



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Calibración numérica de ensayos de extracción de refuerzos en suelos

Trabajo realizado por:

Daniel Gómez Rodríguez

Dirigido por:

Ivan Puig Damians

Grado en:

Ingeniería de Obras Públicas

Barcelona, 21/09/2017

Departamento DECA - Departamento
de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE

GRADO

Agradecimientos

A Jacobo y Antonia, mis padres y a mi chica Ester, por el apoyo incondicional que me han dado.

Al tutor Ivan Puig Damians, por guiarme con paciencia durante el trabajo y prestarme toda la atención que necesitaba para desarrollarlo.

Resumen

Los muros de suelo reforzado son obras de ingeniería ampliamente utilizadas hoy en día, en las últimas décadas han tenido un fuerte desarrollo tecnológico, el avance alcanzado en el desarrollo de estas estructuras ha pasado por la incorporación de nuevos materiales para su diseño.

Para obtener un buen diseño en estructuras de suelo reforzado se requiere una buena combinación entre suelo y refuerzo. En su interacción, se debe lograr producir un material compuesto estructuralmente resistente el cual combine sus mejores características físicas y mecánicas, por lo tanto, es de vital importancia el conocimiento de la interfaz entre suelo y refuerzo.

Las pruebas de extracción de un refuerzo de un suelo en laboratorio, son particularmente útiles para examinar el comportamiento de la interfaz y cuantificar algunos parámetros necesarios para garantizar la optimización de los refuerzos y la seguridad de la obra.

En ingeniería son ampliamente utilizados los modelados numéricos para solucionar problemas de este tipo. Para este caso concreto, se ha generado una modelación numérico 3D del ensayo de extracción de un refuerzo de un suelo mediante el Programa GID, el cual ha sido diseñado para cubrir todas las necesidades en el campo de la simulación numérica y que junto con CODE BRIGHT, un software que es capaz de analizar el problema mecánico en medios geológicos, da solución al mismo mediante el método de los elementos finitos. Una vez efectuada la modelización y simulación del caso base, se han analizado la malla y diferentes parámetros relacionados con la rigidez y la resistencia del suelo.

Con los resultados obtenidos, se determina si el modelo tridimensional utilizado permite una simulación correcta del ensayo de extracción de un refuerzo de un suelo y si ésta es óptima para realizar de una manera rápida y sencilla.

Una vez finalizado el análisis de los resultados, se hace una calibración de los mismos con ensayos reales de extracción de refuerzos reportados para el caso y seguidamente se extraerán una serie de conclusiones de los mismos y se plantearán posibles estudios y trabajos futuros para que el estudio pueda ser retomado y ampliado con más ensayos y simulaciones.

Índice

Agradecimientos.....	i
Resumen	ii
Índice	iii
1 Generalidades	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos del presente trabajo	3
1.3 Metodología de la tesis	3
2 Muros de suelo reforzado	5
2.1 Introducción muros de suelo reforzado	5
2.2 Descripción de diferentes tipos y usos de muros de suelo reforzado	6
2.3 Elementos que forman parte de un muro de suelo reforzado	8
2.3.1 Paramento	8
2.3.2 Suelo o material de relleno	11
2.3.3 Refuerzos utilizados en muros de suelo reforzado	14
2.3.3.1 Geometría.....	14
2.3.3.2 Materiales.....	15
2.3.3.3 Comportamiento del refuerzo	16
2.4 Fricción entre suelo y refuerzo	17
2.4.1 Mecanismos de Transferencia de Estrés.....	17
2.4.1.1 Dilatancia	18
2.4.1.2 La fricción.....	20
2.4.1.3 La resistencia pasiva	20
2.4.1.4 Factor de resistencia al arrastre F^*	21
2.5 Pruebas de extracción de refuerzos de un suelo en laboratorio.....	21
2.5.1 Principio	21
2.5.2 Normativas	22
2.5.3 Componentes del ensayo	22
2.5.4 Metodología.....	25
3 Modelo.....	26
3.1 Introducción.....	26

3.2	Modelo caso base	26
3.2.1	Geometría	26
3.2.2	Materiales	28
3.2.3	Condiciones de contorno	30
3.2.3.1	Intervalos de tiempo.....	31
3.2.4	Malla.....	32
3.2.5	Resultados caso base	33
3.3	Sensibilidad de la malla.....	34
3.3.1	Sensibilidad de la malla zona SOIL.	35
3.3.2	Sensibilidad de la malla zona INTERFASE.....	37
3.4	Sensibilidad de los parámetros relacionados con la rigidez y resistencia de los materiales.....	39
3.4.1	Sensibilidad de los parámetros relacionados con la rigidez del suelo.....	39
3.4.1.1	Variación del módulo de Young (E).....	40
3.4.2	Sensibilidad de los parámetros relacionados con la resistencia del suelo	42
3.4.2.1	Variación del ángulo de rozamiento interno (ϕ).....	42
3.4.2.2	Variación ángulo de dilatación (ψ).	44
3.4.2.3	Variación del parámetro de la cohesión (c).	46
3.4.3	Variacion en la carga superior	47
4	Ensayos.....	48
4.1	Materiales y componentes de la prueba.....	48
5	Calibración del modelo.....	51
5.1	Comparación de resultados modelo caso base y ensayos Gelida	51
5.2	Calibración del modelo caso base con ensayos Gelida.	52
6	Futuros trabajos.	54
7	Conclusión.....	55
8	Referencias bibliográficas.	56
9	Anejos.....	57
9.1	Tutorial	57

1 Generalidades

1.1 Introducción

Los muros de suelo reforzado, son de obras de ingeniería que pertenecen al grupo de contención de tierras, son obras donde utilizamos varios elementos de características resistentes diferentes que trabajan en conjunto para conseguir que el sistema sea estructuralmente resistente. En el caso de los muros de suelo reforzado, añadimos al suelo de aportación materiales con notable resistencia a la tracción y al corte que deben mejorar la que tiene el propio suelo. Por este motivo, es necesario conocer como estos elementos trabajan en conjunto, poniendo especial atención a la interacción entre suelo y refuerzo.

Dependiendo de las condiciones de contorno a las que está sometido el muro hay varios tipos de muros de suelo reforzado y para cada tipo de muro hay en el mercado una gran cantidad de refuerzos disponibles para su construcción, con gran variación tanto en la geometría como en los materiales de los refuerzos y por lo tanto en su comportamiento. Para ello, se realizan ensayos en laboratorio denominados ensayos de extracción de refuerzos en suelos.

