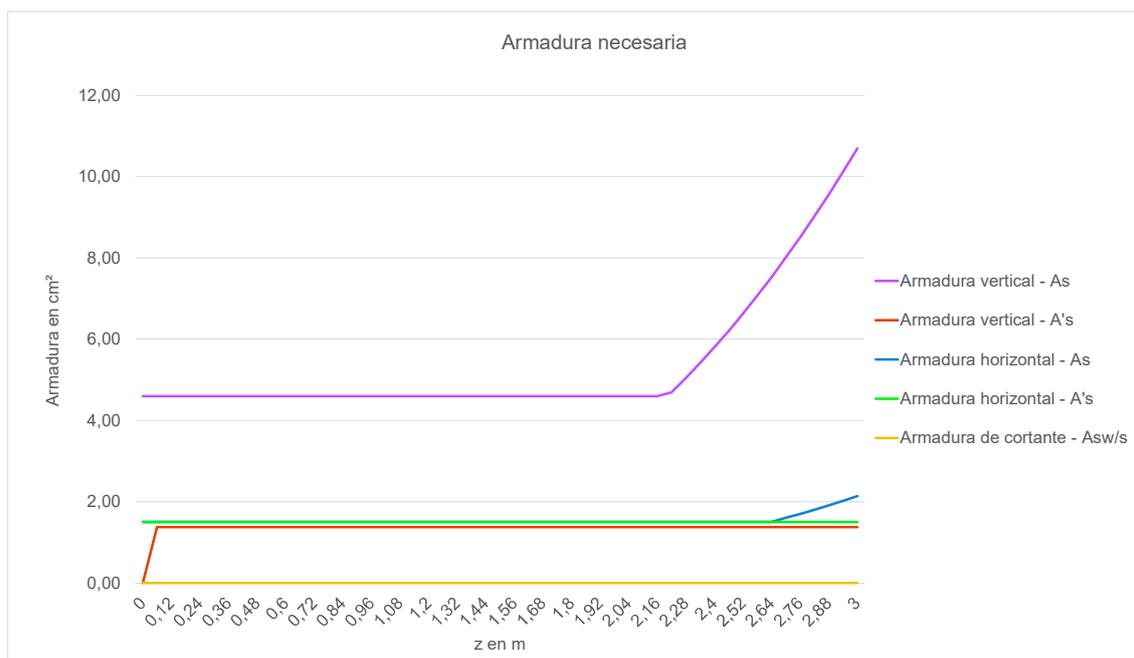


Figura 28. Cuantía de armado necesaria para un muro de tres metros y canto constante. (Fuente propia)

Tabla 14. Cuantía de armado necesaria para un muro de tres metros y canto constante (Fuente propia)

Z m	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As cm ²	A's cm ²	As cm ²	A's cm ²	Asw/s cm ²
0,00	4,60	0,00	1,50	1,50	0,00
0,06	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,12	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,18	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,24	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,30	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,36	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,42	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,48	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,54	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,60	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,66	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,72	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,78	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,84	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,90	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
0,96	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,02	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00



1,08	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,14	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,20	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,26	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,32	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,38	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,44	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,50	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,56	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,62	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,68	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,74	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,80	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,86	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,92	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
1,98	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
2,04	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
2,10	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
2,16	4,60	1,38	1,50	1,50	0,00
2,22	4,69	1,38	1,50	1,50	0,00
2,28	5,04	1,38	1,50	1,50	0,00
2,34	5,41	1,38	1,50	1,50	0,00
2,40	5,80	1,38	1,50	1,50	0,00
2,46	6,20	1,38	1,50	1,50	0,00
2,52	6,62	1,38	1,50	1,50	0,00
2,58	7,06	1,38	1,50	1,50	0,00
2,64	7,52	1,38	1,50	1,50	0,00
2,70	8,00	1,38	1,60	1,50	0,00
2,76	8,50	1,38	1,70	1,50	0,00
2,82	9,02	1,38	1,80	1,50	0,00
2,88	9,56	1,38	1,91	1,50	0,00
2,94	10,12	1,38	2,02	1,50	0,00
3,00	10,70	1,38	2,14	1,50	0,00

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesita un total de 32.07 kg de acero y 0.9 m³ de hormigón por metro lineal.

Tabla 15. Muro de 3 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D U R A	V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
		V1	11	12	120	3000	0,887814084	3120	2,769979942	6
Vr1	11	12	120	420	0,887814084	540	0,479419605	4	1,917678421	
V2	11	8	80	3000	0,394584037	3080	1,215318835	4	4,861275339	
Vr2	0	16	160	0	1,578336149	160	0,252533784	0	0	

H O R R I Z O N T A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8	1000	1000	0,394584037	1000	0,394584037	11
Hr1	0	20	0	0	2,466150233	0	0	0	0
H2	0	8	1000	1000	0,394584037	1000	0,394584037	11	4,34042441
Hr1	0	20	0	0	2,466150233	0	0	0	0

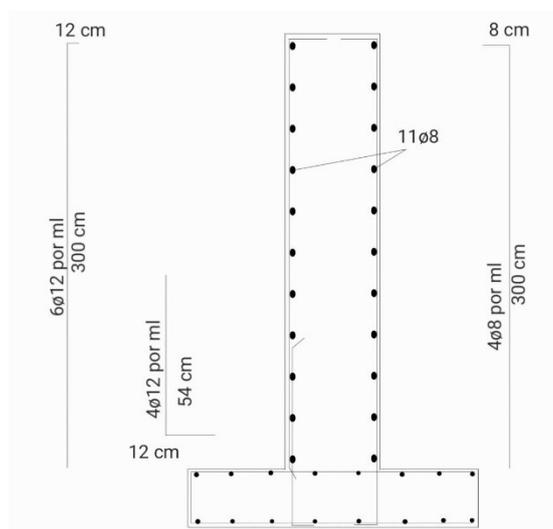


Figura 29. Disposición del armado para un muro de tres metros y canto constante (Fuente propia)

Para un muro de **cuatro metros** de altura y **canto constante**, con las siguientes características:

Tabla 16. Datos geométricos, muro de cuatro metros y canto constante (Fuente propia)

H	4	m
Longitud punta (lp)	1,5	m
Longitud talón (lt)	1,5	m
Longitud de la zapata (B)	3,4	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	2	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	90	grados
Ángulo mínimo en intradós	90	grados
d'	0,05	m

El armado necesario se muestra a continuación:

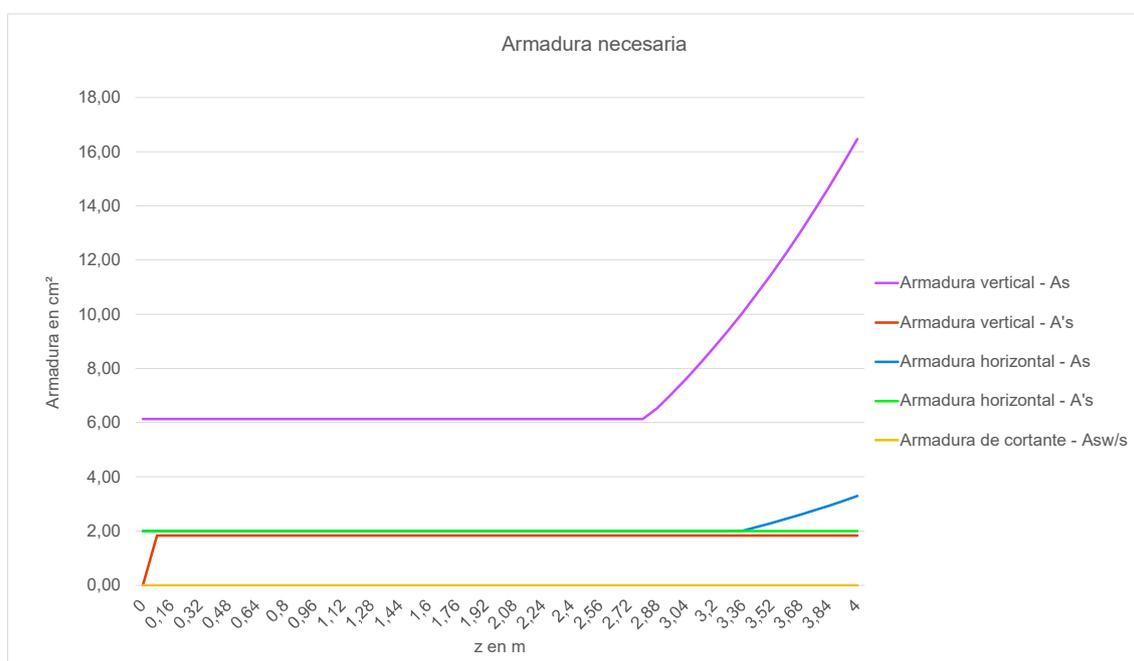


Figura 30. Cuantía de armado necesaria para un muro de cuatro metros y canto constante. (Fuente propia)



Tabla 17. Cuantía de armado necesaria para un muro de cuatro metros y canto constante (Fuente propia)

Z m	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As cm ²	A's cm ²	As cm ²	A's cm ²	Asw/s cm ²
0,00	6,13	0,00	2,00	2,00	0,00
0,08	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,16	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,24	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,32	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,40	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,48	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,56	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,64	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,72	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,80	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,88	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
0,96	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,04	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,12	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,20	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,28	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,36	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,44	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,52	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,60	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,68	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,76	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,84	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
1,92	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,00	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,08	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,16	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,24	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,32	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,40	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,48	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,56	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,64	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,72	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,80	6,13	1,84	2,00	2,00	0,00
2,88	6,54	1,84	2,00	2,00	0,00
2,96	7,06	1,84	2,00	2,00	0,00
3,04	7,61	1,84	2,00	2,00	0,00

3,12	8,18	1,84	2,00	2,00	0,00
3,20	8,78	1,84	2,00	2,00	0,00
3,28	9,41	1,84	2,00	2,00	0,00
3,36	10,07	1,84	2,01	2,00	0,00
3,44	10,76	1,84	2,15	2,00	0,00
3,52	11,48	1,84	2,30	2,00	0,00
3,60	12,23	1,84	2,45	2,00	0,00
3,68	13,01	1,84	2,60	2,00	0,00
3,76	13,83	1,84	2,77	2,00	0,00
3,84	14,67	1,84	2,93	2,00	0,00
3,92	15,55	1,84	3,11	2,00	0,00
4,00	16,47	1,84	3,29	2,00	0,00

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesita un total de 47.01 kg de acero y 1.6 m³ de hormigón por metro lineal.

Tabla 18. Muro de 4 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D U R A	V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)	
		V1	11	12	120	4000	0,887814084	4120	3,657794026	6	21,94678415
		Vr1	11	16	160	1040	1,578336149	1200	1,894003379	4	7,576013516
		V2	11	8	80	4000	0,394584037	4080	1,609902872	4	6,439611489
		Vr2	0	16	160	0	1,578336149	160	0,252533784	0	0

H O R R I Z O N T A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	14	5,524178522
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0
	H2	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	14	5,524178522
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0

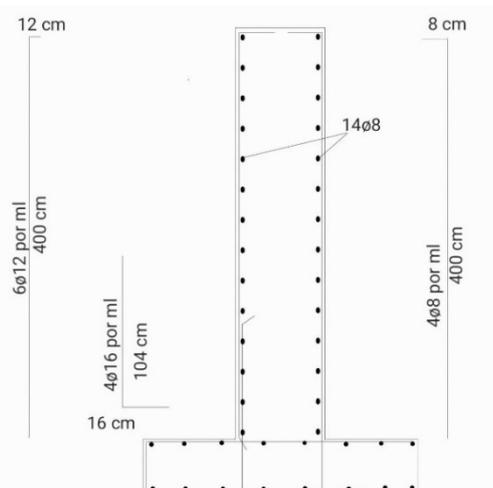


Figura 31. Disposición del armado para un muro de cuatro metros y canto constante (Fuente propia)

Para un muro de **cinco metros** de altura y **canto constante**, con las siguientes características:

Tabla 19. Datos geométricos, muro de cinco metros y canto constante (Fuente propia)

H	5	m
Longitud punta (lp)	2	m
Longitud talón (lt)	1,5	m
Longitud de la zapata (B)	3,4	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	2,5	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	90	grados
Ángulo mínimo en intradós	90	grados
d'	0,05	m

El armado necesario es el que se muestra a continuación:

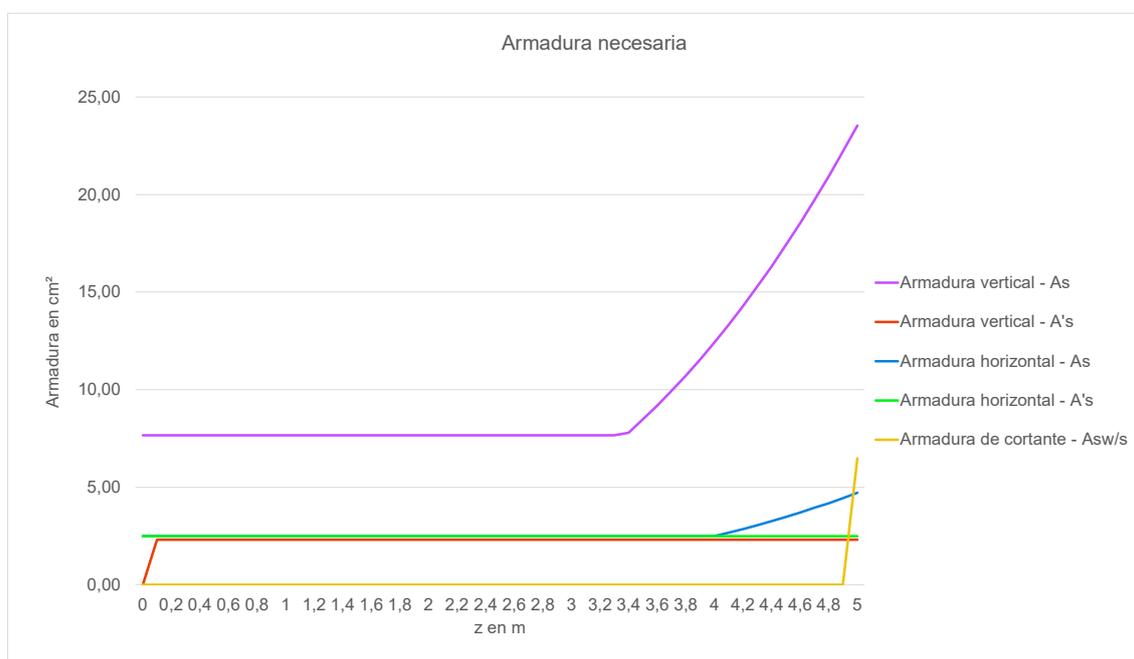


Figura 32. Cuantía de armado necesaria para un muro de cinco metros y canto constante. (Fuente propia)



Tabla 20. Cuantía de armado necesaria para un muro de cinco metros y canto constante (Fuente propia)

Z m	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As cm ²	A's cm ²	As cm ²	A's cm ²	Asw/s cm ²
0,00	7,67	0,00	2,50	2,50	0,00
0,10	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
0,20	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
0,30	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
0,40	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
0,50	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
0,60	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
0,70	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
0,80	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
0,90	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
1,00	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
1,10	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
1,20	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
1,30	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
1,40	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
1,50	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
1,60	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
1,70	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
1,80	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
1,90	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
2,00	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
2,10	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
2,20	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
2,30	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
2,40	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
2,50	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
2,60	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
2,70	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
2,80	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
2,90	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
3,00	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
3,10	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
3,20	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
3,30	7,67	2,30	2,50	2,50	0,00
3,40	7,79	2,30	2,50	2,50	0,00
3,50	8,47	2,30	2,50	2,50	0,00
3,60	9,18	2,30	2,50	2,50	0,00
3,70	9,93	2,30	2,50	2,50	0,00
3,80	10,72	2,30	2,50	2,50	0,00

3,90	11,54	2,30	2,50	2,50	0,00
4,00	12,41	2,30	2,50	2,50	0,00
4,10	13,32	2,30	2,66	2,50	0,00
4,20	14,27	2,30	2,85	2,50	0,00
4,30	15,26	2,30	3,05	2,50	0,00
4,40	16,30	2,30	3,26	2,50	0,00
4,50	17,39	2,30	3,48	2,50	0,00
4,60	18,52	2,30	3,70	2,50	0,00
4,70	19,70	2,30	3,94	2,50	0,00
4,80	20,93	2,30	4,19	2,50	0,00
4,90	22,20	2,30	4,44	2,50	0,00
5,00	23,53	2,30	4,71	2,50	0,00

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesita un total de 89.10 kg de acero y 2.5 m³ de hormigón por metro lineal.