La prueba de extracción de refuerzos de un suelo en laboratorio, es un método para la determinación de la resistencia que ejercen los refuerzos a su separación de un suelo. Para ello, se utiliza un cajón de separación de laboratorio (Figura 20). Las fuerzas actuantes entre la armadura y el suelo son difíciles de conocer, los factores que influyen en este rozamiento son características de rigidez y resistencia del suelo, la geometría del refuerzo y las características resistentes de los materiales de las armaduras. El objetivo de la prueba es suministrar datos relativos al desarrollo de la fricción en la zona entre el refuerzo y el terreno.

Cuando se realiza la extracción de un refuerzo en un suelo, el suelo y el refuerzo utilizados dentro del cajón de ensayos de extracción, están sometidos a fuerzas que provocan restricciones y desplazamientos de los diferentes materiales en el espacio. La solución al problema será la obtención de desplazamientos y tensiones.

Para dar solución a este problema, se ha generado una modelación numérica 3D del ensayo de extracción con el programa GID juntamente con el software CODE BRIGHT.

GID ha sido desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería (CIMNE) (www.cimne.com), un centro de investigación con sede en Barcelona (España). Es un programa, que ha sido diseñado para cubrir todas las necesidades comunes en el campo de la simulación numérica. El programa, contiene el concepto de pre y post procesamiento. El pre-procesamiento está basado en la introducción de todos los datos necesarios para desarrollar la simulación, geometría del

problema, materiales y condiciones de contorno, seguidamente la generación de una malla y el cálculo. En el post-procesamiento el programa ofrece los cálculos y se incluye todas las herramientas para la interpretación de los datos obtenidos al resolver el problema.

GID es un pre y post-procesador general, no está especializado en un tipo de análisis en concreto, GID no identifica ningún parámetro hasta que no se carga un tipo de problema, tiene que ser modificado para requisitos particulares, para un determinado programa de elementos finitos, dependiendo del problema tendremos que seleccionar un programa adecuado para resolverlo, en nuestro caso será CODE BRIGHT.

CODE BRIGHT ha sido desarrollado, en el Departamento de Ingeniería Geotécnica y Geo-Ciencias de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), es un programa de elementos finitos (FEM) “Finite Element Method” capaz de realizar análisis termo-hidro-mecánicos (THM) en medios geológicos. Trabaja en conjunto con GID, lo utiliza como plataforma de pre y post procesamiento para modelar la solución a problemas de este tipo.¹

El programa resuelve el problema mediante el Método de Elementos Finitos, este método divide el problema en partes más pequeñas conocidas como “elementos” (Figura 1). La división de la geometría en pequeños elementos resuelve un problema complejo, al subdividirlo en problemas más simples, lo que permite a la computadora hacer las tareas con eficiencia. Como el número de elementos es limitado, son llamados “elementos finitos” palabra que da nombre al método. Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales (Figura 1). Al conjunto de todos estos elementos y nodos se lo denomina malla. La precisión del método de los Elementos Finitos depende de la cantidad de nodos y elementos y de su tamaño. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados de las análisis.

Desarrollar un modelo mediante alguna técnica numérica en geotecnia requiere una serie de pasos previos a tomar un programa y ejecutarlo. En primer lugar, hay que abordar el problema simplificándolo tanto desde el punto de vista de los procesos como tanto desde el punto de vista geométrico y temporal.²

El caso del modelado numérico 3D de las pruebas de extracción de un refuerzo de un suelo, se parte de un caso base donde sabemos las características del suelo ensayado en laboratorio, refuerzos utilizados y resultados de los ensayos y a partir de ahí se crea un modelado numérico 3D llamado caso base.

¹CODE_BRIGHT USER’S GUIDE (February 2016) Departamento de Ingeniería Geotécnica y Geo-Ciencias de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

² Ingeniería Geotécnica – GICO UPC. Tema 11, Métodos numéricos en Geotecnia

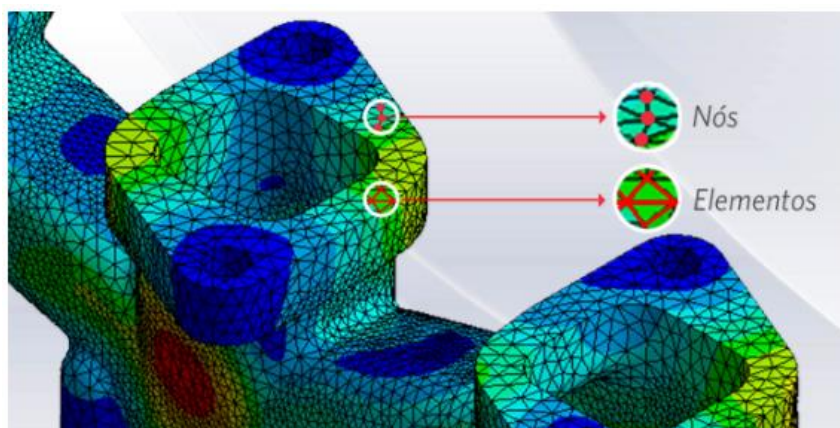


Figura 1. Mallado de una pieza, dividida en elementos y nodos

1.2 Objetivos del presente trabajo

En el presente trabajo se pretende desarrollar un modelado numérico 3D que resuelve el problema de tensiones y desplazamientos que se genera en las pruebas de extracción de refuerzos de un suelo en laboratorio, creando un caso base con características de los materiales aportados realizados en ensayos, y bajo la normativa en cuanto a geometría y condiciones de contorno.

Una vez modelado el caso base, realizar una sensibilidad de la malla creada y ver qué resultado se ajusta más a la realidad teniendo en cuenta el gasto computacional en tiempo y seguidamente, analizar diferentes parámetros respecto a rigidez y resistencia para saber si el modelo se comporta de manera adecuada.

Una vez el modelo se comporte de manera adecuada y es posible reproducir una simulación del ensayo, se realizará una calibración adecuada con respecto a datos disponibles de casos ensayados de extracción de refuerzo de un suelo en laboratorio metálicos y suelo granular.

1.3 Metodología de la tesis

Para el desarrollo de la siguiente tesis se ha seguido la siguiente metodología para conseguir los objetivos descritos anteriormente.

En primer lugar, se ha llevado a cabo una introducción a muros de suelo reforzado, donde se explica de un modo general los tipos de muros de suelo reforzado que existen y que usos pueden desarrollar sin excluir otros tipos u otros usos.

Posteriormente, se han descrito las partes que forman el mismo y como estas partes interactúan entre ellas poniendo especial atención a la *INTERFASE* entre suelo y refuerzo para después poder realizar un adecuado modelado 3D, siguiendo guías para la construcción de muros de suelo reforzado.

He estudiado la normativa que rige los ensayos de tracción de refuerzos en suelo en laboratorio, Norma ASTM D6706-01 (Reapproved 2013) y UNE-EN 13738 2005, para así poderla aplicar al modelado 3D.

Se ha generado un modelado numérico 3D caso base, descrito paso a paso en el anexo 1, con los datos de los materiales utilizados en los ensayos aportados para el caso.

Siguiendo con el procedimiento, se ha hecho una sensibilidad de la malla generada para estudiar el coste computacional en tiempo y calidad de los resultados obtenidos.

Seguidamente, se ha hecho una sensibilidad para estudiar los diferentes parámetros que influyen en la interacción suelo-refuerzo del modelo respecto rigidez y resistencia.

Se ha hecho una calibración del modelado 3D con respecto a los ensayos de laboratorio aportados.

Finalmente Se han propuesto una serie de trabajos futuros para completar y seguir con el estudio de la modelización 3D de los ensayos de tracción de suelos.

2 Muros de suelo reforzado

2.1 Introducción muros de suelo reforzado

Desde mucho tiempo atrás el hombre ha intentado reforzar las construcciones añadiendo a los materiales con cadencia de alguna de sus características resistentes otros materiales que den a ese material la resistencia adecuada para su función resistente.

En los años 60 el ingeniero francés M. Henri Vidal investigo la formación de terraplenes con refuerzos en su interior y en el año 1963 los patenta con el nombre de “Terre Armée”.

Son obras de ingeniería que por su dimensión, pueden formar parte de un proyecto de construcción o también pueden ser un proyecto único, son obras factibles para alturas de más de 30 metros (Figura 2), podemos ver un ejemplo de su dimensión.³



Figura 2. Tierra armada, cliente Dragados, altura máxima del muro 24 m, tercer carril TF1 Santa cruz de Tenerife.

Los muros de suelo reforzado, son una combinación de diferentes elementos, combinan tierra compactada, reforzada con materiales metálicos como barras de acero o materiales no metálicos normalmente poliméricos, colocados longitudinalmente y con un paramento en la parte frontal, aprovechan el peso propio del suelo aportado a la estructura y su interacción con los refuerzos para conseguir la resistencia global de la estructura, el funcionamiento de un suelo reforzado con armaduras, radica esencialmente en la existencia de un rozamiento entre el relleno y las armaduras.

³U. S. Department of Transportation Federal High way Administration Volume I (November 2009), Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Wall sand Reinforced Soil Slopes

2.2 Descripción de diferentes tipos y usos de muros de suelo reforzado

Los muros de suelo reforzado pertenecen al grupo de obras de contención de tierras y pueden utilizarse para los siguientes casos más comunes sin excluir otras aplicaciones.

- **Estribos de puentes.** Son estructuras de soporte de plataformas viales donde existan limitaciones de espacio para la limitación de terraplenes (Figura 3).



Figura 3

- **Estructuras de contención de tierras.** Refuerzo de taludes artificiales para aumentar su inclinación o mejorar su estabilidad. Incluyen taludes de menos de 70° de ángulo con elementos de refuerzo y sin paramento (Figura 4).

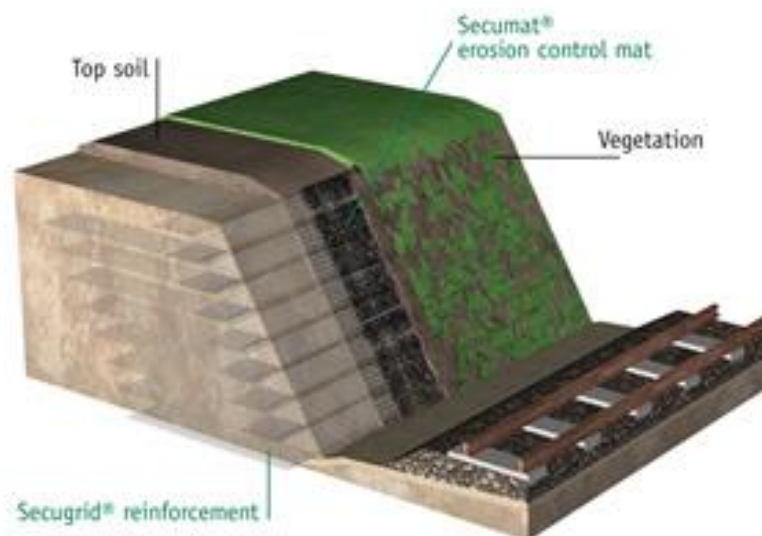


Figura 4

- **Estructuras marítimas de contención.** Los muros de suelo reforzado ofrecen importantes ventajas técnicas y de coste respecto a las estructuras de retención de hormigón en sitios con condiciones de cimentación deficientes (Figura 5).

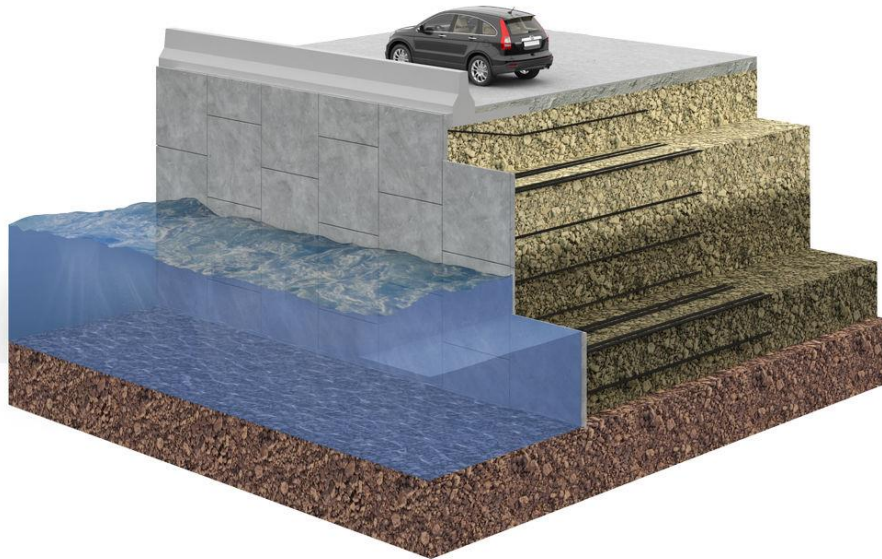


Figura 5

- **Estructuras muros en sí misma.** Elimina costes de cimentaciones, como pilas y pilotes, que son necesarios para el soporte de estructuras convencionales y dan lugar a ahorros en proyectos terminados (Figura 6).