Tabla 21. Muro de 5 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D O U R A V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
		V1	11	16	160 5000	1,578336149	5160	8,14421453	6
	Vr1	11	20	200 1300	2,466150233	1500	3,69922535	4	14,7969014
	V2	11	8	80 5000	0,394584037	5080	2,004486909	6	12,02692146
	Vr2	0	16	160 0	1,578336149	160	0,252533784	0	0
H O R R I Z O N T A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	17	6,707928634
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0
	H2	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	17	6,707928634
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0

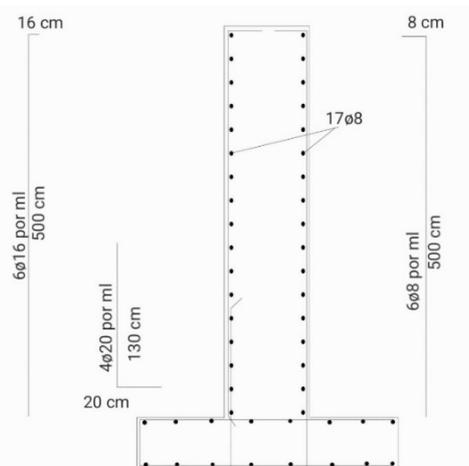


Figura 33. Disposición del armado para un muro de cinco metros y canto constante (Fuente propia)

Para un muro de **seis metros** de altura y **canto constante**, con las siguientes características:

Tabla 22. Datos geométricos, muro de seis metros y canto constante (Fuente propia)

H	6	m
Longitud punta (lp)	2	m
Longitud talón (lt)	2	m
Longitud de la zapata (B)	3,4	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	3	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	90	grados
Ángulo mínimo en intradós	90	grados
d'	0,05	m

El armado necesario es el que se muestra a continuación:

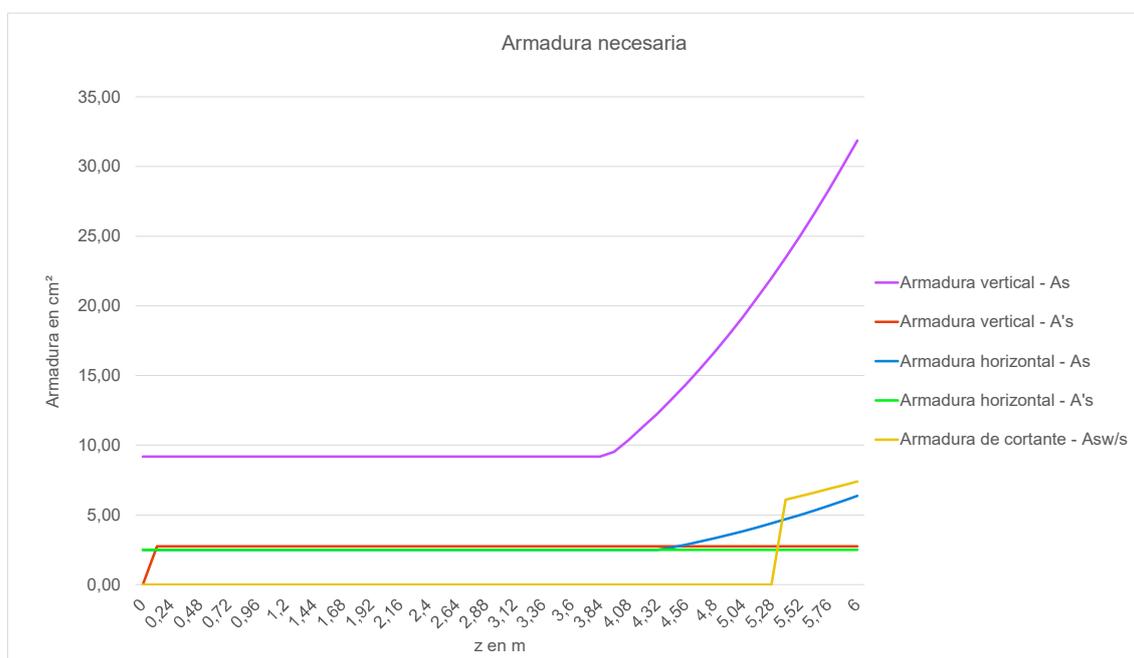


Figura 34. Cuantía de armado necesaria para un muro de seis metros y canto constante. (Fuente propia)

Z	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As	A's	As	A's	Asw/s
m	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²
0,00	9,20	0,00	2,50	2,50	0,00
0,12	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
0,24	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
0,36	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
0,48	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
0,60	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
0,72	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00



0,84	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
0,96	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
1,08	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
1,20	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
1,32	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
1,44	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
1,56	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
1,68	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
1,80	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
1,92	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
2,04	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
2,16	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
2,28	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
2,40	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
2,52	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
2,64	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
2,76	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
2,88	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
3,00	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
3,12	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
3,24	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
3,36	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
3,48	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
3,60	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
3,72	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
3,84	9,20	2,76	2,50	2,50	0,00
3,96	9,53	2,76	2,50	2,50	0,00
4,08	10,39	2,76	2,50	2,50	0,00
4,20	11,31	2,76	2,50	2,50	0,00
4,32	12,27	2,76	2,50	2,50	0,00
4,44	13,29	2,76	2,66	2,50	0,00
4,56	14,36	2,76	2,87	2,50	0,00
4,68	15,49	2,76	3,10	2,50	0,00
4,80	16,67	2,76	3,33	2,50	0,00
4,92	17,91	2,76	3,58	2,50	0,00
5,04	19,21	2,76	3,84	2,50	0,00
5,16	20,56	2,76	4,11	2,50	0,00
5,28	21,98	2,76	4,40	2,50	0,00
5,40	23,47	2,76	4,69	2,50	6,10
5,52	25,01	2,76	5,00	2,50	6,36
5,64	26,63	2,76	5,33	2,50	6,61
5,76	28,31	2,76	5,66	2,50	6,88
5,88	30,06	2,76	6,01	2,50	7,14
6,00	31,87	2,76	6,37	2,50	7,42

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesita un total de 120.08 kg de acero y 3.6 m³ de hormigón por metro lineal. A diferencia de los muros estudiados hasta ahora, puede observarse cómo, en este caso, la armadura de cortante sí que es necesaria.

Tabla 23. Muro de 6 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D U R A	V	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)	
		V1	11	16	160	6000	1,578336149	6160	9,722550679	6	58,33530407
		Vr1	11	20	200	1680	2,466150233	1680	4,636362438	6	27,81817463
		V2	11	8	80	6000	0,394584037	6080	2,399070947	6	14,39442568
		Vr2	0	16	160	0	1,578336149	160	0,252533784	0	0

H O R M I C O N T A L	H	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
		H1	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	21	8,286264783
		Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0
		H2	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	21	8,286264783
		Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0

Tabla 24. Muro de seis metros y canto constante. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia)

z (m)	Asw/s Requerida (cm ² /m)	Separación de estribos (mm)	Número de estribos en tramo	Asw/s Dispuesta (cm ² /m)	Peso total de estribos (kg)
5.40	6.10	100	6	7.85	2.96
5.52	6.36	100	6	7.85	2.96
5.64	6.61	100	6	7.85	2.96
5.76	6.88	100	6	7.85	2.96
5.88	7.14	100	6	7.85	2.96

Longitud total del tramo: 0.60 m	Diámetro de estribo: 10 mm
Número total de estribos: 6 estribos	Área de estribo (A): 78.54 mm ²
Peso total del acero: 2.96 kg	Separación de estribos (s): 100 mm (para cumplir con la cuantía mínima requerida)

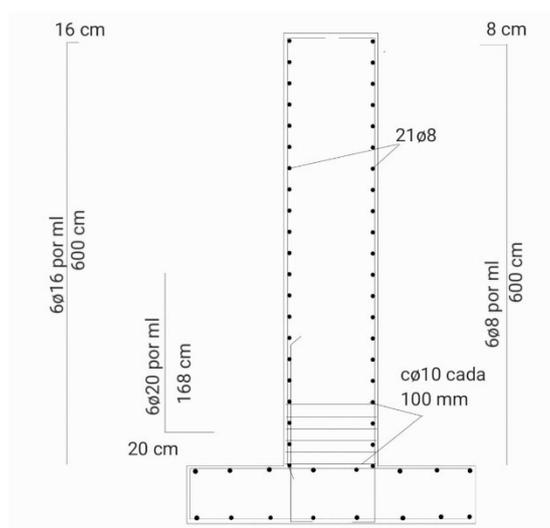


Figura 35. Disposición del armado para un muro de seis metros y canto constante (Fuente propia)

Para un muro de **siete metros** de altura y **canto constante**, con las siguientes características:

Tabla 25. Datos geométricos, muro de siete metros y canto constante (Fuente propia)

H	7	m
Longitud punta (lp)	2,5	m
Longitud talón (lt)	2,5	m
Longitud de la zapata (B)	3,4	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	3	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	90	grados
Ángulo mínimo en intradós	90	grados
d'	0,05	m

El armado necesario es el que se muestra a continuación:

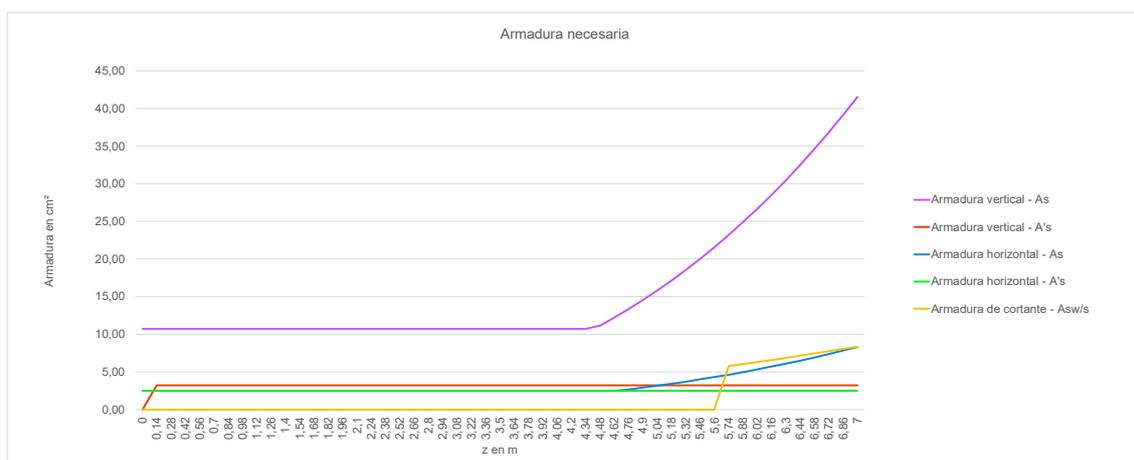


Figura 36. Cuantía de armado necesaria para un muro de siete metros y canto constante. (Fuente propia)



Tabla 26. Cuantía de armado necesaria para un muro de siete metros y canto constante.
 (Fuente propia)

Z m	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As cm ²	A's cm ²	As cm ²	A's cm ²	Asw/s cm ²
0,00	10,73	0,00	2,50	2,50	0,00
0,14	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,28	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,42	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,56	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,70	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,84	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,98	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,12	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,26	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,40	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,54	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,68	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,82	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,96	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,10	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,24	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,38	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,52	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,66	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,80	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,94	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,08	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,22	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,36	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,50	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,64	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,78	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,92	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
4,06	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
4,20	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
4,34	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
4,48	11,17	3,22	2,50	2,50	0,00
4,62	12,23	3,22	2,50	2,50	0,00
4,76	13,36	3,22	2,67	2,50	0,00
4,90	14,55	3,22	2,91	2,50	0,00
5,04	15,81	3,22	3,16	2,50	0,00
5,18	17,14	3,22	3,43	2,50	0,00
5,32	18,54	3,22	3,71	2,50	0,00



5,46	20,01	3,22	4,00	2,50	0,00
5,60	21,56	3,22	4,31	2,50	0,00
5,74	23,18	3,22	4,64	2,50	5,78
5,88	24,88	3,22	4,98	2,50	6,04
6,02	26,66	3,22	5,33	2,50	6,31
6,16	28,52	3,22	5,70	2,50	6,59
6,30	30,46	3,22	6,09	2,50	6,87
6,44	32,49	3,22	6,50	2,50	7,16
6,58	34,61	3,22	6,92	2,50	7,45
6,72	36,81	3,22	7,36	2,50	7,75
6,86	39,11	3,22	7,82	2,50	8,05
7,00	41,50	3,22	8,30	2,50	8,36

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesita un total de 181.95 kg de acero y 4.9 m³ de hormigón por metro lineal. Igual que el muro anterior, este muro también necesita armadura de cortante.

Tabla 27. Muro de 7 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D U R A	V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
		V1	11	20	200	7000	2,466150233	7200	17,75628168	6
Vr1	11	20	200	1540	2,466150233	1740	4,291101406	6	25,74660843	
V2	11	10	100	7000	0,616537558	7100	4,377416664	6	26,26449998	
Vr2	0	16	160	0	1,578336149	160	0,252533784	0	0	

H O R R I Z O N A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8		1000	0,394584037	1000	0,394584037	24
Hr1	0	20		0	2,466150233	0	0	0	0
H2	0	8		1000	0,394584037	1000	0,394584037	24	9,470016895
Hr1	0	20		0	2,466150233	0	0	0	0

Tabla 28. Muro de siete metros y canto constante. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia)

z (m)	Asw's Requerida (cm ² /m)	Separación de estribos (mm)	Número de estribos en tramo	Asw's Dispuesta (cm ² /m)	Peso total de estribos (kg)
5.74	5.78	130	10	8.70	4.47
5.88	6.04	130	10	8.70	4.47
6.02	6.31	130	10	8.70	4.47
6.16	6.59	130	10	8.70	4.47
6.30	6.87	130	10	8.70	4.47
6.44	7.15	130	10	8.70	4.47
6.58	7.45	130	10	8.70	4.47
6.72	7.75	130	10	8.70	4.47
6.86	8.05	130	10	8.70	4.47
7.00	8.36	130	10	8.70	4.47

Longitud total del tramo: 1.26 m	Diámetro de estribo: 12 mm
Número total de estribos: 10 estribos	Área de estribo (A): 113.10 mm ²
Peso total del acero: 4.47 kg	Separación de estribos (s): 135 mm (ajustado a 130 mm para simplificar)

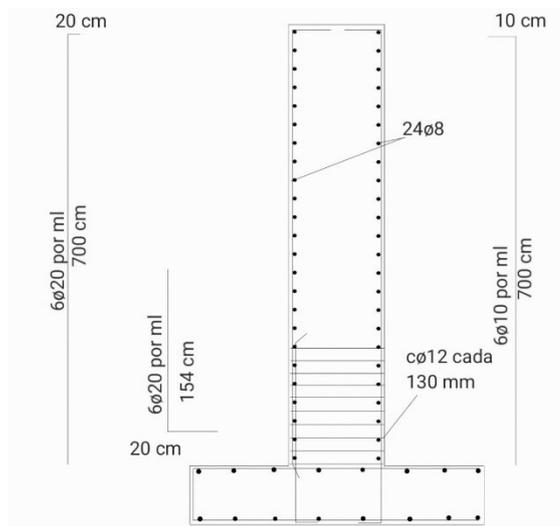
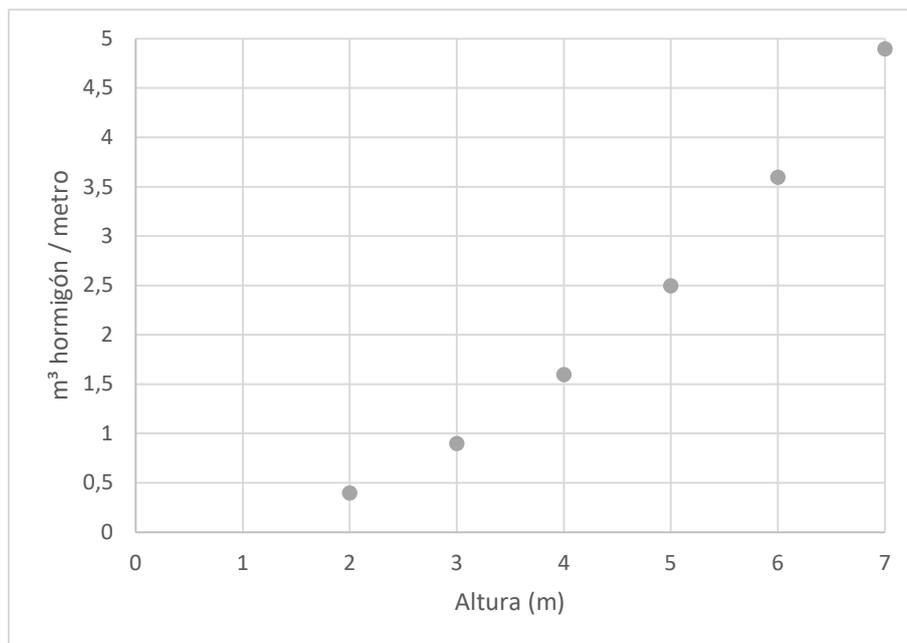


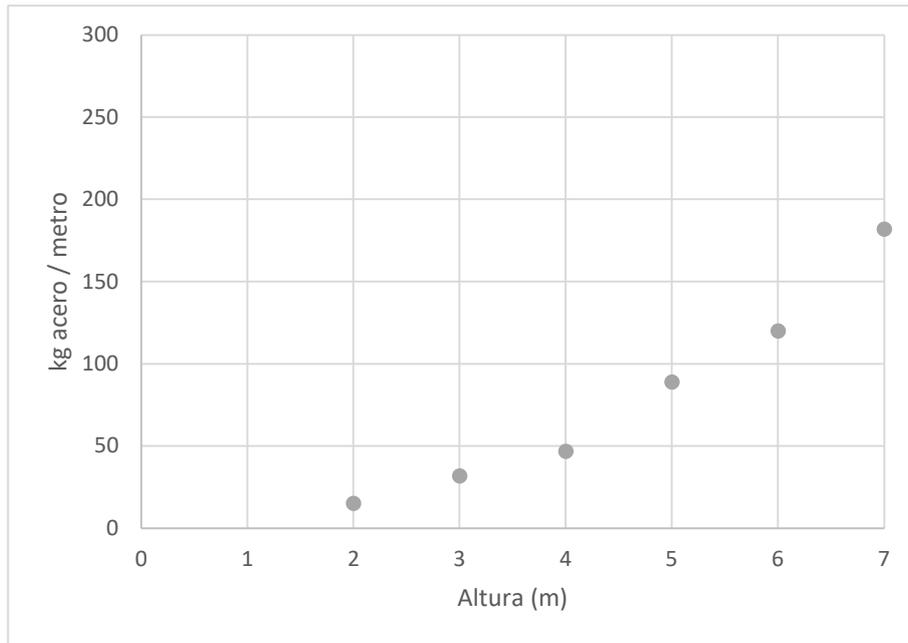
Figura 37. Disposición del armado para un muro de siete metros y canto constante (Fuente propia)

Recogiendo los datos obtenidos hasta ahora, se concluye que todas las alternativas con el canto constante no solo cumplen ampliamente con la restricción de peso, sino que también satisfacen de manera efectiva las limitaciones dimensionales establecidas para el transporte:

Tabla 29. Resumen resultados de muro de canto constante (Fuente: propia)

CANTO CONSTANTE			
altura	canto	m ³ hormigón / metro	kg acero / metro
2	0,2	0,4	15,31
3	0,3	0,9	32,07
4	0,4	1,6	47,01
5	0,5	2,5	89,10
6	0,6	3,6	120,08
7	0,7	4,9	181,95





7.2 CANTO VARIABLE

A continuación, se realiza el mismo estudio para muros con canto variable. Para ello, se han estudiado muros de entre 2 y 7 metros y una pendiente inicialmente prevista de 5 grados.