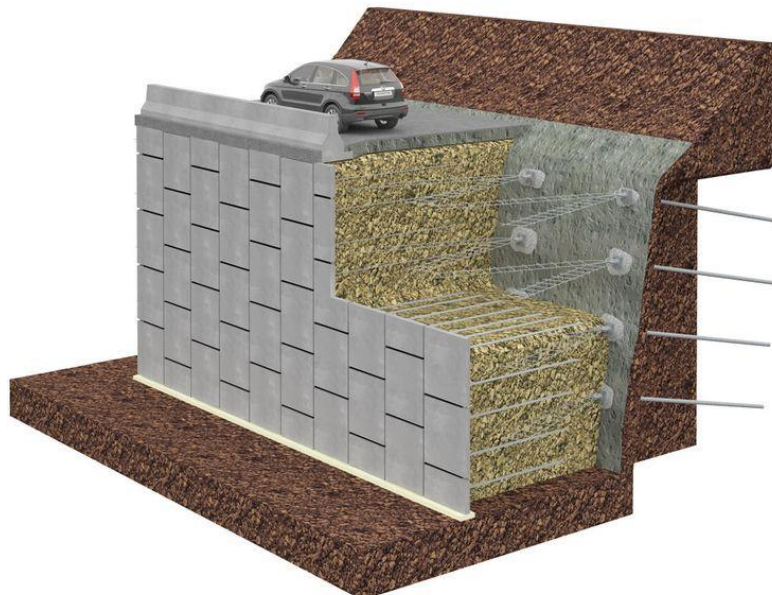


Figura 6

2.3 Elementos que forman parte de un muro de suelo reforzado

Los elementos principales que forman parte de un suelo reforzado son el material de relleno que puede ser de aportación o si el terreno que hay cumple unas características lo podemos utilizar para el relleno, los refuerzos y el paramento exterior (Figura 7).

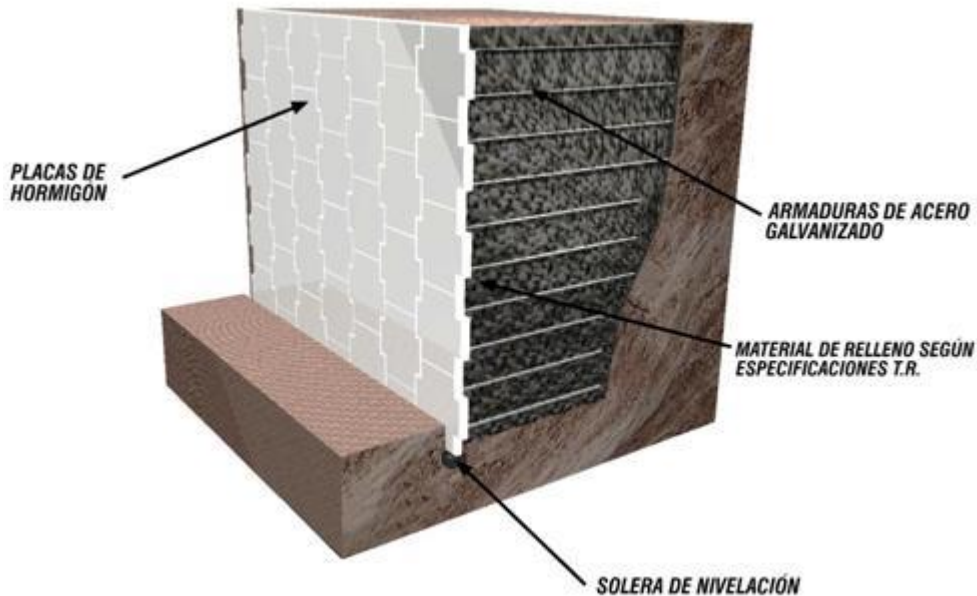


Figura 7. Partes que forman los muros de suelo reforzado.

2.3.1 Paramento

Los tipos de elementos de revestimiento utilizados en los diferentes sistemas muros de suelo reforzado controlan su estética y una posible degradación de la parte frontal del muro. El revestimiento proporciona protección contra el desprendimiento y la erosión y proporciona, en ciertos casos, caminos de drenaje. Es la única parte visible de la estructura terminada, hay disponibles una amplia gama de acabados. Los principales tipos de revestimientos son:

- **Paneles de hormigón prefabricado.** Existen diversas formas y dimensiones de paneles prefabricados, los de hormigón tienen un espesor mínimo de 140 mm y son de forma cuadrada, rectangular, cruciforme, diamante o hexagonal geometría. Las dimensiones típicas del panel nominal son de 1,5 m de alto y de 1,5 o 3 m de ancho (Figura 8).



Figura 8

- **Unidades de pared modular de bloque seco.** Estos son relativamente pequeños, unidades de hormigón que han sido específicamente diseñadas y fabricadas para el muro de contención. El peso de estas unidades oscila generalmente de 15 a 50 Kg, con unidades de 35 a 50 kg de uso rutinario para proyectos de carreteras. Las alturas varían típicamente de 0.1 a 0.3 m para los diversos fabricantes. La longitud de la cara expuesta suele variar de 0.2 a 0.45 m (Figura 9).



Figura 9

- **Malla de alambre soldado.** La rejilla de alambre que actúa como refuerzo puede doblarse en la parte frontal de la pared para formar la cara de la pared (Figura 10).



Figura 10

- **Gabiones.** Los gaviones (cestos de alambre llenos de rocas) se pueden utilizar como pared de muros de suelo reforzado con elementos de refuerzo. Las estructuras de gaviones están constituidas por elementos metálicos confeccionados de malla hexagonal a doble torsión, rellenos con piedras. Se emplean con mucho éxito en la construcción de estructuras de contención, defensas ribereñas y estructuras hidráulicas transversales (Figura 11).



Figura 11

- **Revestimiento Geosintético.** Los refuerzos geosintéticos se enrollan alrededor de la cara expuesta. Estas caras son susceptibles a la degradación, el vandalismo, y el daño debido al fuego. La geomalla usada para el refuerzo del suelo puede ser enrollada alrededor para formar la cara de la estructura de una manera similar a la malla de alambre soldada. La vegetación puede crecer y puede proporcionar la protección de la luz ultravioleta para la geomalla y una agradable apariencia (Figura 12).⁴



Figura 12

2.3.2 Suelo o material de relleno

Se denominan materiales de relleno de obras de muros de suelo reforzado, aquellos suelos o materiales pétreos que se utilizan para formar el cuerpo de los macizos de tierra armada tras su vertido, colocación y adecuada compactación.

Los proveedores de materiales de suelo para muros, tienen sus propios criterios. Los materiales a emplear deben ajustarse a los límites de gradación, índice de plasticidad y criterios de solidez. Serán suelos o materiales pétreos obtenidos de los préstamos que se determinen en los planos y pliegos de prescripciones técnicas particulares o se autoricen por el director de obra.

Los criterios de selección del relleno deben tener en cuenta el rendimiento a largo plazo de la construcción, la estabilidad de la fase de construcción y el entorno de degradación creado para los refuerzos.

Los suelos granulares son ideales para las estructuras de muros de suelo reforzado, se debe reconocer, sin embargo, que el uso del relleno debe ser, en general, conservador. Estos materiales de relleno reforzados seleccionados serán más caros que los de menor calidad.

⁴U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration Volume I (November 2009), Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes

Es necesario tener los siguientes parámetros del suelo para correlacionar la resistencia de arrastre con el tipo de suelo utilizado:

- Peso específico del material de relleno
- Ángulo de fricción interna
- Cohesión (si existe)
- Coeficiente de uniformidad

Seguidamente, se presentan algunos criterios de gradación según normativa y guía de recomendaciones para construcción y diseño de muros de suelo reforzados.

Como puede verse en la tabla 1, según la norma AASTHO 2014, es necesario cumplir un tamaño máximo de las partículas según el refuerzo que vayamos a utilizar en el muro (acero o polimérico). Para refuerzos de acero necesitamos que el tamaño máximo de los áridos sea de 102 mm y para los refuerzos poliméricos necesitamos que el tamaño máximo de los áridos sea de 19 mm, como puede verse en la tabla 2, esta parte un 40% de las partículas podría pertenecer enteramente a gravas, que un 60% de las partículas sea más pequeña de 0.425 mm perteneciente a arenas y que solo un 15% del material sea más pequeñas sus partículas de 0.075 mm pudiendo pertenecer a arenas, limos o arcillas.

Tabla 1. Criterios de código de gradación según American AASHTO 2014 para muros de suelo reforzado

Gradation	U.S. sieve size	Percentage passing (%)
	102 mm for steel reinforcement 19 mm for polymeric reinforcements ^(a)	
	No. 40 (0.425 mm)	0 - 60
	No. 200 (0.075 mm)	0 - 15
Plasticity Index, <i>PI</i>	$PI \leq 6$	

Note: ^(a) Unless full scale installation damage tests are conducted.

Además, tal como se especifica en AASHTO (2014), debe satisfacer una clasificación bien clasificada (de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos de la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales - ASTM D2487 2011), lo que implica, suelo de grava y arena GW o SW (Gravel well, Sand well).

Que implica, para un suelo GW o SW:

Deben cumplir que su coeficiente de curvatura C_c está comprendido entre 1 y 3 los suelos bien granulados tienen valores comprendidos entre estos, indica la forma de la curva granulométrica.

Además de que su coeficiente de uniformidad C_u es superior a 4, en el caso de las gravas y, a 6 en arenas. El valor del coeficiente de uniformidad C_u está comprendido

entre la unidad y el infinito. Valores altos, superiores a 4 en el caso de gravas y 6 en el caso de las arenas, indican suelos bien granulados, es decir, suelos con gran variedad de tamaño de partículas. Por el contrario, valores del coeficiente de uniformidad cercanos a la unidad, son representativos de suelos mal graduados.⁵

Con suelos de grano fino con más de un 5% pasa por el tamiz n° 200, sería suelo mal graduado. Un reciente estudio de investigación del NCHRP (NCHRP 24-22) sobre la selección de materiales de relleno reforzado para muros de suelo reforzado ha confirmado que el relleno reforzado con hasta un 35% pasando un tamiz de 200 mm (0,75 mm) podría ser relleno reforzado, siempre que las propiedades de los materiales estén bien definidas y lo establecido para abordar las cuestiones de diseño, los problemas de diseño incluyen drenaje, corrosión, deformaciones, retiro de refuerzo, construcción y expectativas de empleo, puede haber un ahorro significativo en el uso de relleno reforzado de menor calidad, el efecto en el rendimiento debe evaluarse cuidadosamente.

Para paredes de muros de suelo reforzado construidas con relleno reforzado que contengan más del 15%, pasando un No. 200 (0,075 mm) y / o un índice de plasticidad PI superior a 6, el índice plástico es intrínseco de cada suelo y aporta información sobre el incremento de humedad necesario para pasar del estado semisólido al líquido. Tanto los parámetros de resistencia al corte totales como efectivos, deben evaluarse con el fin de obtener una evaluación precisa de las tensiones horizontales, deslizamiento y la influencia del drenaje en el análisis.

El contenido de humedad y la densidad del relleno deben controlarse cuidadosamente durante la construcción para obtener valores de fuerza y de interacción. Las especificaciones de compactación deben incluir un espesor de elevación especificado y el rango permitido del contenido de humedad con referencia al óptimo. El control de humedad de la compactación debe ser $\pm 2\%$

Los requisitos de compactación del relleno reforzado son diferentes en las proximidades de la pared (1 m). Un equipo de compactación más ligero (por ejemplo, una placa vibratoria o rodillo) se utiliza cerca de la cara de la pared para evitar el movimiento del panel de revestimiento.

Según se especifica en AASHTO, el material de relleno que se utilizará en las estructuras de suelo reforzado deben cumplir con los requisitos del proyecto, así como, densidad (peso unitario de aproximadamente 18 - 20 kN / m³ para los escenarios secos y 20 - 22 KN / m³ cuando está saturado) y resistencia (ángulo de fricción interno ϕ mínimo medido de 36°).

⁵ Geotécnia – GICO UPC. Tema 2, Estructura y propiedades de los suelos, identificación y clasificación

El material de relleno debe estar libre de materia orgánica y otras sustancias perjudiciales.⁶

2.3.3 Refuerzos utilizados en muros de suelo reforzado

Hay una gran variedad de refuerzos en el mercado disponibles para uso en muros de suelo reforzado. Para una posible clasificación podríamos dividirlos según su geometría, según los materiales con los que están hechos y sobre el comportamiento que estos refuerzos presentan al estar sometidos a las fuerzas de fricción y corte. A continuación se describen estas clasificaciones.

2.3.3.1 Geometría

Según la geometría de los refuerzos podemos clasificarlos según tiras o barras o según una geometría en forma de malla:

Tiras o barras. Los elementos son alargados, se caracterizan por el área de la sección transversal de donde podemos obtener el espesor o el perímetro del elemento de refuerzo para luego caracterizar la fuerza de extracción, se utilizan las tiras de acero con nervaduras, tiras de acero lisas de igual espesor que las tiras nervadas pero más anchas (Figura 13).