El ancho en la base del alzado del muro, igual que en el caso de canto constante, es una décima parte de la altura.

Se impone un espesor mínimo en coronación de 0.15 metros. Teniendo en cuenta que la unión en el arranque del muro se calcula como el máximo entre $H/10$ y el espesor mínimo exigido en coronación, para respetar la altura solicitada, no siempre será posible disponer una pendiente con 5 grados a ambos lados.

Por facilidad constructiva, se ha decidido que en cada muro, la pendiente en el intradós y en el trasdós sea igual.

Para una altura de **dos metros**, la pendiente máxima para respetar los mínimos geométricos es de 0.72 grados. Por lo tanto, la geometría del muro es la siguiente:

Tabla 30. Datos geométricos, muro de dos metros y canto variable (Fuente propia)

H	2	m
Longitud punta (lp)	1	m
Longitud talón (lt)	1	m
Longitud de la zapata (B)	2,2	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	1	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	89,28	grados
Ángulo mínimo en intradós	89,28	grados
d'	0,05	m

El armado necesario es el siguiente:

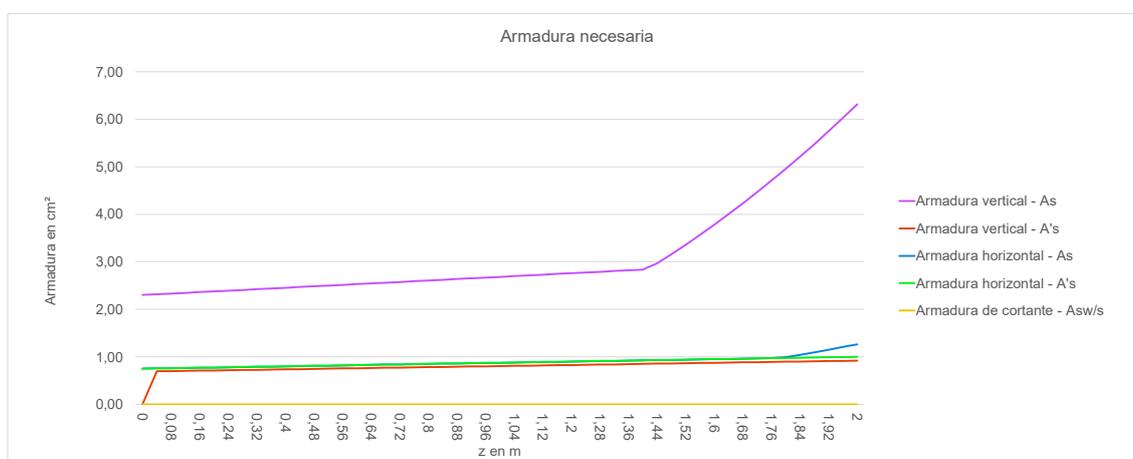


Figura 38. Cuantía de armado necesaria para un muro de dos metros y canto variable. (Fuente propia)



Tabla 31. Cuantía de armado necesaria para un muro de dos metros y canto variable. (Fuente propia)

Z m	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As cm ²	A's cm ²	As cm ²	A's cm ²	Asw/s cm ²
0,00	2,30	0,00	0,75	0,75	0,00
0,04	2,32	0,69	0,76	0,76	0,00
0,08	2,33	0,70	0,76	0,76	0,00
0,12	2,35	0,70	0,77	0,77	0,00
0,16	2,36	0,71	0,77	0,77	0,00
0,20	2,38	0,71	0,78	0,78	0,00
0,24	2,39	0,72	0,78	0,78	0,00
0,28	2,41	0,72	0,79	0,79	0,00
0,32	2,42	0,73	0,79	0,79	0,00
0,36	2,44	0,73	0,80	0,80	0,00
0,40	2,45	0,74	0,80	0,80	0,00
0,44	2,47	0,74	0,81	0,81	0,00
0,48	2,48	0,75	0,81	0,81	0,00
0,52	2,50	0,75	0,82	0,82	0,00
0,56	2,51	0,75	0,82	0,82	0,00
0,60	2,53	0,76	0,83	0,83	0,00
0,64	2,55	0,76	0,83	0,83	0,00
0,68	2,56	0,77	0,84	0,84	0,00
0,72	2,58	0,77	0,84	0,84	0,00
0,76	2,59	0,78	0,85	0,85	0,00
0,80	2,61	0,78	0,85	0,85	0,00
0,84	2,62	0,79	0,86	0,86	0,00
0,88	2,64	0,79	0,86	0,86	0,00
0,92	2,65	0,80	0,87	0,87	0,00
0,96	2,67	0,80	0,87	0,87	0,00
1,00	2,68	0,81	0,88	0,88	0,00
1,04	2,70	0,81	0,88	0,88	0,00
1,08	2,71	0,81	0,89	0,89	0,00
1,12	2,73	0,82	0,89	0,89	0,00
1,16	2,74	0,82	0,90	0,90	0,00
1,20	2,76	0,83	0,90	0,90	0,00
1,24	2,78	0,83	0,91	0,91	0,00
1,28	2,79	0,84	0,91	0,91	0,00
1,32	2,81	0,84	0,92	0,92	0,00
1,36	2,82	0,85	0,92	0,92	0,00
1,40	2,84	0,85	0,93	0,93	0,00
1,44	2,97	0,86	0,93	0,93	0,00
1,48	3,16	0,86	0,94	0,94	0,00
1,52	3,36	0,86	0,94	0,94	0,00

1,56	3,57	0,87	0,95	0,95	0,00
1,60	3,78	0,87	0,95	0,95	0,00
1,64	4,00	0,88	0,96	0,96	0,00
1,68	4,23	0,88	0,96	0,96	0,00
1,72	4,46	0,89	0,97	0,97	0,00
1,76	4,71	0,89	0,97	0,97	0,00
1,80	4,96	0,90	0,99	0,98	0,00
1,84	5,21	0,90	1,04	0,98	0,00
1,88	5,48	0,91	1,10	0,99	0,00
1,92	5,75	0,91	1,15	0,99	0,00
1,96	6,03	0,92	1,21	1,00	0,00
2,00	6,31	0,92	1,26	1,00	0,00

Teniendo en cuenta las cuantías de armado obtenidas, se propone la siguiente disposición del armado, para la que se necesita 15.69 kg de acero y 0.35m² de hormigón por metro lineal de muro.

Tabla 32. Muro de dos metros y canto variable. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D U R A	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	V1	11	10	100	2000	0,616537558	2100	1,294728872	4
Vr1	11	12	120	520	0,887814084	640	0,568201014	3	1,704603041
V2	11	8	80	2000	0,394584037	2080	0,820734798	4	3,28293919
Vr2	0	16	160	0	1,578336149	160	0,252533784	0	0

H O R M I Z A D O N T R A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8		1000	0,394584037	1000	0,394584037	7
Hr1	0	20		0	2,466150233	0	0	0	0
H2	0	8		1000	0,394584037	1000	0,394584037	7	2,762088261
Hr1	0	20		0	2,466150233	0	0	0	0

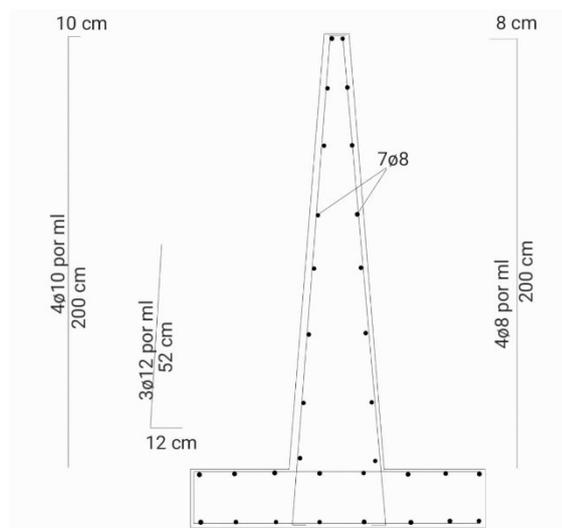


Figura 39. Disposición del armado para un muro de dos metros y canto variable (Fuente propia)

Para una altura de **tres metros**, la pendiente dispuesta es de 1.43 grados. Las características del muro son las siguientes:

Tabla 33. Datos geométricos, muro de tres metros y canto variable (Fuente propia)

H	3	m
Longitud punta (lp)	1,5	m
Longitud talón (lt)	1	m
Longitud de la zapata (B)	2,2	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	1,5	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	88,57	grados
Ángulo mínimo en intradós	88,57	grados
d'	0,05	m

La armadura necesaria es la siguiente:

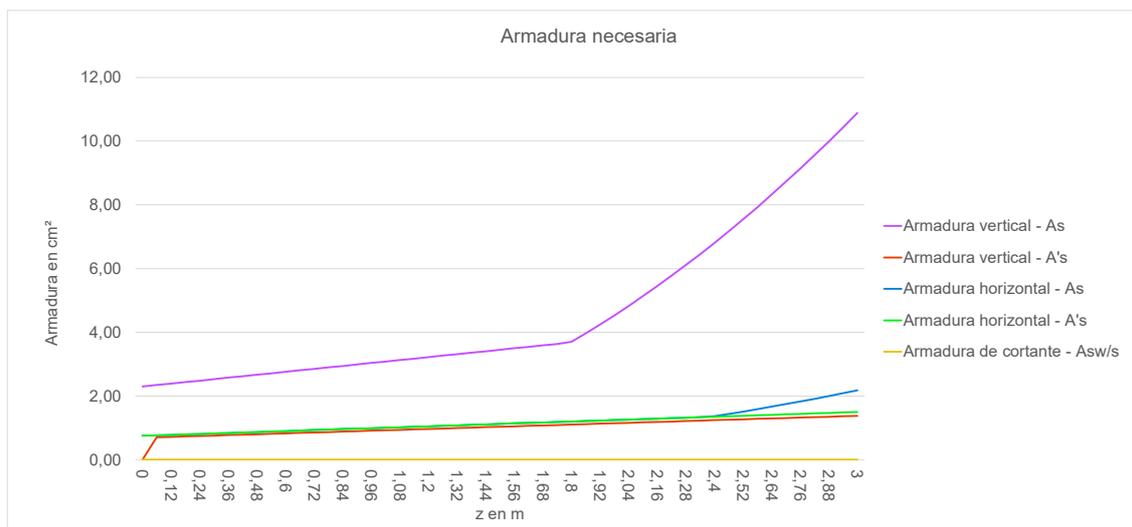


Figura 40. Cuantía de armado necesaria para un muro de tres metros y canto variable. (Fuente propia)

Tabla 34. Cuantía de armado necesaria para un muro de tres metros y canto variable. (Fuente propia)

Z	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As	A's	As	A's	Asw/s
m	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²
0,00	2,30	0,00	0,75	0,75	0,00
0,06	2,35	0,70	0,77	0,77	0,00
0,12	2,39	0,72	0,78	0,78	0,00
0,18	2,44	0,73	0,79	0,79	0,00
0,24	2,48	0,75	0,81	0,81	0,00



0,30	2,53	0,76	0,82	0,82	0,00
0,36	2,58	0,77	0,84	0,84	0,00
0,42	2,62	0,79	0,85	0,85	0,00
0,48	2,67	0,80	0,87	0,87	0,00
0,54	2,71	0,81	0,88	0,88	0,00
0,60	2,76	0,83	0,90	0,90	0,00
0,66	2,81	0,84	0,91	0,91	0,00
0,72	2,85	0,86	0,93	0,93	0,00
0,78	2,90	0,87	0,94	0,94	0,00
0,84	2,94	0,88	0,96	0,96	0,00
0,90	2,99	0,90	0,97	0,97	0,00
0,96	3,04	0,91	0,99	0,99	0,00
1,02	3,08	0,92	1,01	1,01	0,00
1,08	3,13	0,94	1,02	1,02	0,00
1,14	3,17	0,95	1,04	1,04	0,00
1,20	3,22	0,97	1,05	1,05	0,00
1,26	3,27	0,98	1,07	1,07	0,00
1,32	3,31	0,99	1,08	1,08	0,00
1,38	3,36	1,01	1,10	1,10	0,00
1,44	3,40	1,02	1,11	1,11	0,00
1,50	3,45	1,04	1,13	1,13	0,00
1,56	3,50	1,05	1,14	1,14	0,00
1,62	3,54	1,06	1,16	1,16	0,00
1,68	3,59	1,08	1,17	1,17	0,00
1,74	3,63	1,09	1,18	1,18	0,00
1,80	3,70	1,10	1,20	1,20	0,00
1,86	3,97	1,12	1,21	1,21	0,00
1,92	4,24	1,13	1,23	1,23	0,00
1,98	4,53	1,15	1,24	1,24	0,00
2,04	4,82	1,16	1,26	1,26	0,00
2,10	5,13	1,17	1,27	1,27	0,00
2,16	5,44	1,19	1,29	1,29	0,00
2,22	5,77	1,20	1,30	1,30	0,00
2,28	6,10	1,21	1,32	1,32	0,00
2,34	6,45	1,23	1,33	1,33	0,00
2,40	6,80	1,24	1,36	1,35	0,00
2,46	7,17	1,26	1,43	1,36	0,00
2,52	7,54	1,27	1,51	1,38	0,00
2,58	7,92	1,28	1,58	1,39	0,00
2,64	8,32	1,30	1,66	1,41	0,00
2,70	8,72	1,31	1,74	1,42	0,00
2,76	9,13	1,32	1,83	1,44	0,00
2,82	9,55	1,34	1,91	1,45	0,00
2,88	9,99	1,35	2,00	1,47	0,00
2,94	10,43	1,37	2,09	1,48	0,00
3,00	10,88	1,38	2,18	1,50	0,00

Teniendo en cuenta las cuantías de armado obtenidas, se propone la siguiente disposición del armado, para la que se necesita 34.87 kg de acero y 0.67m² de hormigón por metro lineal de muro.

Tabla 35. Muro de tres metros y canto variable. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D U R A	V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)	
		V1	11	16	160	3000	1,578336149	3160	4,987542231	4	19,95016893
		Vr1	11	12	120	660	0,887814084	780	0,692494985	2	1,384989971
		V2	11	8	80	3000	0,394584037	3080	1,215318835	4	4,861275339
		Vr2	0	16	160	0	1,578336149	160	0,252533784	0	0

H O R R I Z O N T A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	11	4,34042441
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0
	H2	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	11	4,34042441
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0

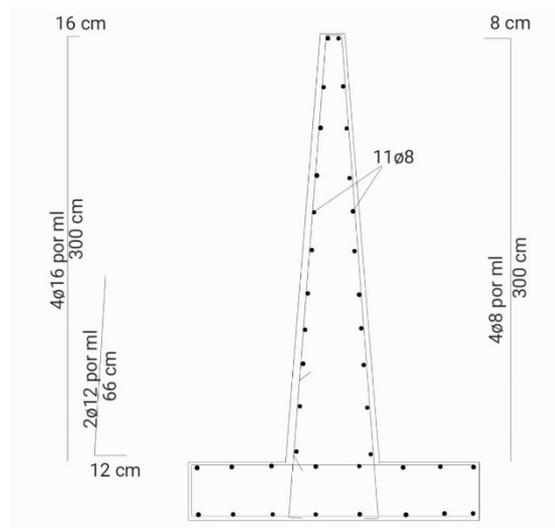


Figura 41. Disposición del armado para un muro de tres metros y canto variable (Fuente propia)

Para una altura de **cuatro metros** y una pendiente de 1.79 grados tanto en trasdós como en intradós, las características del muro son las siguientes:

Tabla 36. Datos geométricos, muro de cuatro metros y canto variable (Fuente propia)

H	4	m
Longitud punta (lp)	1,5	m
Longitud talón (lt)	1,5	m
Longitud de la zapata (B)	2,2	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	2	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	88,21	grados
Ángulo mínimo en intradós	88,21	grados
d'	0,05	m

La distribución de armado necesaria es la siguiente:

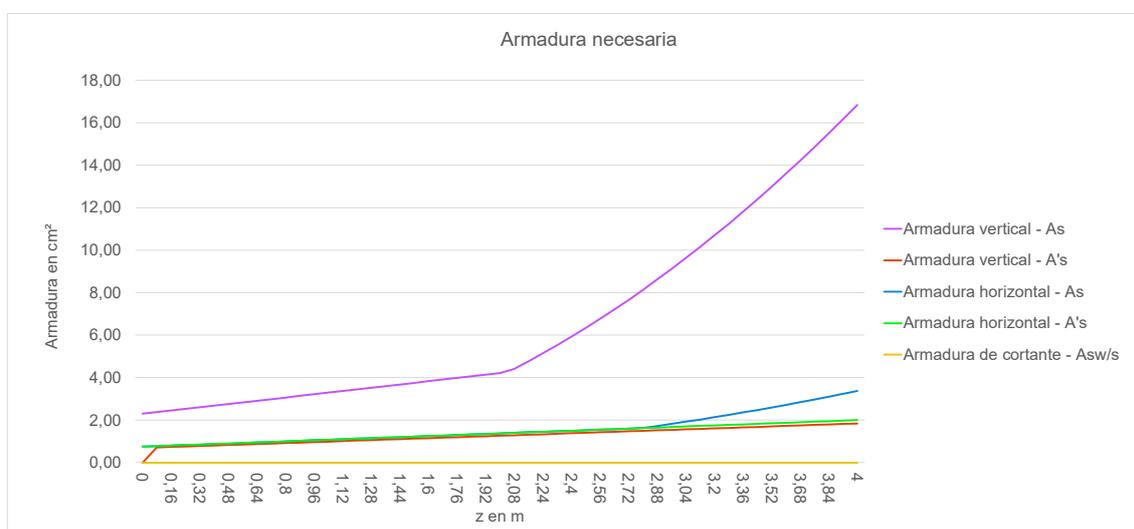


Figura 42. Cuantía de armado necesaria para un muro de cuatro metros y canto variable. (Fuente propia)

Tabla 37. Cuantía de armado necesaria para un muro de cuatro metros y canto variable. (Fuente propia)