Figura 13

Mallas. Se caracteriza por el ancho de las tiras y la distancia horizontal de centro a centro entre ellas. No es necesario saber cuál es la sección transversal, ya que la resistencia de una banda se expresa mediante fuerza por unidad de ancho, debido que son refuerzos muy delgados y hay dificultades para medir el espesor de estos materiales.

⁶ U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration Volume I (November 2009), Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes

También podemos encontrar mallas metálicas. Dentro de las mallas no metálicas podemos encontrar diferentes tipos:

Geotextiles:

Laminas formadas por fibras continuas filamentosas o aplanadas (cintas), con trama regular (tejidos) o entrecruzadas sin ordenacion preferente (fieltros o no tejidos), en algunos casos las fibras van pegadas o soldadas termicamente (Figura 10).

Geomallas:

Tramas cullos huecos se consiguen por estiramiento, punzonamiento (agujeteado) o creacion de una red o malla por superposicion de elementos filamentosos de uno o varios tipos (Figura 14).⁷

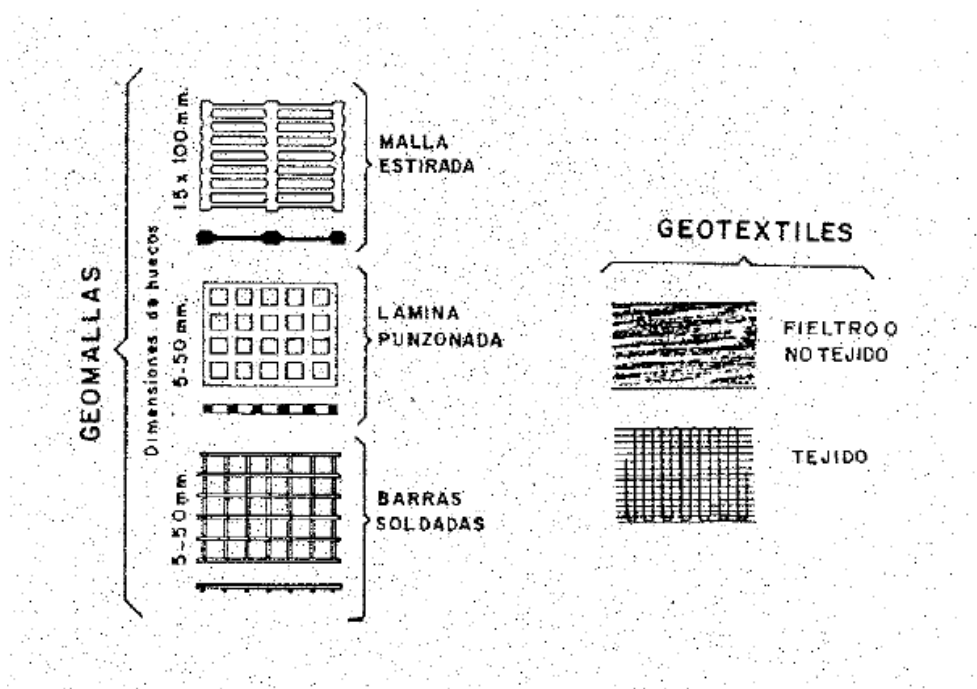


Figura 14

2.3.3.2 Materiales

Se puede distinguir entre las características de los materiales según metálicos y refuerzos no metálicos:

⁷ Jose M^a Rodriguez Ortiz, Jose Antonio Hinojosa Cabrera (1994), Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado.

Refuerzos metálicos:

Típicamente de acero suave. El acero es generalmente galvanizado, se utilizan las tiras de acero con nervaduras, tiras de acero lisas de igual espesor que las tiras nervadas pero más anchas.

Refuerzos no metálicos:

Generalmente, materiales poliméricos y geosintéticos (geomallas, geotextiles)(Figura 15).

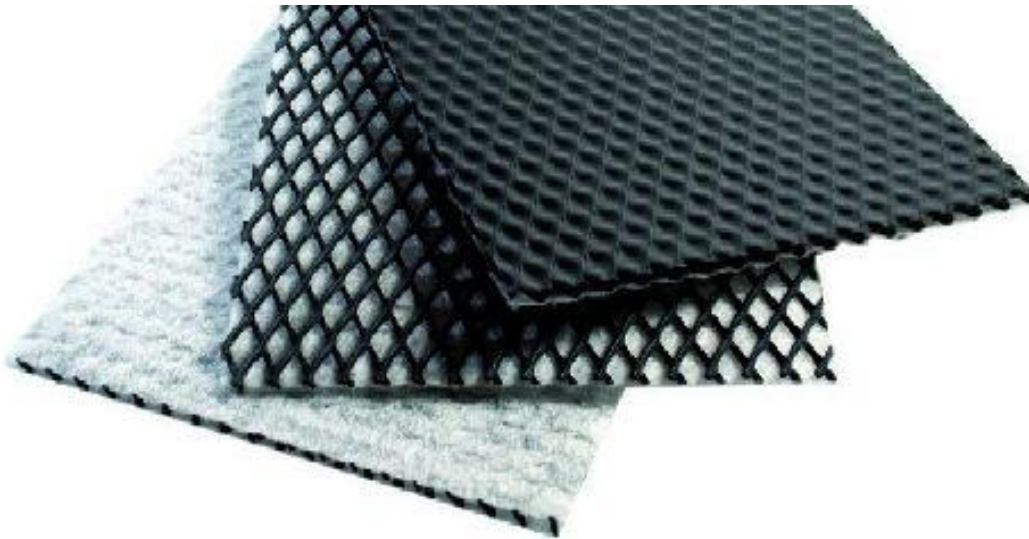


Figura 15

2.3.3.3 Comportamiento del refuerzo

Según la extensibilidad del refuerzo respecto al material de relleno, hay dos clases de extensibilidad en relación con el suelo

Suelo reforzado con fibras inextensibles:

Se consideran dentro de este apartado aquellos casos en los que el terreno se fuerza con elementos muy poco deformables denominados armaduras, generalmente a base de bandas, barras o mallas metálicas.