Z	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As	A's	As	A's	
m	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²
0,00	2,30	0,00	0,75	0,75	0,00
0,08	2,38	0,71	0,78	0,78	0,00
0,16	2,45	0,74	0,80	0,80	0,00
0,24	2,53	0,76	0,83	0,83	0,00
0,32	2,61	0,78	0,85	0,85	0,00
0,40	2,68	0,80	0,87	0,87	0,00
0,48	2,76	0,83	0,90	0,90	0,00
0,56	2,84	0,85	0,92	0,92	0,00



0,64	2,91	0,87	0,95	0,95	0,00
0,72	2,99	0,90	0,97	0,97	0,00
0,80	3,07	0,92	1,00	1,00	0,00
0,88	3,14	0,94	1,03	1,03	0,00
0,96	3,22	0,97	1,05	1,05	0,00
1,04	3,30	0,99	1,08	1,08	0,00
1,12	3,37	1,01	1,10	1,10	0,00
1,20	3,45	1,04	1,13	1,13	0,00
1,28	3,53	1,06	1,15	1,15	0,00
1,36	3,60	1,08	1,18	1,18	0,00
1,44	3,68	1,10	1,20	1,20	0,00
1,52	3,76	1,13	1,23	1,23	0,00
1,60	3,83	1,15	1,25	1,25	0,00
1,68	3,91	1,17	1,28	1,28	0,00
1,76	3,99	1,20	1,30	1,30	0,00
1,84	4,06	1,22	1,33	1,33	0,00
1,92	4,14	1,24	1,35	1,35	0,00
2,00	4,22	1,27	1,38	1,38	0,00
2,08	4,41	1,29	1,40	1,40	0,00
2,16	4,77	1,31	1,43	1,43	0,00
2,24	5,14	1,33	1,45	1,45	0,00
2,32	5,53	1,36	1,48	1,48	0,00
2,40	5,93	1,38	1,50	1,50	0,00
2,48	6,34	1,40	1,53	1,53	0,00
2,56	6,77	1,43	1,55	1,55	0,00
2,64	7,21	1,45	1,58	1,58	0,00
2,72	7,66	1,47	1,60	1,60	0,00
2,80	8,13	1,50	1,63	1,63	0,00
2,88	8,61	1,52	1,72	1,65	0,00
2,96	9,11	1,54	1,82	1,68	0,00
3,04	9,62	1,56	1,92	1,70	0,00
3,12	10,14	1,59	2,03	1,73	0,00
3,20	10,68	1,61	2,14	1,75	0,00
3,28	11,24	1,63	2,25	1,78	0,00
3,36	11,80	1,66	2,36	1,80	0,00
3,44	12,38	1,68	2,48	1,83	0,00
3,52	12,98	1,70	2,60	1,85	0,00
3,60	13,59	1,73	2,72	1,88	0,00
3,68	14,21	1,75	2,84	1,90	0,00
3,76	14,85	1,77	2,97	1,92	0,00
3,84	15,50	1,79	3,10	1,95	0,00
3,92	16,16	1,82	3,23	1,97	0,00
4,00	16,84	1,84	3,37	2,00	0,00

Teniendo en cuenta las cuantías de armado calculadas, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesitan 52.33 kg de acero y 1.10 m³ de hormigón por metro lineal.

Tabla 38. Muro de cuatro metros y canto variable. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D U R A	V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
		V1	11	16	160	4000	1,578336149	4160	6,565878381	4
Vr1	11	16	160	1200	1,578336149	1360	2,146537163	4	8,586148651	
V2	11	8	80	4000	0,394584037	4080	1,609902872	4	6,439611489	
Vr2	0	16	160	0	1,578336149	160	0,252533784	0	0	

H O R R I Z O N T A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	14	5,524176522
Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0	
H2	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	14	5,524176522	
Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0	

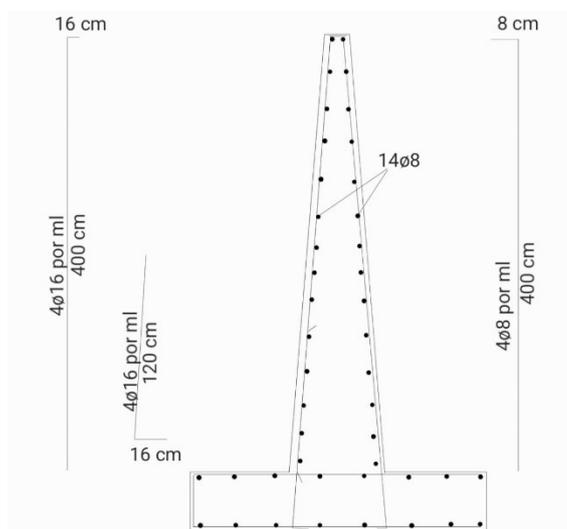


Figura 43. Disposición del armado para un muro de cuatro metros y canto variable (Fuente propia)

Para una altura de **cinco metros** y una pendiente de dos grados tanto en trasdós como en intradós, las características del muro son las siguientes:

Tabla 39. Datos geométricos, muro de cinco metros y canto variable (Fuente propia)

H	5	m
Longitud punta (lp)	2	m
Longitud talón (lt)	1,5	m
Longitud de la zapata (B)	2,2	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	2,5	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	88	grados
Ángulo mínimo en intradós	88	grados
d'	0,05	m

El armado necesario es el siguiente:

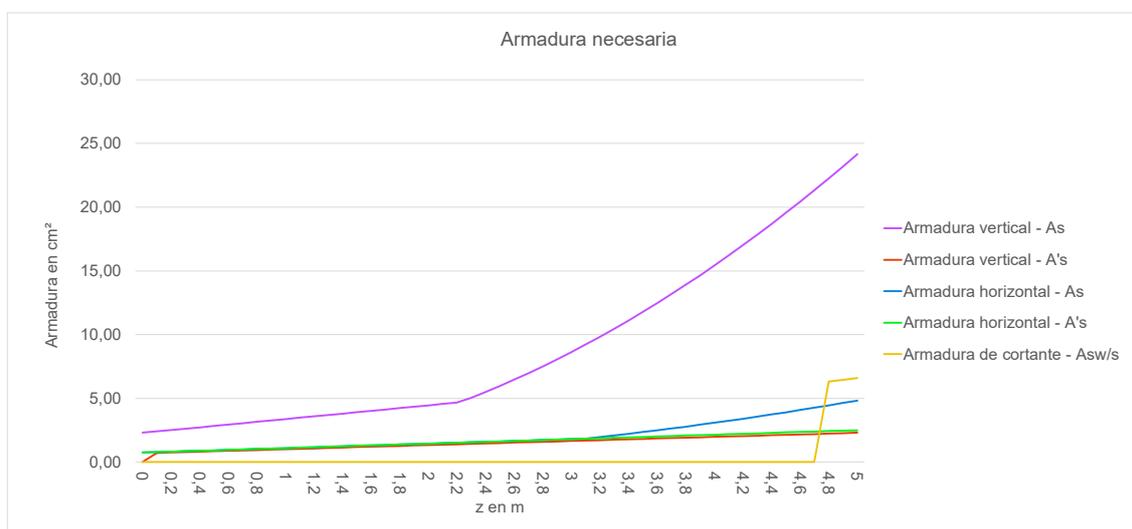


Figura 44. Cuantía de armado necesaria para un muro de cinco metros y canto variable. (Fuente propia)

Tabla 40. Cuantía de armado necesaria para un muro de cinco metros y canto variable. (Fuente propia)

Z	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As	A's	As	A's	Asw/s
m	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²
0,00	2,30	0,00	0,75	0,75	0,00
0,10	2,41	0,72	0,79	0,79	0,00
0,20	2,51	0,75	0,82	0,82	0,00
0,30	2,62	0,79	0,86	0,86	0,00
0,40	2,73	0,82	0,89	0,89	0,00
0,50	2,84	0,85	0,92	0,92	0,00
0,60	2,94	0,88	0,96	0,96	0,00



0,70	3,05	0,92	0,99	0,99	0,00
0,80	3,16	0,95	1,03	1,03	0,00
0,90	3,27	0,98	1,07	1,07	0,00
1,00	3,37	1,01	1,10	1,10	0,00
1,10	3,48	1,04	1,14	1,14	0,00
1,20	3,59	1,08	1,17	1,17	0,00
1,30	3,70	1,11	1,21	1,21	0,00
1,40	3,80	1,14	1,24	1,24	0,00
1,50	3,91	1,17	1,28	1,28	0,00
1,60	4,02	1,21	1,31	1,31	0,00
1,70	4,12	1,24	1,35	1,35	0,00
1,80	4,23	1,27	1,38	1,38	0,00
1,90	4,34	1,30	1,42	1,42	0,00
2,00	4,45	1,33	1,45	1,45	0,00
2,10	4,55	1,37	1,49	1,49	0,00
2,20	4,66	1,40	1,52	1,52	0,00
2,30	5,04	1,43	1,56	1,56	0,00
2,40	5,49	1,46	1,59	1,59	0,00
2,50	5,97	1,50	1,63	1,63	0,00
2,60	6,46	1,53	1,66	1,66	0,00
2,70	6,98	1,56	1,70	1,70	0,00
2,80	7,51	1,59	1,73	1,73	0,00
2,90	8,06	1,62	1,77	1,77	0,00
3,00	8,63	1,66	1,80	1,80	0,00
3,10	9,22	1,69	1,84	1,84	0,00
3,20	9,83	1,72	1,97	1,87	0,00
3,30	10,46	1,75	2,09	1,91	0,00
3,40	11,11	1,78	2,22	1,94	0,00
3,50	11,78	1,82	2,36	1,98	0,00
3,60	12,47	1,85	2,49	2,01	0,00
3,70	13,18	1,88	2,64	2,05	0,00
3,80	13,90	1,91	2,78	2,08	0,00
3,90	14,65	1,95	2,93	2,12	0,00
4,00	15,42	1,98	3,08	2,15	0,00
4,10	16,20	2,01	3,24	2,19	0,00
4,20	17,01	2,04	3,40	2,22	0,00
4,30	17,83	2,07	3,57	2,26	0,00
4,40	18,68	2,11	3,74	2,29	0,00
4,50	19,54	2,14	3,91	2,32	0,00
4,60	20,42	2,17	4,08	2,36	0,00
4,70	21,33	2,20	4,27	2,40	0,00
4,80	22,25	2,24	4,45	2,43	6,32
4,90	23,19	2,27	4,64	2,46	6,46
5,00	24,15	2,30	4,83	2,50	6,60

Tal y como se puede ver en la tabla anterior, a diferencia de los muros estudiados hasta ahora de canto variable, este sí que necesita armadura de cortante. Atendiendo a la necesidad de armado, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesita un total de 89.40 kg de acero y 1.63 m³ de hormigón por metro lineal de muro.

Tabla 41. Muro de cinco metros y canto variable. Despiece de armado. (Fuente propia)

A R M A D U R A V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	V1	11	20	200 5000	2,466150233	5200	12,82398121	4	51,29592485
	Vr1	11	20	200 1300	2,466150233	1500	3,69922535	4	14,7969014
	V2	11	8	80 5000	0,394584037	5080	2,004486909	4	8,017947638
	Vr2	0	8	80 800	0,394584037	880	0,347233953	4	1,388935811

H O R R I Z O N T A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	17	6,707928634
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0
	H2	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	17	6,707928634
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0

Tabla 42. Muro de cinco metros y canto variable. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia)

z (m)	Asw/s Requerida (cm ² /m)	Separación de estribos (mm)	Número de estribos en tramo	Asw/s Dispuesta (cm ² /m)	Peso total de estribos (kg)
4.80	6.32	120	2	6.54	0.49
4.90	6.46	120	2	6.54	0.49
5.00	6.60	120	2	6.54	0.49

Longitud total del tramo: 0.20 m	Diámetro de estribo: 10 mm
Número total de estribos: 2 estribos	Área de estribo (A): 78.54 mm ²
Peso total del acero: 0.49 kg	Separación de estribos (s): 120 mm (ajustado para simplificar)

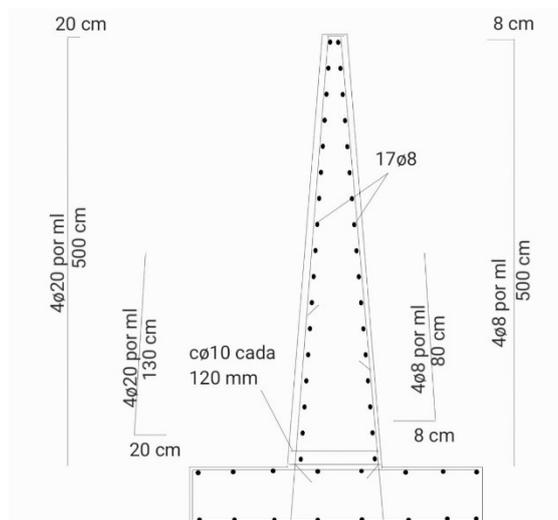


Figura 45. Disposición del armado para un muro de cinco metros y canto variable (Fuente propia)

Para una altura de **seis metros** y una pendiente de 87.85 grados tanto en trasdós como en intradós, las características del muro son las siguientes:

Tabla 43. Datos geométricos, muro de seis metros y canto variable (Fuente propia)

H	6	m
Longitud punta (lp)	2	m
Longitud talón (lt)	2	m
Longitud de la zapata (B)	2,2	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	3	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	87,85	grados
Ángulo mínimo en intradós	87,85	grados
d'	0,05	m

La distribución de armado necesaria es la siguiente:

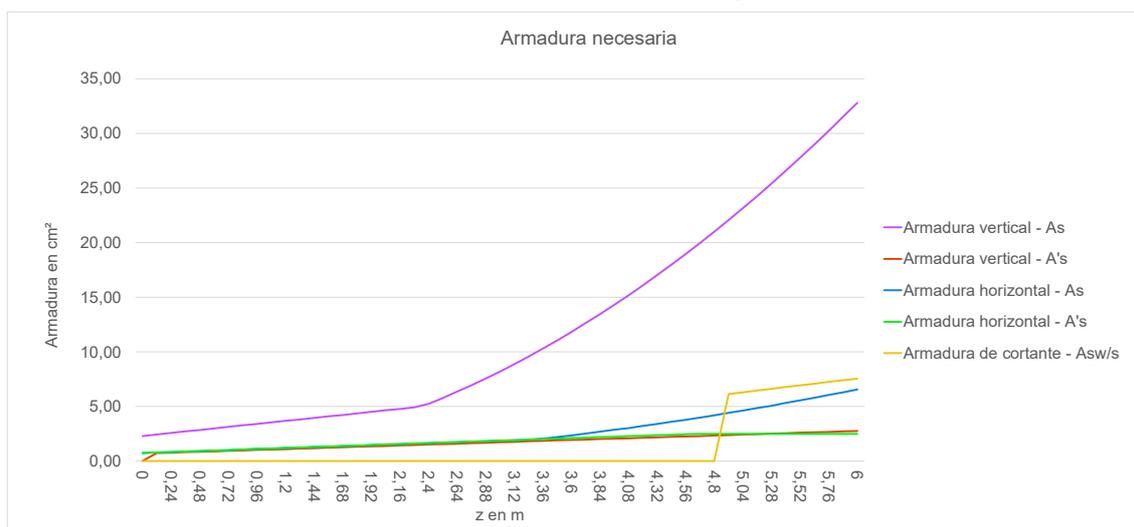


Figura 46. Cuantía de armado necesaria para un muro de seis metros y canto variable. (Fuente propia)

Tabla 44. Cuantía de armado necesaria para un muro de seis metros y canto variable (Fuente propia)

Z m	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As cm ²	A's cm ²	As cm ²	A's cm ²	Asw/s cm ²
0,00	2,30	0,00	0,75	0,75	0,00
0,12	2,44	0,73	0,80	0,80	0,00
0,24	2,58	0,77	0,84	0,84	0,00
0,36	2,71	0,81	0,89	0,89	0,00
0,48	2,85	0,86	0,93	0,93	0,00
0,60	2,99	0,90	0,98	0,98	0,00



0,72	3,13	0,94	1,02	1,02	0,00
0,84	3,27	0,98	1,07	1,07	0,00
0,96	3,40	1,02	1,11	1,11	0,00
1,08	3,54	1,06	1,16	1,16	0,00
1,20	3,68	1,10	1,20	1,20	0,00
1,32	3,82	1,15	1,25	1,25	0,00
1,44	3,96	1,19	1,29	1,29	0,00
1,56	4,09	1,23	1,34	1,34	0,00
1,68	4,23	1,27	1,38	1,38	0,00
1,80	4,37	1,31	1,43	1,43	0,00
1,92	4,51	1,35	1,47	1,47	0,00
2,04	4,65	1,39	1,52	1,52	0,00
2,16	4,78	1,44	1,56	1,56	0,00
2,28	4,92	1,48	1,61	1,61	0,00
2,40	5,24	1,52	1,65	1,65	0,00
2,52	5,78	1,56	1,70	1,70	0,00
2,64	6,34	1,60	1,74	1,74	0,00
2,76	6,94	1,64	1,79	1,79	0,00
2,88	7,56	1,68	1,83	1,83	0,00
3,00	8,20	1,73	1,88	1,88	0,00
3,12	8,87	1,77	1,92	1,92	0,00
3,24	9,57	1,81	1,97	1,97	0,00
3,36	10,29	1,85	2,06	2,01	0,00
3,48	11,04	1,89	2,21	2,06	0,00
3,60	11,82	1,93	2,36	2,10	0,00
3,72	12,62	1,97	2,52	2,15	0,00
3,84	13,44	2,01	2,69	2,19	0,00
3,96	14,30	2,06	2,86	2,24	0,00
4,08	15,18	2,10	3,04	2,28	0,00
4,20	16,08	2,14	3,22	2,33	0,00
4,32	17,02	2,18	3,40	2,37	0,00
4,44	17,97	2,22	3,59	2,42	0,00
4,56	18,96	2,26	3,79	2,46	0,00
4,68	19,97	2,30	3,99	2,50	0,00
4,80	21,00	2,35	4,20	2,50	0,00
4,92	22,07	2,39	4,41	2,50	6,15
5,04	23,15	2,43	4,63	2,50	6,31
5,16	24,27	2,47	4,85	2,50	6,47
5,28	25,41	2,51	5,08	2,50	6,62
5,40	26,57	2,55	5,31	2,50	6,78
5,52	27,77	2,59	5,55	2,50	6,93
5,64	28,99	2,64	5,80	2,50	7,09
5,76	30,23	2,68	6,05	2,50	7,25
5,88	31,50	2,72	6,30	2,50	7,41
6,00	32,80	2,76	6,56	2,50	7,56

Atendiendo a los resultados anteriores, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesitan 129.83 kg de acero y 2.25 m³ de hormigón por metro lineal de muro.

Tabla 45. Muro de seis metros y canto variable. Despiece de armado. (Fuente propia)

A R M A D U R A V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	V1	11	20	200	6000	2,466150233	6200	15,29013145	4
Vr1	11	20	200	2280	2,466150233	2480	6,116052578	6	36,69631547
V2	11	8	80	6000	0,394584037	6080	2,399070947	4	9,596283787
Vr2	0	8	80	2160	0,394584037	2240	0,883868244	4	3,535472974

H O R R I Z O N A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8		1000	0,394584037	1000	0,394584037	21
Hr1	0	20		0	2,466150233	0	0	0	0
H2	0	8		1000	0,394584037	1000	0,394584037	21	8,286264783
Hr1	0	20		0	2,466150233	0	0	0	0

Tabla 46. Muro de seis metros y canto variable. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia)

z (m)	Asw/s Requerida (cm ² /m)	Separación de estribos (mm)	Número de estribos en tramo	Asw/s Dispuesta (cm ² /m)	Peso total de estribos (kg)
4.92	6.15	150	8	7.54	2.27
5.04	6.31	150	8	7.54	2.27
5.16	6.47	150	8	7.54	2.27
5.28	6.62	150	8	7.54	2.27
5.40	6.78	150	8	7.54	2.27
5.52	6.93	150	8	7.54	2.27
5.64	7.09	150	8	7.54	2.27
5.76	7.25	150	8	7.54	2.27
5.88	7.41	150	8	7.54	2.27
6.00	7.56	150	8	7.54	2.27

Longitud total del tramo: 1.08 m Número total de estribos: 8 estribos Peso total del acero: 2.27 kg	Diámetro de estribo: 12 mm Área de estribo (A): 113.10 mm ² Separación de estribos (s): 150 mm
---	---

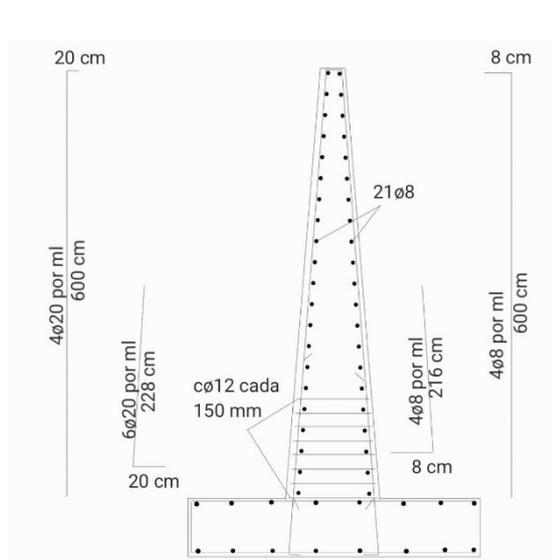


Figura 47. Disposición del armado para un muro de seis metros y canto variable (Fuente propia)

Para una altura de **siete metros** y una pendiente de 2.25 grados tanto en trasdós como en intradós, las características del muro son las siguientes:

Tabla 47. Datos geométricos, muro de siete metros y canto variable (Fuente propia)

H	7	m
Longitud punta (lp)	2,5	m
Longitud talón (lt)	2,5	m
Longitud de la zapata (B)	2,2	m
Altura cimentación (c)	0,4	m
Terreno por encima de la puntera	3,5	m
Espesor mínimo en coronación (ec)	0,15	m
Ángulo mínimo en trasdós	87,75	grados
Ángulo mínimo en intradós	87,75	grados
d'	0,05	m

La armadura necesaria es la siguiente:

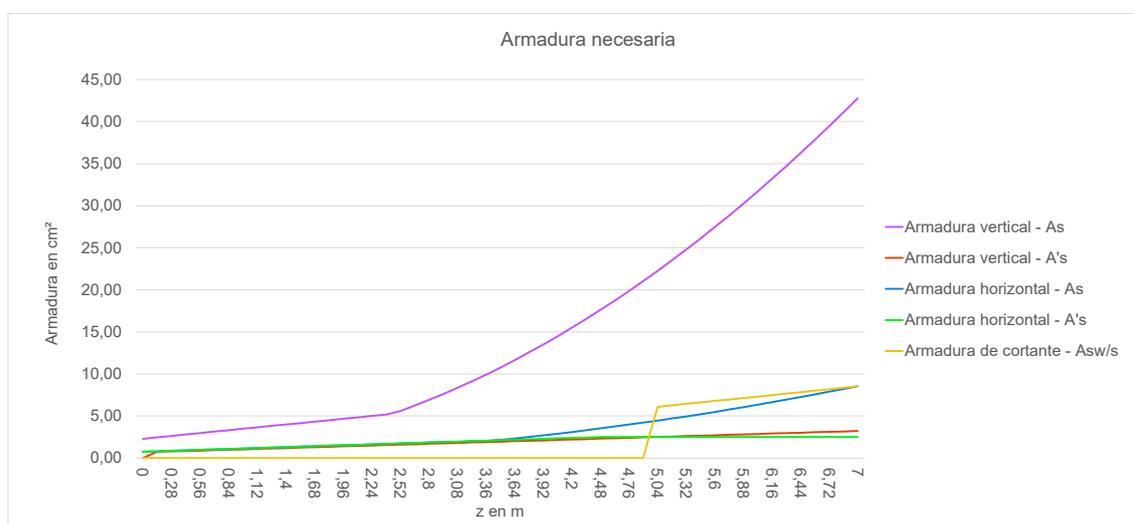


Figura 48. Cuantía de armado necesaria para un muro de siete metros y canto variable. (Fuente propia)

Tabla 48. Cuantía de armado necesaria para un muro de siete metros y canto variable (Fuente propia)

Z	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As	A's	As	A's	Asw/s
m	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²
0,00	2,30	0,00	0,75	0,75	0,00
0,14	2,47	0,74	0,81	0,81	0,00
0,28	2,64	0,79	0,86	0,86	0,00
0,42	2,81	0,84	0,92	0,92	0,00
0,56	2,97	0,89	0,97	0,97	0,00
0,70	3,14	0,94	1,03	1,03	0,00
0,84	3,31	0,99	1,08	1,08	0,00
0,98	3,48	1,04	1,14	1,14	0,00



1,12	3,65	1,09	1,19	1,19	0,00
1,26	3,82	1,15	1,25	1,25	0,00
1,40	3,99	1,20	1,30	1,30	0,00
1,54	4,16	1,25	1,36	1,36	0,00
1,68	4,32	1,30	1,41	1,41	0,00
1,82	4,49	1,35	1,47	1,47	0,00
1,96	4,66	1,40	1,52	1,52	0,00
2,10	4,83	1,45	1,58	1,58	0,00
2,24	5,00	1,50	1,63	1,63	0,00
2,38	5,17	1,55	1,69	1,69	0,00
2,52	5,59	1,60	1,74	1,74	0,00
2,66	6,23	1,65	1,80	1,80	0,00
2,80	6,90	1,70	1,85	1,85	0,00
2,94	7,60	1,75	1,91	1,91	0,00
3,08	8,34	1,80	1,96	1,96	0,00
3,22	9,12	1,85	2,02	2,02	0,00
3,36	9,92	1,90	2,07	2,07	0,00
3,50	10,77	1,96	2,15	2,13	0,00
3,64	11,64	2,01	2,33	2,18	0,00
3,78	12,55	2,06	2,51	2,24	0,00
3,92	13,49	2,11	2,70	2,29	0,00
4,06	14,47	2,16	2,89	2,35	0,00
4,20	15,48	2,21	3,10	2,40	0,00
4,34	16,52	2,26	3,30	2,46	0,00
4,48	17,60	2,31	3,52	2,50	0,00
4,62	18,71	2,36	3,74	2,50	0,00
4,76	19,86	2,41	3,97	2,50	0,00
4,90	21,04	2,46	4,21	2,50	0,00
5,04	22,25	2,51	4,45	2,50	6,09
5,18	23,50	2,56	4,70	2,50	6,26
5,32	24,78	2,61	4,96	2,50	6,43
5,46	26,09	2,66	5,22	2,50	6,61
5,60	27,44	2,71	5,49	2,50	6,78
5,74	28,82	2,76	5,76	2,50	6,96
5,88	30,24	2,82	6,05	2,50	7,13
6,02	31,69	2,87	6,34	2,50	7,31
6,16	33,17	2,92	6,63	2,50	7,49
6,30	34,69	2,97	6,94	2,50	7,66
6,44	36,24	3,02	7,25	2,50	7,84
6,58	37,82	3,07	7,56	2,50	8,01
6,72	39,44	3,12	7,89	2,50	8,19
6,86	41,09	3,17	8,22	2,50	8,36
7,00	42,78	3,22	8,56	2,50	8,54

Atendiendo a los resultados anteriores, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesitan 198.86 kg de acero y 2.98 m³ de hormigón por metro lineal de muro.

Tabla 49. Muro de siete metros y canto variable. Despiece de armado. (Fuente propia)

ARMADURA	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	VERTICAL	V1	11	20	200 7000	2,466150233	7200	17,75628168	6
Vr1		11	32	320 2240	6,313344597	2560	16,16216217	3	48,4864865
V2		11	8	80 7000	0,394584037	7080	2,793654984	4	11,17461994
Vr2		0	8	80 3220	0,394584037	3300	1,302127323	4	5,208509292
HORRIZADUNTAL	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	24	9,470016895
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0
	H2	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	24	9,470016895
Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0	0	

Tabla 50. Muro de siete metros y canto variable. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia)

z (m)	Asw/s Requerida (cm ² /m)	Separación de estribos (mm)	Número de estribos en tramo	Asw/s Dispuesta (cm ² /m)	Peso total de estribos (kg)
5.04	6.09	130	8	8.70	1.81
5.18	6.26	130	8	8.70	1.81
5.32	6.43	130	8	8.70	1.81
5.46	6.61	130	8	8.70	1.81
5.60	6.78	130	8	8.70	1.81
5.74	6.96	130	8	8.70	1.81
5.88	7.13	130	8	8.70	1.81
6.02	7.31	130	8	8.70	1.81
6.16	7.49	130	8	8.70	1.81
6.30	7.66	130	8	8.70	1.81
6.44	7.84	130	8	8.70	1.81
6.58	8.01	130	8	8.70	1.81
6.72	8.19	130	8	8.70	1.81
6.86	8.36	130	8	8.70	1.81
7.00	8.54	130	8	8.70	1.81

Longitud total del tramo: 1.96 m	Diámetro de estribo: 12 mm
Número total de estribos: 16 estribos	Área de estribo (A): 113.10 mm ²
Peso total del acero: 8.512 kg	Separación de estribos (s): 130 mm (ajustado para simplificar)

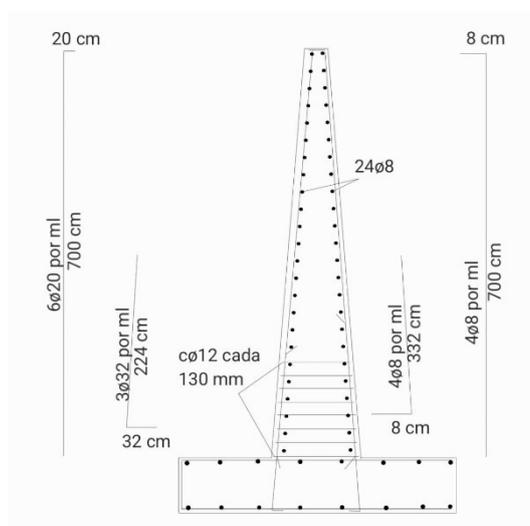


Figura 49. Disposición del armado para un muro de siete metros y canto variable (Fuente propia)

Recopilando y ordenando todos los datos obtenidos hasta ahora, tanto para canto constante como para canto variable, se confirma que todas las opciones analizadas cumplen con las restricciones de peso y dimensiones para el transporte, garantizando así la viabilidad del traslado de los elementos prefabricados.

Tabla 51. Resultados del estudio paramétrico (Fuente propia)

CANTO CONSTANTE			
altura	canto	m ³ hormigón / metro	kg acero / metro
2	0,2	0,4	15,31
3	0,3	0,9	32,07
4	0,4	1,6	47,01
5	0,5	2,5	89,1
6	0,6	3,6	120,08
7	0,7	4,9	181,95

CANTO VARIABLE					
altura	espesor en la unión	espesor en la cabeza	pendiente a ambos lados	m ³ hormigón / metro	kg acero / metro
2	0,2	0,15	0,72	0,35	15,69
3	0,3	0,15	1,43	0,67	34,87
4	0,4	0,15	1,79	1,1	52,33
5	0,5	0,15	2,00	1,63	89,4
6	0,6	0,15	2,15	2,25	129,83
7	0,7	0,15	2,25	2,98	198,86

Asumiendo que el precio del hormigón es de 130€/m³ y el del acero de 3.5€/kg, se obtienen los siguientes precios por metro lineal de muro:

Tabla 52. Resultados estudio paramétrico. Precio por metro lineal de muro (Fuente propia)

PRECIO POR METRO LINEAL DE MURO		
Altura	Canto contante	Canto variable
2	105,585 €	100,415 €
3	229,245 €	209,145 €
4	372,535 €	326,155 €
5	636,85 €	524,8 €
6	888,28 €	746,905 €
7	1273,825 €	1083,41 €

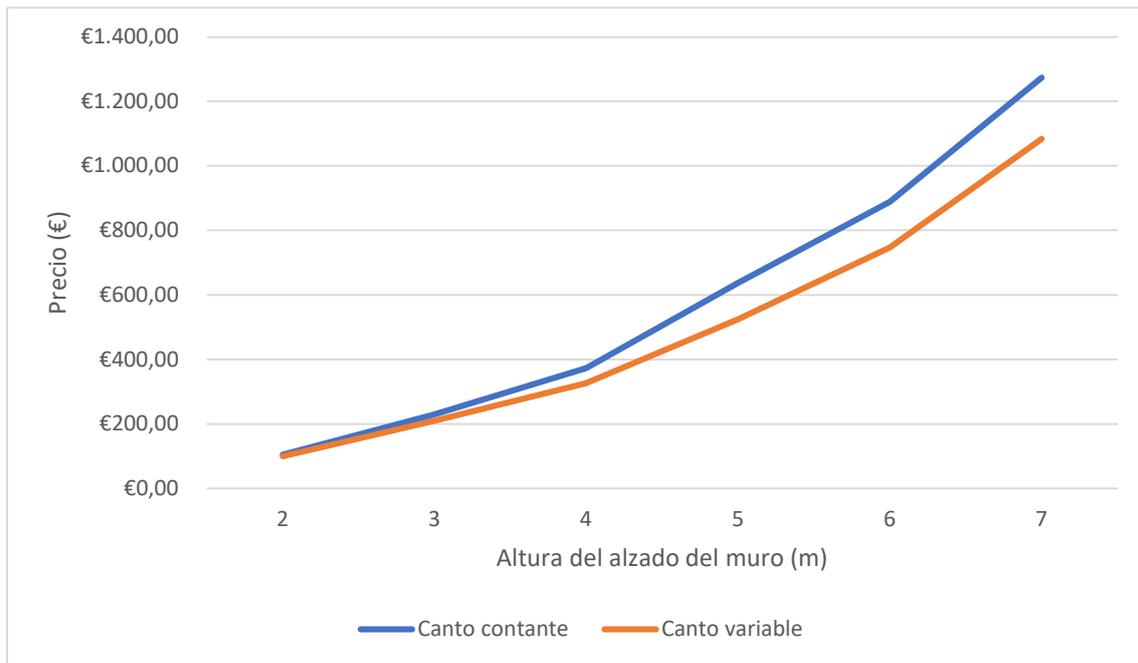


Figura 50. Gráfico, precio del muro en función del tipo de canto y la altura, resultados estudio paramétrico. (Fuente propia)



7.3 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Finalmente, si comparamos los resultados obtenidos con el canto constante y las diferentes pendientes, vemos como para cualquiera de las alturas estudiadas, lo óptimo es intentar diseñar un muro con canto variable.

Para muros de poca altura podemos ver que la diferencia entre diferentes diseños del alzado del muro no varía mucho, aunque conforme aumentamos la altura del muro, esta diferencia va aumentando, por lo que debe tenerse en consideración para conseguir un muro económicamente óptimo. Esto es debido a que los muros de canto variable permiten una mejor distribución tanto del hormigón como del acero, reduciendo así la necesidad de material necesario y, consecuentemente, el coste total.

Ambos tipos de muro cumplen con las normativas vigentes, asegurando la seguridad requerida. Sin embargo, los muros de canto variable ofrecen ventajas en términos de transporte debido a su menor peso total, facilitando su manejo y reduciendo los costes asociados a dicho transporte.



8) ESTUDIO DE CORTANTE

El presente estudio tiene como objetivo determinar la relación óptima entre la altura y el espesor en la base de los muros (H/x) que permita evitar el uso de armadura de cortante, un criterio comúnmente aplicado en el diseño de muros. En el contexto del diseño del alzado de muros ménsula, se evita la utilización de la armadura de cortante por su complejidad de implementación. Sin embargo, en el contexto de los muros prefabricados, mantener una relación H/x sin armadura de cortante puede resultar en elementos con secciones significativamente mayores y, por ende, más pesados.

El planteamiento se enfoca en analizar y ajustar la proporción en el espesor en la base del muro para identificar el valor máximo que permita prescindir de la armadura de cortante.