Suelo reforzado con fibras extensibles:

En contraposición a las fibras poco deformables existen numerosos productos sintéticos, de deformabilidad apreciable que, no obstante, poseen cualidades suficientes para proporcionar una mejora sustancial de las propiedades mecánicas de suelos, sirviéndoles

de refuerzo. Su inferior capacidad resistente viene compensada por un menor coste y, en bastantes casos, por una apuesta en obra sencilla.⁸

Los polimeros sinteticos de uso mas extendido son:

- Poliamidas (PA)
- Poliolefinas
 - Polietileno (PE)
 - Polipropileno (PP)
- Poliester (PES)
- Poliacrilonitrilo (PAC)

2.4 Fricción entre suelo y refuerzo

El rozamiento entre los rellenos y las armaduras de refuerzo es difícil de definir, la tensión actuante sobre las armaduras es difícil de conocer, por eso, debe determinarse mediante ensayos adecuados de tracción. El esfuerzo cortante máximo que podría mobilizarse en la superficie de la armadura, es la tensión vertical media resultante del peso del relleno situado por encima del refuerzo. Los factores principales que influyen en el rozamiento relleno armadura son el peso específico del relleno que según la posición del refuerzo en el muro puede variar, la geometría superficial de las armaduras con resaltes o sin resaltes y la tensión vertical actuante.

El rozamiento interno del terreno ϕ es una característica resistente de cada suelo y influye tanto en la resistencia del contacto suelo-armadura como en el esfuerzo máximo de tracción soportado por la armaduras.

Para un buen aprovechamiento de las armaduras se recomienda que el ángulo de rozamiento interno del relleno ϕ , en el caso de obras en seco, y supuesto que la compactación sea realizada adecuadamente, se debe garantizar un ángulo mínimo de rozamiento interno del relleno de $\phi = 36^\circ$, este valor se ha de tener en cuenta como valor característico mínimo, sea cual fuere el tipo de armadura.

2.4.1 Mecanismos de Transferencia de Estrés

Hay dos conceptos especialmente importantes que se deben tener en cuenta al estudiar la interacción entre suelo y refuerzos, que son la dilatancia que sufre el terreno al sufrir esfuerzos de corte y cuáles son las fuerzas que hacen que el refuerzo resista la fuerza de tracción a la que está expuesta, fricción y resistencia pasiva, explicadas a continuación.

⁸ Jose M^a Rodriguez Ortiz, Jose Antonio Hinojosa Cabrera (1994), Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado.

2.4.1.1 Dilatancia

Al producir deformaciones de corte en un suelo se pueden producir tanto deformaciones volumétricas como deformaciones de corte.

La influencia de la compacidad del terreno en un muro de suelo reforzado es un concepto importante que debemos conocer. Si el relleno se encuentra en estado muy flojo, la interacción entre el suelo y el refuerzo tiene valores muy bajos siendo muy baja la fuerza necesaria para extraer el refuerzo del suelo. En cambio, si el relleno es muy compacto como debe suceder en el caso de obras reales, esta interacción puede tener valores muy superiores, estos resultados se explican por el fenómeno de la dilatancia. Si la compacidad es suficiente, los esfuerzos cortantes que se desarrollan en las inmediaciones de las armaduras tienen tendencia a producir un aumento local del volumen del suelo. Su expansión queda limitada por la poca compresibilidad de las zonas próximas del refuerzo, lo que redundará en un aumento de la tensión normal aplicada sobre la armadura (Figura 16) con el aumento consiguiente del valor de la interacción entre el suelo y el refuerzo.⁹

Una analogía fuera de la mecánica de suelos sería lo que ocurre al deslizar una hilera de rodillos sobre otra hilera de rodillos al estar colocadas de manera que intenten ocupar todos los espacios, al producir un movimiento de corte por debajo de la hilera inferior la hilera superior necesita subir por encima de las generatrices de los rodillos de la hilera inferior para poder desplazarse, la deformación de corte sería en este caso el desplazamiento del centro de la hilera superior respecto al centro de la hilera inferior, hay un aumento de volumen pues la altura total de las dos hileras de cilindros es mayor cuando está pasando un cilindro exactamente por encima del otro que cuando los cilindros superiores se encuentran entre los inferiores. En un suelo pasa algo parecido con los granos. Este proceso se conoce como dilatancia.¹⁰

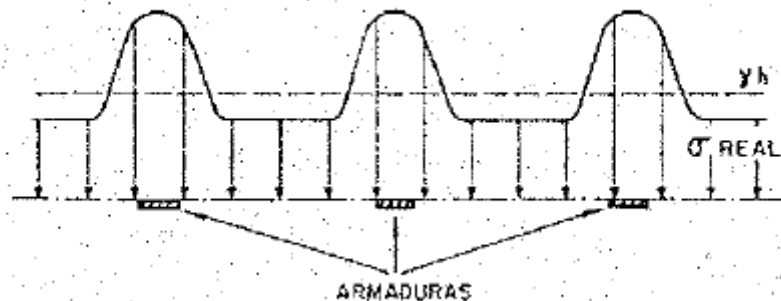


Figura 16.

⁹ Jose M^a Rodríguez Ortiz, Jose Antonio Hinojosa Cabrera (1994), Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado.

¹⁰ Geotecnia – GICO UPC. Tema 7, Resistencia y deformación.

La influencia de la textura de las armaduras en los refuerzos es algo importante para la resistencia del refuerzo a la extracción. Todos los ensayos de tracción efectuados sobre las armaduras tanto lisas como con resaltes han demostrado que las curvas que relacionan la interacción suelo refuerzo con el desplazamiento Δl de la armadura en cabeza tienen el aspecto indicado en la (Figura 17).¹¹

En el caso de una armadura lisa, la curva presenta una resistencia de pico muy marcada para un desplazamiento pequeño, siendo el valor residual aproximadamente la mitad de su valor máximo.

En el caso de una armadura con resaltes, no difieren mucho los valores de pico y residual alcanzándose el máximo para desplazamientos importantes.