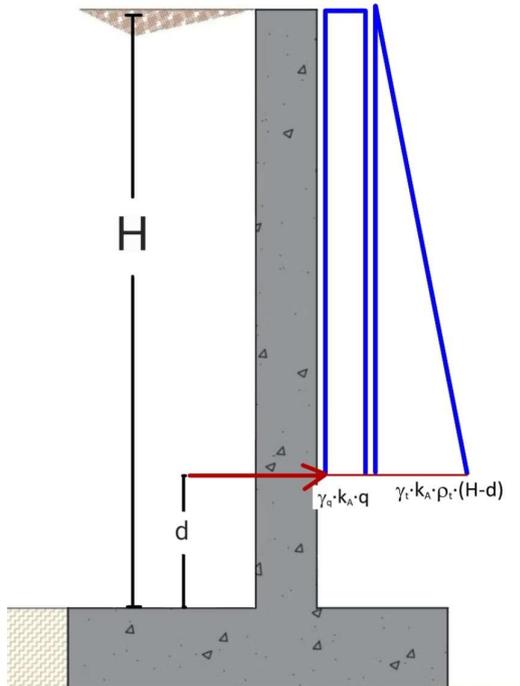
En el contexto actual, donde el precio del acero ha aumentado, es relevante encontrar el punto de equilibrio en el que se optimicen los espesores necesarios para evitar la armadura de cortante sin comprometer la viabilidad económica y estructural del muro. Además, es importante considerar que, desde un punto de vista de la prefabricación, mayores espesores y dimensiones pueden presentar desafíos en el transporte e instalación del muro.

Para evaluar la relación entre H/x y la necesidad de armadura se ha realizado el siguiente estudio:

8.1 CANTO CONSTANTE

Tal y como ya se ha explicado anteriormente, para verificar que la armadura de cortante no es necesaria debe cumplirse que $V_{Ed} \leq V_{Rd,c,min}$.

Teniendo en cuenta que para un muro de canto constante la formulación a utilizar para su cálculo es la siguiente:



$$V_{Ed} = \frac{1}{2} * \gamma_t * k_A * \rho_t * (H - d)^2 + \gamma_t * k_A * q * (H - d)$$

$$V_{Rd,c,min} = \frac{0.075}{\gamma_c} * k^2 * f_{ck}^{1/2}$$

$$d = \frac{H}{x} - \text{recubrimiento}$$

$$k = \text{mínimo} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}; 2 \right)$$

Figura 51. Acción del cortante en muros de canto constante (Fuente propia, basado en [13])

Donde d , la altura útil para el cálculo de los esfuerzos cortantes, es crucial en estos cálculos. Al definir el espesor de la base del muro como H/x , la proporción x afecta directamente a d .

Atendiendo a las fórmulas anteriores, tanto el valor de V_{Ed} como de $V_{Rd,c,min}$ están directamente relacionados con d .

Se realiza el cálculo para diferentes alturas (de $H=2$ a $H=10$) y diferentes valores para el cálculo del espesor en la cabeza del muro (x). Los valores obtenidos son los siguientes:



Tabla 53. Cálculo de V_{Ed} para diferentes alturas y diferentes relaciones H/x . Caso de canto constante (Fuente propia, basado en [13])

$V_{Ed} (z=h-d)$ kN/m							
<i>H</i>	H/8	H/10	H/12	H/14	H/16	H/18	H/20
2	43,2	45,2	46,6	47,6	48,3	48,9	49,4
3	84,7	88,9	91,7	93,8	95,4	96,6	97,6
4	139,6	146,7	151,5	155,1	157,7	159,8	161,5
5	207,8	218,6	226,0	231,3	235,4	238,6	241,1
6	289,4	304,7	315,1	322,7	328,4	332,9	336,5
7	384,3	404,9	418,9	429,0	436,7	442,8	447,6
8	492,5	519,2	537,3	550,4	560,4	568,2	574,5
9	614,2	647,6	670,4	686,9	699,4	709,2	717,1
10	749,1	790,1	818,1	838,3	853,7	865,7	875,4

Tabla 54. Cálculo de $V_{Rd,min}$ para diferentes alturas y diferentes relaciones H/x . Caso de canto constante (Fuente propia, basado en [13])

$V_{Rd,min} (z=h-d)$ kN/m							
<i>H</i>	H/8	H/10	H/12	H/14	H/16	H/18	H/20
2	152,3	123,7	100,2	83,3	70,7	60,9	53,0
3	203,6	173,4	152,3	133,8	114,9	100,2	88,4
4	251,4	213,4	187,0	167,5	152,3	139,5	123,7
5	297,2	251,4	219,8	196,5	178,5	164,1	152,3
6	341,4	288,1	251,4	224,4	203,6	187,0	173,4
7	384,6	323,9	282,1	251,4	227,8	209,0	193,7
8	426,9	358,8	312,0	277,8	251,4	230,5	213,4
9	468,5	393,1	341,4	303,6	274,5	251,4	232,6
10	509,5	426,9	370,3	328,9	297,2	272,0	251,4



Tabla 55. Relación V_{Ed}/V_{Rd} , min para diferentes alturas y diferentes relaciones H/x. Caso de canto constante (Fuente propia, basado en [13])

V_{Ed}/V_{Rd}							
H	8	10	12	14	16	18	20
2	0,28	0,37	0,47	0,57	0,68	0,80	0,93
3	0,42	0,51	0,60	0,70	0,83	0,96	1,10
4	0,56	0,69	0,81	0,93	1,04	1,15	1,30
5	0,70	0,87	1,03	1,18	1,32	1,45	1,58
6	0,85	1,06	1,25	1,44	1,61	1,78	1,94
7	1,00	1,25	1,48	1,71	1,92	2,12	2,31
8	1,15	1,45	1,72	1,98	2,23	2,47	2,69
9	1,31	1,65	1,96	2,26	2,55	2,82	3,08
10	1,47	1,85	2,21	2,55	2,87	3,18	3,48

Atendiendo a la tabla anterior, puede verse como, la proporción máxima que se puede aplicar para el cálculo del espesor en la cabeza del muro sin que sea necesaria la armadura de cortante ni comprometer la seguridad estructural aumenta conforme disminuye la altura del muro. Para encontrar valores más ajustados, se ha utilizado la función “*buscar objetivo*” buscando un valor próximo a 1 en la división de V_{Ed}/V_{Rd} , optimizando así la proporción estudiada. Los valores obtenidos son los siguientes:

Tabla 56. Reajuste de la proporción H/x para diferentes alturas prescindiendo de la armadura de cortante. Caso de canto constante (Fuente propia, basado en [13])

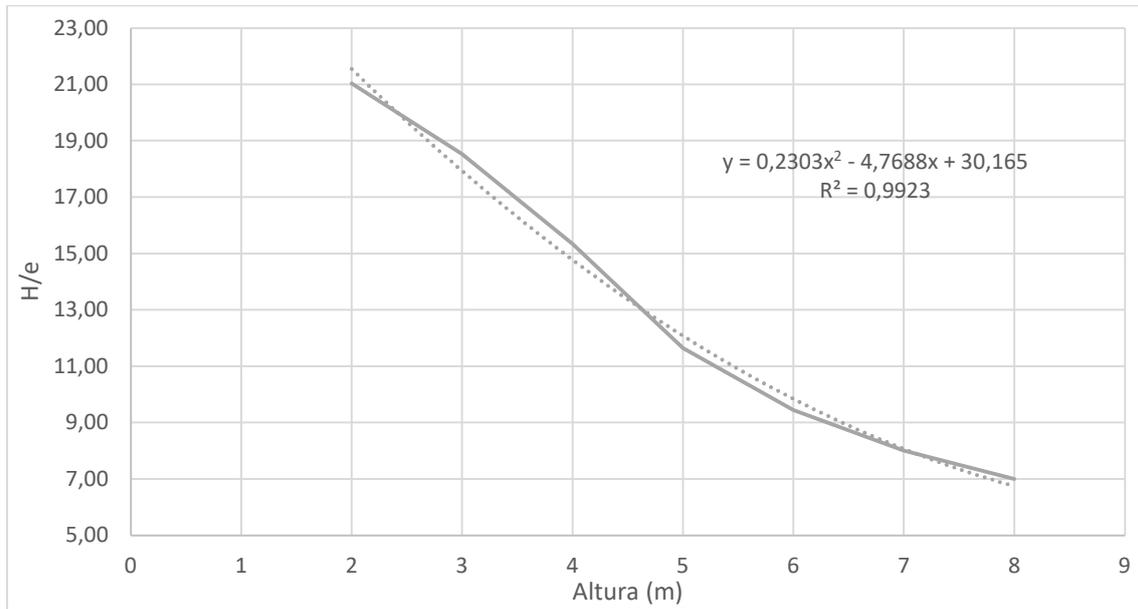
V_{Ed}/V_{Rd}							
H	7,00	8,01	9,44	11,64	15,34	18,52	21,04
2	0,25	0,28	0,34	0,45	0,65	0,84	1,00
3	0,36	0,42	0,49	0,59	0,79	1,00	1,18
4	0,48	0,56	0,65	0,79	1,00	1,19	1,39
5	0,61	0,70	0,82	1,00	1,27	1,49	1,65
6	0,74	0,85	1,00	1,22	1,56	1,82	2,02
7	0,87	1,00	1,18	1,44	1,85	2,17	2,41
8	1,00	1,15	1,37	1,67	2,15	2,53	2,81
9	1,13	1,31	1,56	1,91	2,46	2,89	3,22
10	1,27	1,47	1,75	2,15	2,77	3,26	3,63

Finalmente, se ha hecho un ajuste polinómico para obtener una ecuación que permita calcular la proporción máxima en función de la altura del muro, facilitando así el uso para futuros diseños:

$$y = 0,2303x^2 - 4,7688x + 30,165$$

Siendo ‘x’ el valor de la proporción máxima para que el muro no necesite armado dependiendo de la altura, H.

Tabla 57. Resultados del estudio. Caso de canto constante (Fuente propia)



9) APLICACIÓN A UN CASO REAL

A continuación, se procede a realizar un estudio de un caso real aplicando todo lo estudiado anteriormente.

El estudio geotécnico para la construcción del muro se realizará en el municipio de la Poble Tornesa, situado en la Plana Alta, tal y como se puede ver en la siguiente imagen:

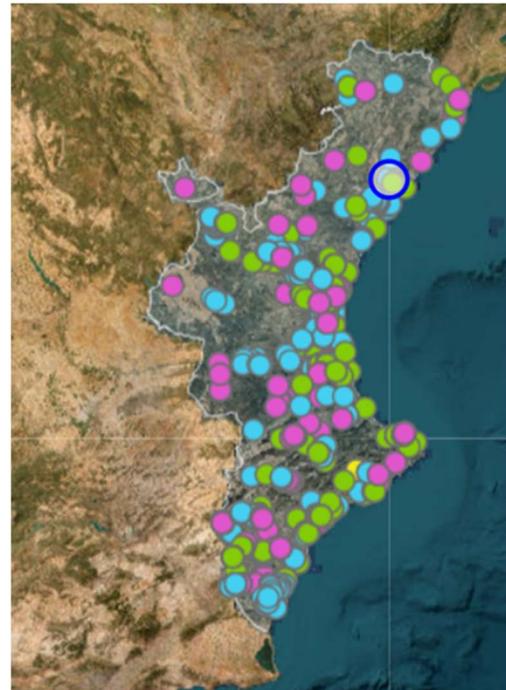
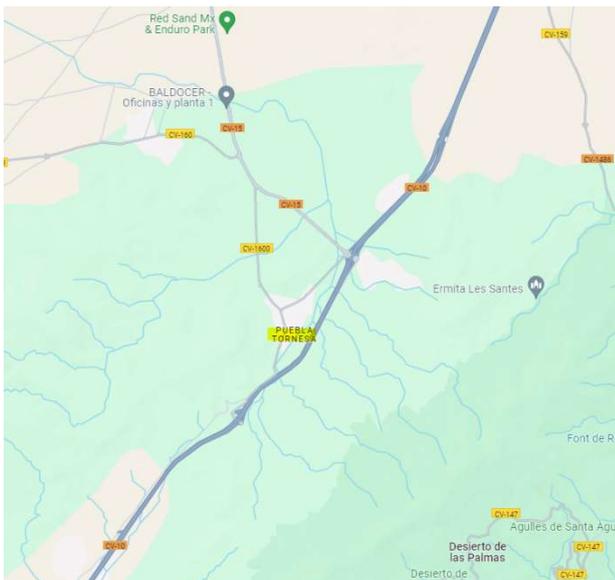


Figura 52. Localización de la Poble Tornesa (Fuente [17])

En dicha ubicación se han realizado diferentes ensayos geotécnicos, de los cuales utilizaremos los sondeos y la cata para realizar el perfil estratigráfico de la zona. También se ha obtenido el perfil de elevación con la herramienta de Google Earth.

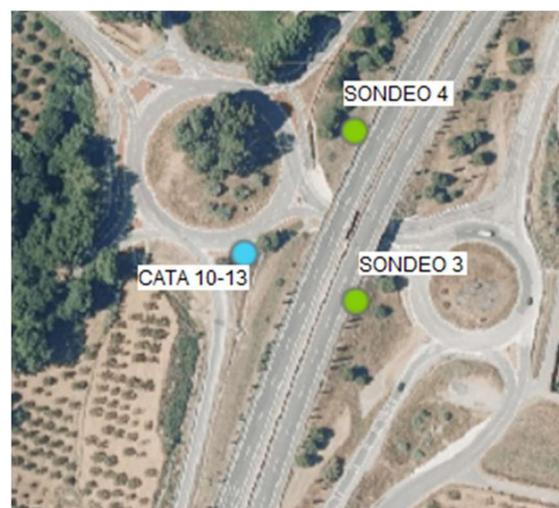


Figura 53. Ubicación de los ensayos (Fuente [17])

La información que nos ofrece dichos ensayos es la siguiente:

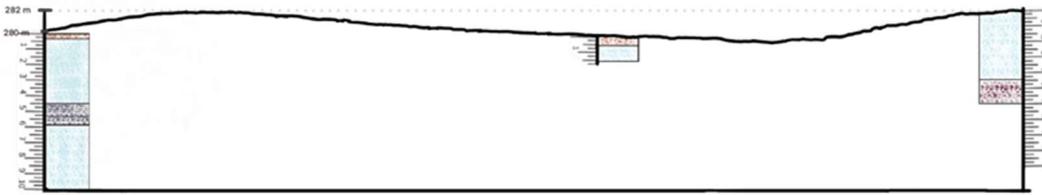


Figura 54. Información de los ensayos (Fuente propia)

Por lo tanto, el perfil estratigráfico queda de la siguiente manera:

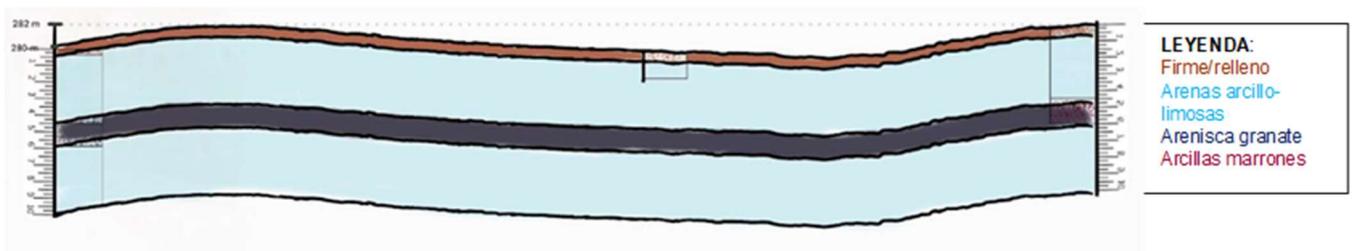


Figura 55. Perfil estratigráfico (Fuente propia)

A partir de dichos ensayos se han obtenido los siguientes datos:

La densidad de las arenas arcillo limosas es de $2.006 \text{ gr/cc} = 19.67 \text{ kN/m}^3$

Dado que es un terreno de arenas, del lado de la seguridad, se considera un ángulo de rozamiento interno de 15 grados (0.26 radianes).

La tensión admisible es de 400 kPa.

Se ha decidido colocar un muro de 7 metros debido a las características del material, que consiste en arenas arcillo-limosas. Un muro de 7 metros ofrece la capacidad estructural necesaria para garantizar la estabilidad del conjunto, asegurando al mismo tiempo que se cumplan con las restricciones de peso y dimensiones establecidas para el transporte.

Para el diseño del muro se proponen dos soluciones: la primera, utilizando una relación de $h/x = 10$, y la segunda, aplicando la relación estudiada previamente en el análisis de cortante, optimizada para prescindir de la armadura de cortante en situaciones específicas:

9.1 CASO 1. SOLUCIÓN CON ARMADURA DE CORTANTE

Para el primer diseño, la geometría a disponer es la siguiente:

Tabla 58. Geometría muro - Aplicación real caso 1 (Fuente propia)

GEOMETRÍA

H	7	m
LONGITUD PUNTA (LP)	2,5	m
LONGITUD TALÓN (LT)	2,5	m
LONGITUD DE LA ZAPATA (B)	5,7	m
ALTURA CIMENTACIÓN (C)	0,4	m
TERRENO POR ENCIMA DE LA PUNTERA	3	m
ESPESOR MÍNIMO EN CORONACIÓN (EC)	0,15	m
ÁNGULO MÍN TRASDÓS	90	grados
ÁNGULO MÍN INTRADÓS	90	grados
D'	0,05	m
PROPORCIÓN DEL ESPESOR (H/X)	10	

Y la armadura necesaria a disponer es la que se muestra a continuación:

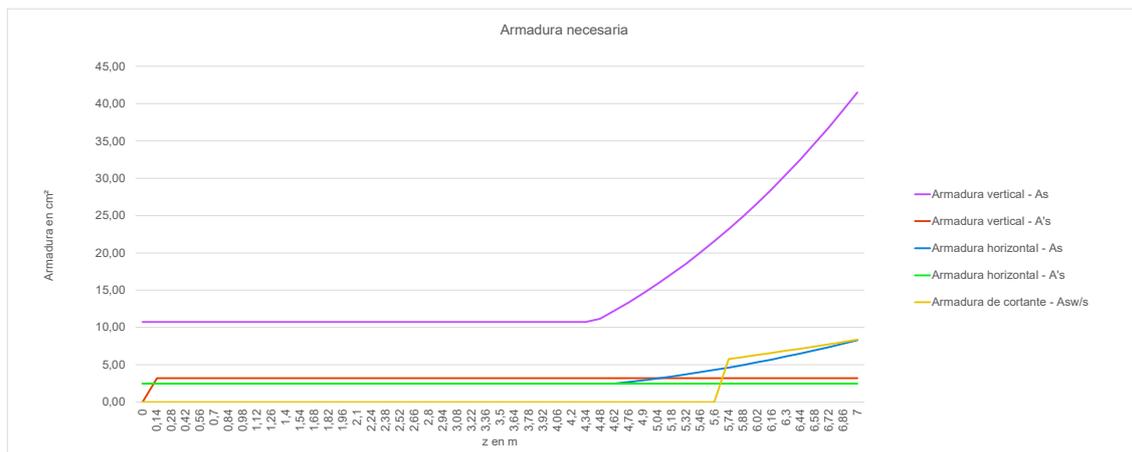


Figura 56. Cuantía de armado necesaria para muro del caso 1 - aplicación práctica (Fuente propia)



Tabla 59. Cuantía de armado necesaria para muro del caso 1 - aplicación práctica (Fuente propia)

Z m	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As cm ²	A's cm ²	As cm ²	A's cm ²	Asw/s cm ²
0,00	10,73	0,00	2,50	2,50	0,00
0,14	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,28	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,42	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,56	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,70	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,84	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
0,98	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,12	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,26	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,40	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,54	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,68	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,82	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
1,96	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,10	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,24	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,38	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,52	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,66	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,80	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
2,94	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,08	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,22	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,36	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,50	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,64	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,78	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
3,92	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
4,06	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
4,20	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
4,34	10,73	3,22	2,50	2,50	0,00
4,48	11,17	3,22	2,50	2,50	0,00
4,62	12,23	3,22	2,50	2,50	0,00
4,76	13,36	3,22	2,67	2,50	0,00
4,90	14,55	3,22	2,91	2,50	0,00
5,04	15,81	3,22	3,16	2,50	0,00
5,18	17,14	3,22	3,43	2,50	0,00
5,32	18,54	3,22	3,71	2,50	0,00



5,46	20,01	3,22	4,00	2,50	0,00
5,60	21,56	3,22	4,31	2,50	0,00
5,74	23,18	3,22	4,64	2,50	5,78
5,88	24,88	3,22	4,98	2,50	6,04
6,02	26,66	3,22	5,33	2,50	6,31
6,16	28,52	3,22	5,70	2,50	6,59
6,30	30,46	3,22	6,09	2,50	6,87
6,44	32,49	3,22	6,50	2,50	7,16
6,58	34,61	3,22	6,92	2,50	7,45
6,72	36,81	3,22	7,36	2,50	7,75
6,86	39,11	3,22	7,82	2,50	8,05
7,00	41,50	3,22	8,30	2,50	8,36

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesita un total de 181.95 kg de acero y 4.9 m³ de hormigón por metro lineal.

Tabla 60. Muro de 7 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D O R A V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	V1	11	20	200		2,466150233	7200	17,75628168	6
Vr1	11	20	200		2,466150233	1740	4,291101406	6	25,74660843
V2	11	10	100		0,616537558	7100	4,377416664	6	26,26449998
Vr2	0	16	160		1,578336149	160	0,252533784	0	0

H O R R I Z O N T A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS	PESO TOTAL (kg)
	H1	0	8			0,394584037	1000	0,394584037	24
Hr1	0	20			2,466150233	0	0	0	0
H2	0	8			0,394584037	1000	0,394584037	24	9,470016895
Hr1	0	20			2,466150233	0	0	0	0

Tabla 61. Muro de siete metros y canto constante. Detalle del armado a cortante. (Fuente propia)

z (m)	Asw/s Requerida (cm ² /m)	Separación de estribos (mm)	Número de estribos en tramo	Asw/s Dispuesta (cm ² /m)	Peso total de estribos (kg)
5.74	5.78	130	10	8.70	4.47
5.88	6.04	130	10	8.70	4.47
6.02	6.31	130	10	8.70	4.47
6.16	6.59	130	10	8.70	4.47
6.30	6.87	130	10	8.70	4.47
6.44	7.16	130	10	8.70	4.47
6.58	7.45	130	10	8.70	4.47
6.72	7.75	130	10	8.70	4.47
6.86	8.05	130	10	8.70	4.47
7.00	8.36	130	10	8.70	4.47

Longitud total del tramo: 1.26 m	Diámetro de estribo: 12 mm
Número total de estribos: 10 estribos	Área de estribo (A): 113.10 mm ²
Peso total del acero: 4.47 kg	Separación de estribos (s): 130 mm

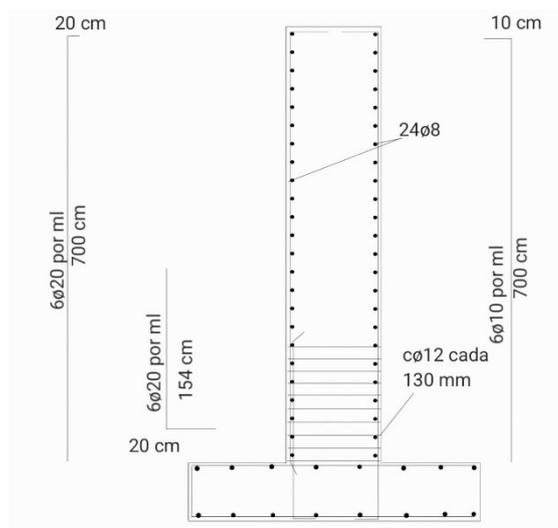


Figura 57. Disposición del armado para un muro de siete metros y canto constante (Fuente propia)

Por lo tanto, teniendo en cuenta los precios actuales del mercado, el precio del muro por metro lineal es de 1273.85 €

Tabla 62. Cálculo del precio por ml para el aplicación real-caso 1 (Fuente propia)

Precio		
kg de acero	3,5	€
m ³ de hormigón	130	€
Precio por ml	1273,855913	€/ml

9.2 CASO 2. SOLUCIÓN SIN ARMADURA DE CORTANTE

Para diseñar un muro ménsula sin armadura de cortante, se atiende a los resultados obtenidos en el estudio anterior en el que, tal y como se puede observar en la siguiente tabla, se ha obtenido que para un muro de 7 metros la máxima relación H/x que puede aplicarse para que la armadura de cortante no sea necesaria es de H/8.

Tabla 63. Resultados estudio de la armadura de cortante (Fuente propia)

V_{Ed}/V_{Rd}							
<i>H</i>	7,00	8,01	9,44	11,64	15,34	18,52	21,04
2	0,25	0,28	0,34	0,45	0,65	0,84	1,00
3	0,36	0,42	0,49	0,59	0,79	1,00	1,18
4	0,48	0,56	0,65	0,79	1,00	1,19	1,39
5	0,61	0,70	0,82	1,00	1,27	1,49	1,65
6	0,74	0,85	1,00	1,22	1,56	1,82	2,02
7	0,87	1,00	1,18	1,44	1,85	2,17	2,41
8	1,00	1,15	1,37	1,67	2,15	2,53	2,81
9	1,13	1,31	1,56	1,91	2,46	2,89	3,22
10	1,27	1,47	1,75	2,15	2,77	3,26	3,63

Por lo tanto, la geometría a disponer es la siguiente:

Tabla 64. Geometría muro - Aplicación real caso 2 (Fuente propia)

GEOMETRÍA

H	7	m
LONGITUD PUNTA (LP)	2,5	m
LONGITUD TALÓN (LT)	2,5	m
LONGITUD DE LA ZAPATA (B)	5,7	m
ALTURA CIMENTACIÓN (C)	0,4	m
TERRENO POR ENCIMA DE LA PUNTERA	3	m
ESPESOR MÍNIMO EN CORONACIÓN (EC)	0,15	m
ÁNGULO MÍN TRASDÓS	90	grados
ÁNGULO MÍN INTRADÓS	90	grados
D'	0,05	m
PROPORCIÓN DEL ESPESOR (H/X)	8	

Y la armadura necesaria a disponer es la que se muestra a continuación:

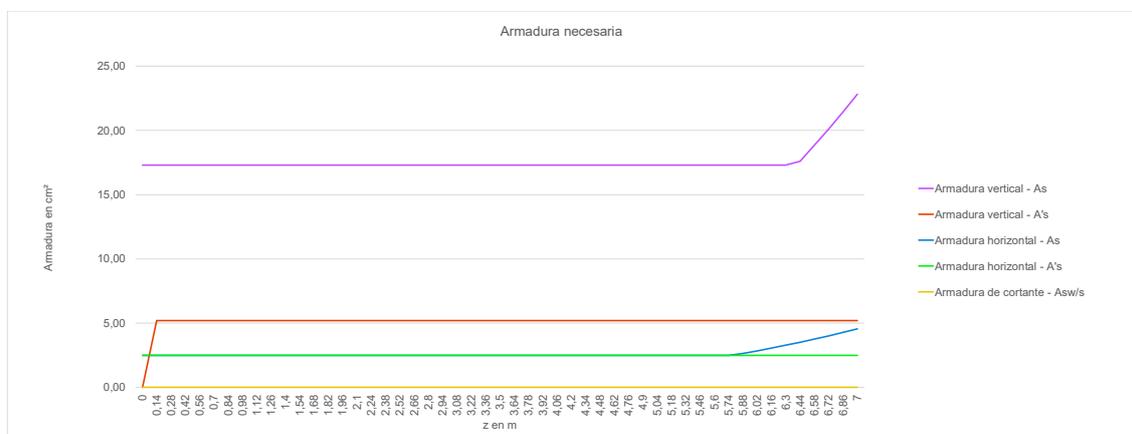


Figura 58. Cuantía de armado necesaria para muro del caso 2 - aplicación práctica (Fuente propia)



Tabla 65. Cuantía de armado necesaria para muro del caso 1 - aplicación práctica (Fuente propia)

Z m	ARMADURA VERTICAL		ARMADURA HORIZONTAL		ARMADURA DE CORTANTE
	As cm ²	A's cm ²	As cm ²	A's cm ²	Asw/s cm ²
0,00	17,31	0,00	2,50	2,50	0,00
0,14	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
0,28	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
0,42	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
0,56	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
0,70	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
0,84	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
0,98	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
1,12	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
1,26	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
1,40	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
1,54	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
1,68	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
1,82	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
1,96	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
2,10	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
2,24	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
2,38	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
2,52	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
2,66	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
2,80	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
2,94	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
3,08	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
3,22	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
3,36	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
3,50	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
3,64	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
3,78	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
3,92	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
4,06	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
4,20	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
4,34	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
4,48	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
4,62	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
4,76	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
4,90	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
5,04	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
5,18	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
5,32	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00



5,46	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
5,60	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
5,74	17,31	5,19	2,50	2,50	0,00
5,88	17,31	5,19	2,65	2,50	0,00
6,02	17,31	5,19	2,85	2,50	0,00
6,16	17,31	5,19	3,06	2,50	0,00
6,30	17,31	5,19	3,29	2,50	0,00
6,44	17,61	5,19	3,52	2,50	0,00
6,58	18,83	5,19	3,77	2,50	0,00
6,72	20,11	5,19	4,02	2,50	0,00
6,86	21,43	5,19	4,29	2,50	0,00
7,00	22,81	5,19	4,56	2,50	0,00

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se propone la siguiente disposición de armado para la que se necesita un total de 173 kg de acero y 6.13 m³ de hormigón por metro lineal. Igual que el muro anterior, este muro también necesita armadura de cortante.

Tabla 66. Muro de 7 metros y canto constante. Despiece del armado (Fuente propia)

A R M A D U R A V E R T I C A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS
	V1	11	20	200 7000	2,466150233	7200	17,75628168	6
	Vr1	11	20	200 840	2,466150233	1040	2,564796242	2
	V2	11	12	120 7000	0,887814084	7120	6,321236277	6
	Vr2	0	16	160 0	1,578336149	160	0,252533784	0
H O R R I Z O N A L	MARCA	CÓDIGO	DIÁMETRO (mm)	FORMA	Kg x metro	LONG TOTAL (mm)	PESO BARRA (kg)	NÚMERO DE BARRAS
	H1	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	24
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0
	H2	0	8	1000	0,394584037	1000	0,394584037	24
	Hr1	0	20	0	2,466150233	0	0	0

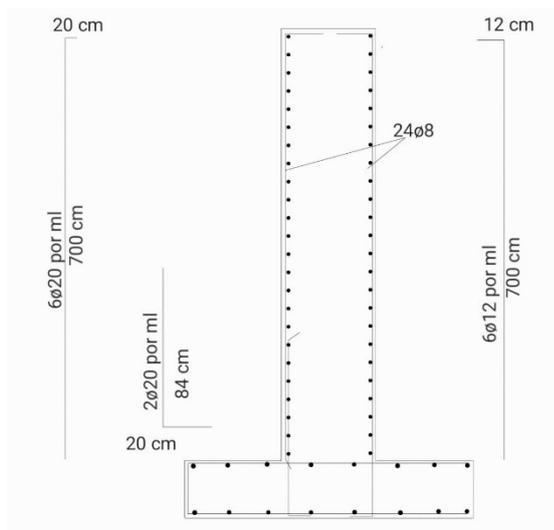


Figura 59. Disposición del armado para un muro de siete metros y canto constante (Fuente propia)

Por lo tanto, teniendo en cuenta los precios actuales del mercado, el precio del muro por metro lineal es de 1401,76 €

Tabla 67. Cálculo del precio por ml para el aplicación real-caso 1 (Fuente propia)

Precio	
kg de acero	3,5 €
m ³ de hormigón	130 €
Precio por ml	1401,766569 €/ml

9.3 DISPOSICIÓN FINAL

Por lo tanto, atendiendo a los resultados obtenidos, se puede concluir que la solución con armadura de cortante requiere menos hormigón, lo que reduce el coste total del material, resultando una opción más económica por metro lineal.

- Caso 1: Solución con armadura de cortante

Cantidad de acero: 181.95 kg/m

Volumen de hormigón: 4.9 m³/m

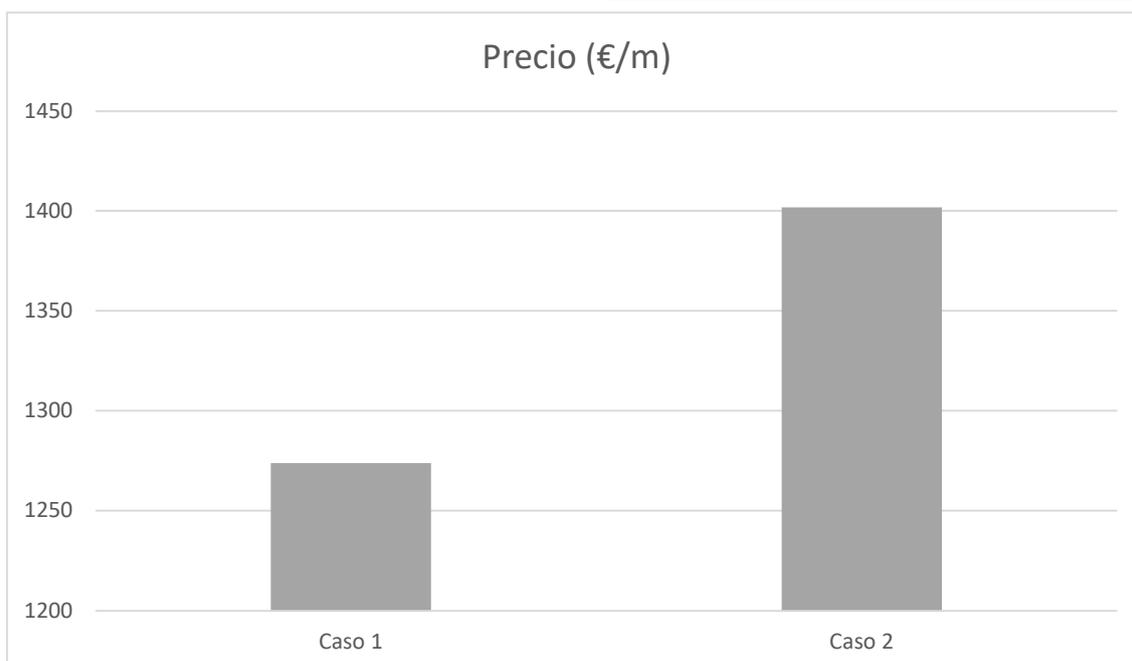
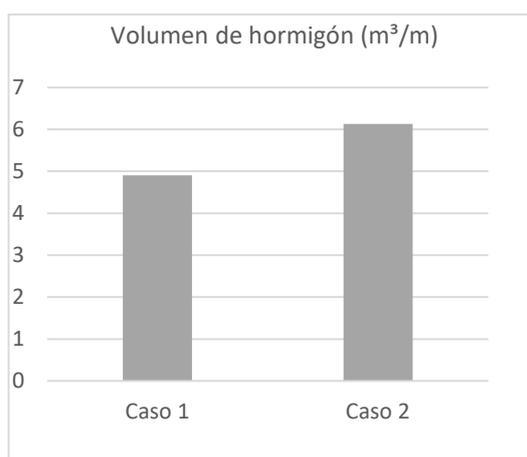
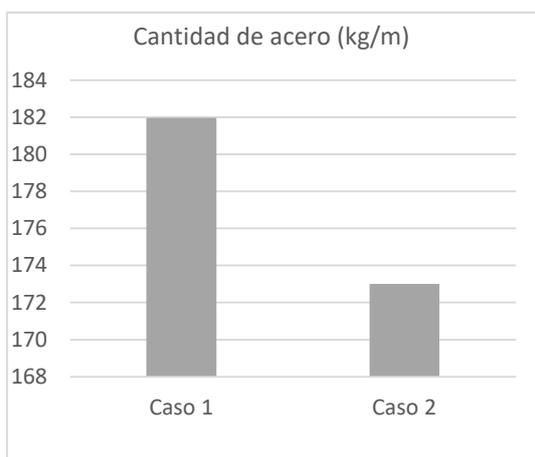
Precio total por metro lineal: 1273.85 €/ml

- Caso 2: Solución sin armadura de cortante

Cantidad de acero: 173 kg/m

Volumen de hormigón: 6.13 m³/m

Precio total por metro lineal: 1401.76 €/m





En el caso 1, la disposición de la armadura de cortante permite una distribución más eficiente de los esfuerzos, aumentando la resistencia del muro y reduciendo la necesidad de un mayor espesor de la sección.

Para el caso 2, aunque se prescinde de la armadura de cortante, se requiere un mayor espesor para soportar cargas, lo que incrementa el volumen de hormigón necesario y, por ende, el coste total.



10) CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo, se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo del diseño y dimensionamiento de muros ménsula prefabricados, destacando la relevancia de estas estructuras en el campo de la ingeniería civil moderna.

El estudio paramétrico realizado se ha enfocado en analizar cómo varían el costo y el peso del alzado del muro según la altura del muro y el tipo de canto (constante o variable). Este análisis ha permitido identificar configuraciones más eficientes desde el punto de vista económico y estructural. En particular, se ha observado que, para muros de mayor altura, el uso de un canto variable ofrece una distribución más uniforme del hormigón y del acero a lo largo del muro, optimizando así los recursos y reduciendo significativamente el peso y el coste sin comprometer la estabilidad estructural.

El análisis de la necesidad de armadura de cortante se ha enfocado en identificar el límite H/e (donde 'H' es la altura del muro y 'e' el espesor) a partir del cual se puede prescindir de esta armadura sin comprometer la seguridad estructural del muro. Para ello, se ha desarrollado una fórmula específica que permite calcular este límite en función de la altura del muro. Este cálculo es crucial, ya que nos permite optimizar el diseño, reduciendo la cantidad de acero utilizada cuando es posible, sin sacrificar la seguridad.

Sin embargo, aunque es posible eliminar la armadura de cortante en ciertos casos, hacerlo no siempre resulta en una solución más eficiente. Al prescindir de esta armadura, se requiere un aumento en el espesor del muro para mantener la resistencia necesaria, lo que incrementa el peso del muro. Este aumento de peso puede plantear problemas adicionales en términos de transporte y manejo de los elementos prefabricados, afectando la viabilidad logística del proyecto.

En cuanto a la prefabricación, aunque evitar la armadura de cortante podría simplificar el proceso constructivo al reducir la complejidad del armado, esto debe ser sopesado con las implicaciones de un mayor espesor y peso del muro. En muchas situaciones, la facilidad constructiva de no incluir armadura de cortante no compensa las desventajas logísticas y económicas asociadas con muros más pesados y gruesos.

El caso práctico de la Población Tornesa ha servido para validar los hallazgos teóricos, demostrando la aplicabilidad de los resultados obtenidos en un contexto real. La capacidad de adaptar la geometría del muro y la disposición de la armadura según las características específicas del terreno ha sido fundamental para asegurar un diseño que no solo es seguro y funcional, sino también optimizado en términos de recursos y costos.

Además, el desarrollo de una hoja de cálculo personalizada ha sido un logro destacado de este trabajo. Esta herramienta ha permitido automatizar los cálculos complejos de dimensionamiento y diseño, ofreciendo una solución eficiente y adaptada a las necesidades del proyecto.



En conclusión, este Trabajo de Fin de Grado no solo ha cumplido con los objetivos planteados, sino que ha ido más allá al proporcionar herramientas y conocimientos que pueden aplicarse en proyectos futuros.

Anna Rodríguez Ferrando

29/08/2024

11) BIBLIOGRAFÍA

1. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2020). Código Técnico de la Edificación (CTE). 10 de marzo de 2024, de <https://www.codigotecnico.org>
2. ANDECE. (s.f.). Evolución de la tecnología de la prefabricación en hormigón. 15 de marzo de 2024, de <https://www.andece.org/evolucion-de-la-tecnologia-de-la-prefabricacion-en-hormigon/>
3. Carreteros.org. (s.f.). Muros. 10 de marzo de 2024, de <http://www.carreteros.org/normativa/estructuras/otras/pdfs/muros.pdf>
4. ANDECE. (2020). Guía Técnica: Elementos prefabricados de hormigón para obras de ingeniería civil. 5 de febrero de 2024, de <https://www.andece.org/wp-content/uploads/2020/03/Gu%C3%ADa-T%C3%A9cnica-Elementos-prefabricados-de-hormig%C3%B3n-para-obras-de-ingenier%C3%ADa-civil.pdf>
5. Calavera, J. (1989). Muros de contención y muros de sótano. Madrid: Intemac Ediciones Técnicas.
6. Tensiter. (s.f.). Muro prefabricado de hormigón. 20 de abril de 2024, de <https://tensiter.es/muro-prefabricado-de-hormigon/>
7. Proerai. (s.f.). Título del contenido o página web. 11 de julio de 2024, de <https://www.proerai.com/>
8. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (1999). Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos. Boletín Oficial del Estado, núm. 22, de 26 de enero, páginas 3015-3288.



9. Estado Límite Último de Agotamiento: UNE-EN 1992-1-1:2013. (2013). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, Artículo 6.10.
10. Estados Límite de Servicio: UNE-EN 1992-1-1:2013. (2013). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, Artículo 7.
11. UNE-EN 1997-1:2000. (2000). Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales. Madrid: Asociación Española de Normalización.
12. UNE-EN 1992-1-1:2013. (2013). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, Artículo 6.1.
13. UNE-EN 1992-1-1:2013. (2013). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, Artículo 6.2.1.
14. UNE-EN 1992-1-1:2013. (2013). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
15. UNE-EN 1992-1-1:2013. (2013). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, Artículo 7.3.
16. Visor GVA. (s.f.). Visor. 29 de abril de 2023, de <https://visor.gva.es/visor/>
17. Tensiter. (s.f.). Muri di sostegno. 2 de julio de 2024, de <https://www.tensiter.com/muri-di-sostegno>
18. Market Research Insights. (2024). Informe sobre el crecimiento del mercado de prefabricados de hormigón en 2024. Market Research Insights. 14 de julio de 2024, de <https://www.marketresearchinsights.com/informe2024>



19. Instituto de Estudios de la Construcción. (2024). Auge del uso de prefabricados de hormigón en Valencia: Informe 2024. Instituto de Estudios de la Construcción. 14 de julio de 2024, de <https://www.ieconstruccion.org/informes/valencia2024>
20. Müller, R. (2005). Design of Concrete Structures Using Eurocode 2. London: Springer.
21. Kumar, R. (2011). Introduction to Shear and Tension in Concrete Structures. New York: Wiley.
22. Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. New York: Wiley.
23. Simpson, B., & Garber, N. J. (2009). Principles of Foundation Engineering. New York: McGraw-Hill Education.
24. Wood, R. H. (1968). Plasticity, composite action and collapse design of unreinforced and reinforced concrete sections. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 40(2), 1-26.
25. Williams, M. S., & Cramer, S. M. (2011). Advanced Reinforced Concrete Design. New York: Wiley.
26. Zhang, L., & Feng, S. (2015). Analysis and Design of Structures to Eurocodes. Berlin: Springer.



12) ANEXO I. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles		Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1.	Fin de la pobreza.			X	
ODS 2.	Hambre cero.				X
ODS 3.	Salud y bienestar.		X		
ODS 4.	Educación de calidad.			X	
ODS 5.	Igualdad de género.			X	
ODS 6.	Agua limpia y saneamiento.		X		
ODS 7.	Energía asequible y no contaminante.			X	
ODS 8.	Trabajo decente y crecimiento económico.	X			
ODS 9.	Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10.	Reducción de las desigualdades.			X	
ODS 11.	Ciudades y comunidades sostenibles.	X			
ODS 12.	Producción y consumo responsables.		X		
ODS 13.	Acción por el clima.		X		
ODS 14.	Vida submarina.				X
ODS 15.	Vida de ecosistemas terrestres.			X	
ODS 16.	Paz, justicia e instituciones sólidas.			X	
ODS 17.	Alianzas para lograr objetivos.			X	



Descripción de la alineación del TFG/TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

ODS 8. Trabajo Decente y Crecimiento Económico:

El Trabajo de Fin de Grado presentado contribuye significativamente al ODS8, que busca promover el trabajo decente y un crecimiento económico inclusivo y sostenible.

A lo largo del trabajo se analiza el uso de muros ménsula prefabricados para proyectos de ingeniería civil. Al optimizar el proceso de construcción mediante la prefabricación, no solo se reducen los tiempos de ejecución, sino que también se mejoran las condiciones laborales al minimizar las actividades in situ, que suelen ser más exigentes físicamente y peligrosas.

Además, se reducen los costos de construcción y mantenimiento, contribuyendo a una viabilidad económica más estable.

ODS 9. Industria, Innovación e Infraestructuras:

El ODS 9, que se centra en la construcción de infraestructuras resilientes, la promoción de la industrialización inclusiva y la innovación se ve directamente reforzado por los estudios realizados en este trabajo.

Los estudios realizados fomentan la innovación en el diseño y construcción del alzado de los muros ménsula prefabricados, lo cual representa un avance significativo en la industrialización del sector de la construcción.

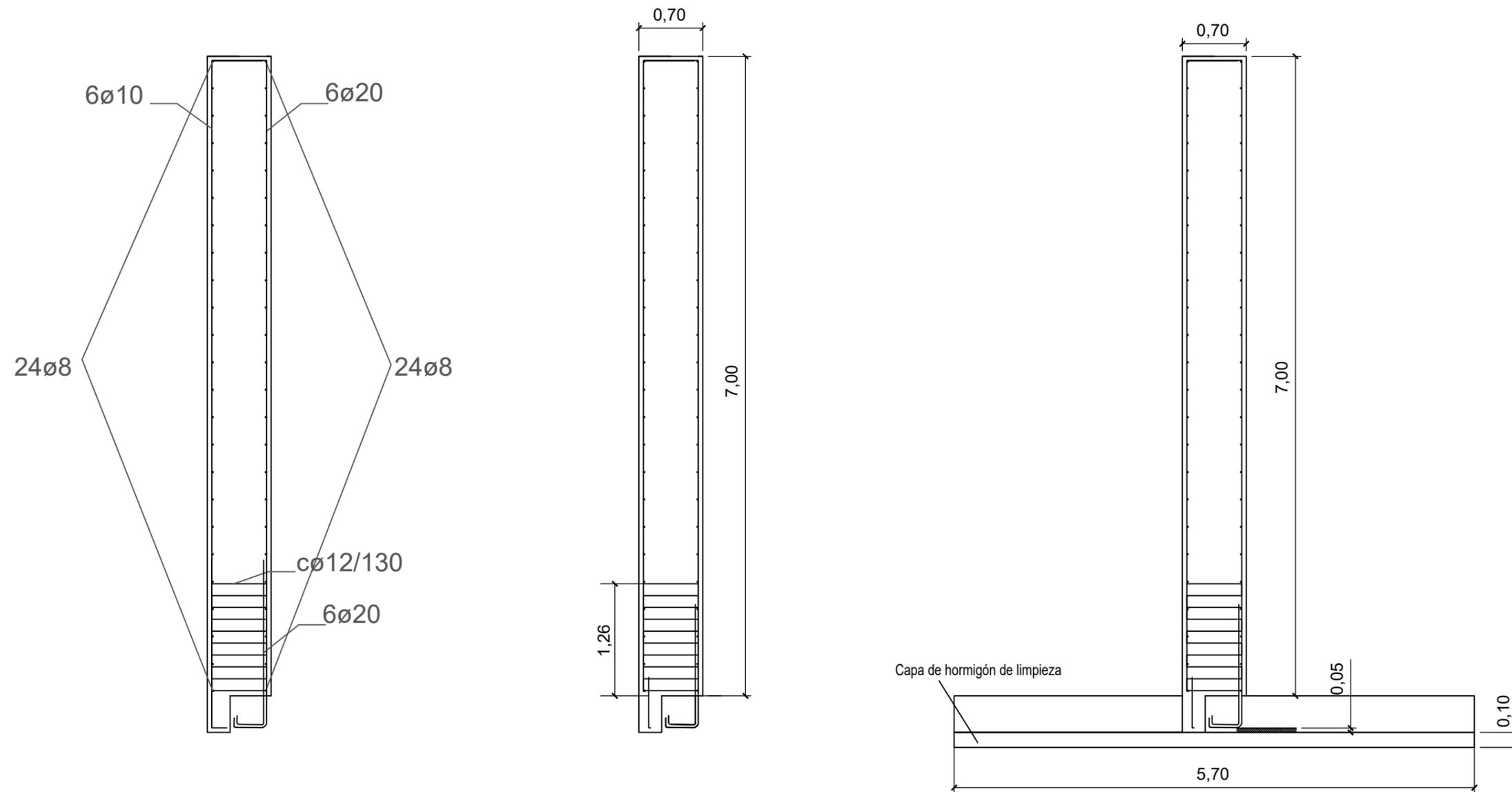
ODS 11. Ciudades y Comunidades Sostenibles:

Finalmente, este TFG también tiene una fuerte alineación con el ODS 11, que busca hacer que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. La implementación de muros ménsula prefabricados en entornos urbanos ofrece una solución sostenible que reduce el impacto ambiental asociado a la construcción tradicional. Al emplear estos métodos, se disminuye la generación de residuos y se optimiza el uso de recursos, lo cual es crucial para el desarrollo de ciudades más sostenibles. Además, la mejora en la eficiencia constructiva contribuye a la creación de infraestructuras más resilientes que pueden adaptarse mejor a los cambios urbanos y a las condiciones ambientales adversas. Este enfoque no solo favorece la sostenibilidad a nivel técnico y ambiental, sino que también promueve la creación de espacios urbanos más habitables y seguros para las comunidades.

Anna Rodríguez Ferrando
29/08/2024



13) ANEXO II. PLANOS CASO PRÁCTICO



ARMADURA POR METRO LINEAL DE MURO



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL
DE MUROS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN

PLANO:

ARMADURA
MURO CASO PRÁCTICO

AUTOR:

Anna Rodríguez Ferrando

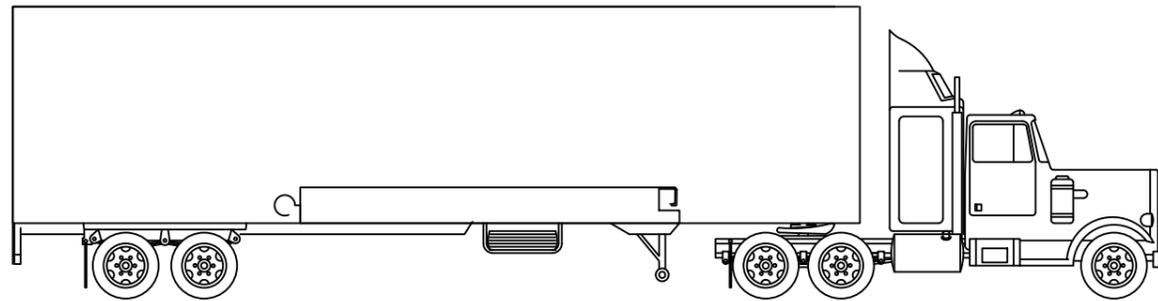
FECHA
AGOSTO 2024

PLANO Nº 1

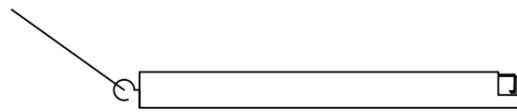
HQJA 1 DE 1

ESCALA:

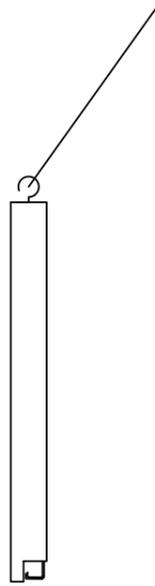
1:75



Transporte del muro prefabricado en posición horizontal para facilitar su manejo y traslado al sitio de instalación.

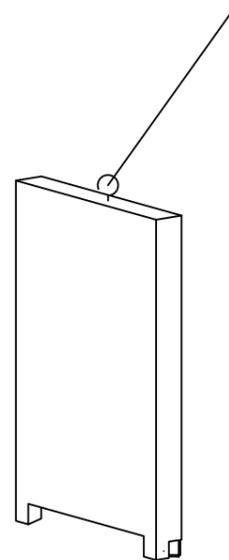


Se conecta el cable de la grúa al anclaje superior del muro para su levantamiento.

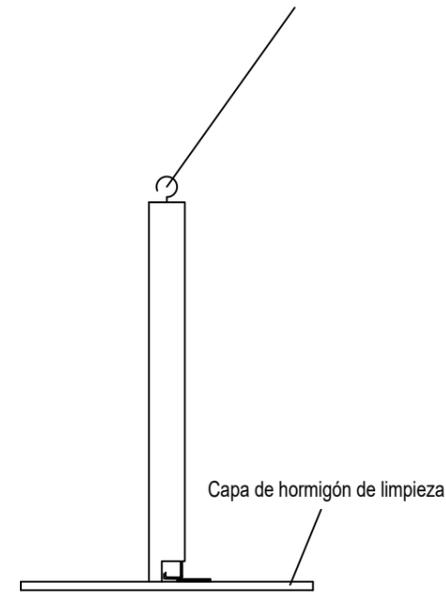


El muro se levanta a su posición vertical utilizando una grúa, asegurando su estabilidad inicial

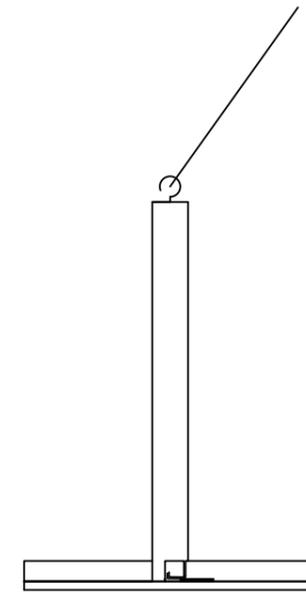
Las patas de apoyo son una zona débil durante el montaje.



Ancho del muro: 2.4 metros
El ancho total del muro es igual al máximo permitido según el transporte



Capa de hormigón de limpieza de 10 cm. Superficie nivelada. El muro se asegura en posición vertical mientras se prepara la cimentación definitiva



Construcción de la zapata in situ para asegurar el muro, garantizando su estabilidad a largo plazo.