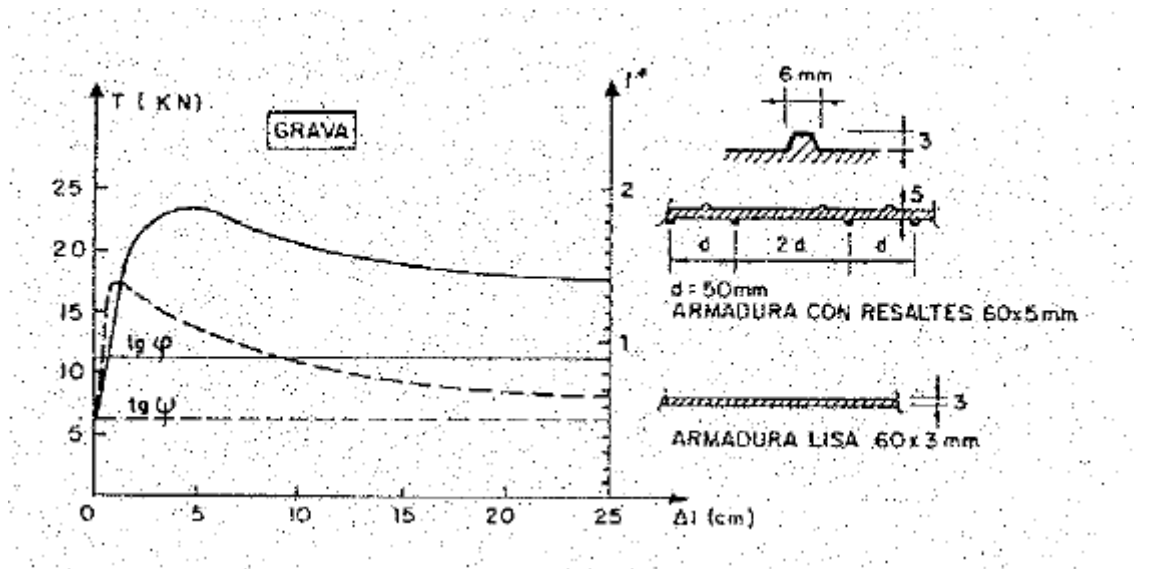


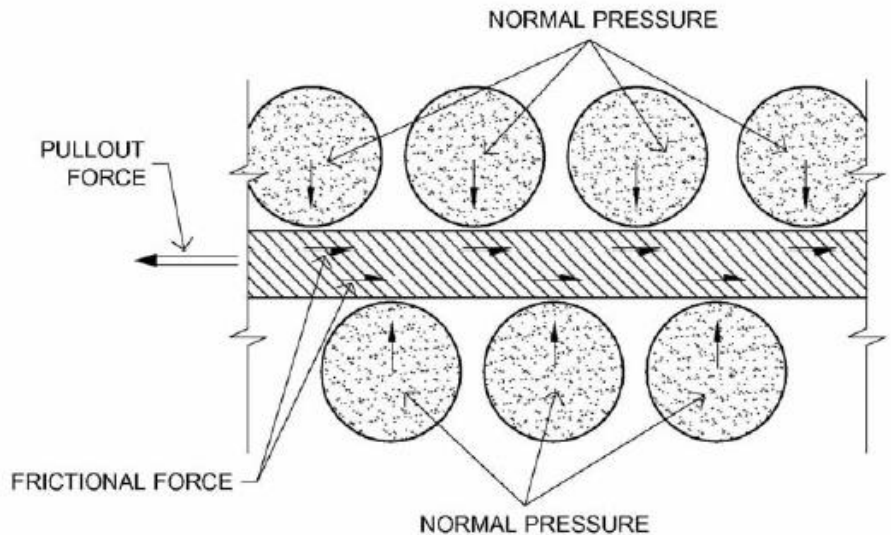
Figura 17.

La resistencia de arrastre del refuerzo se moviliza a través de una combinación de dos mecanismos básicos de interacción suelo-refuerzo, la fricción de la interfaz y la resistencia pasiva contra elementos transversales de refuerzos tales como escaleras de acero o mallas. La contribución de cada mecanismo de transferencia para un refuerzo particular dependerá de la rugosidad de la superficie (fricción de la piel), la tensión efectiva normal, las dimensiones de apertura de la rejilla, el espesor de los miembros transversales y características de alargamiento del refuerzo. Igualmente importantes para el desarrollo de la interacción son las características del suelo, tamaño y distribución del tamaño del grano, forma de la partícula, densidad, contenido de agua, cohesión y rigidez, la presión de confinamiento.

¹¹ Jose M^a Rodríguez Ortiz, Jose Antonio Hinojosa Cabrera (1994), Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado.

2.4.1.2 La fricción

Se desarrolla en lugares donde hay un desplazamiento de corte debido al esfuerzo de corte entre el suelo y la superficie de refuerzo (Figura 18). Los elementos de refuerzo que dependen de esta fricción deben estar alineados con la dirección del movimiento.

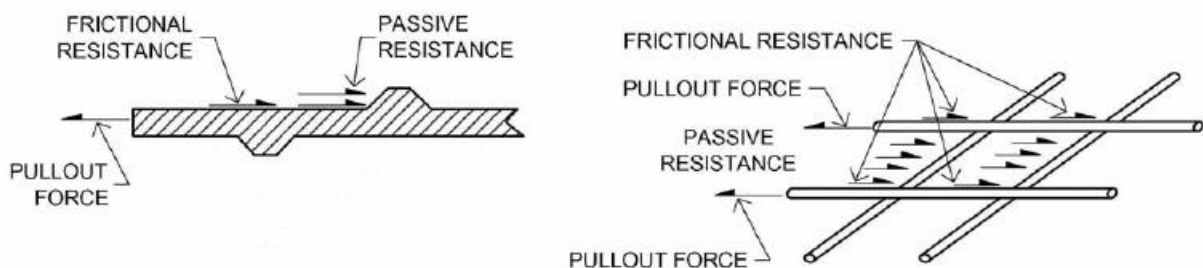


A) Frictional Stress Transfer Between Soil and Reinforcement Surfaces.

Figura 18

2.4.1.3 La resistencia pasiva

Se produce a través del desarrollo de tensiones con superficies de refuerzo normales a la dirección del movimiento del refuerzo del suelo. Refuerzos como las escaleras de acero, o las mallas con nervios transversales a la dirección del movimiento relativamente rígidos proporcionan resistencia pasiva (Figura 19).



B) Soil Passive (Bearing) and Frictional Resistance on Reinforcement Surfaces.

Figura 19

2.4.1.4 Factor de resistencia al arrastre F^*

El factor de resistencia a la extracción F^* sería una forma de dar valor a la resistencia que el refuerzo opone a su extracción, se puede obtener con mayor precisión desde el laboratorio o campo con ensayos de arranque realizados con el relleno específico que se utilizará en el proyecto. F^* puede ser derivada de relaciones empíricas o teóricas desarrolladas para cada refuerzo del suelo, en cualquier caso para cualquier refuerzo, F^* se puede estimar usando la ecuación general:¹²

$$F^* = \text{Resistencia Pasiva} + \text{Resistencia de la fricción.}$$

A continuación se muestra una tabla con diferentes refuerzos y que tipo de resistencia ofrecen a su extracción (Tabla 2):

Tabla 2.

Tipo de refuerzo	Superficie del refuerzo	Tipo de resistencia al arrastre
Tiras inextensibles	Lisas	Friccional
	Con resaltes	Friccional + Pasiva
Tiras extensibles	Lisas	Friccional
Hojas extensibles	Geotextiles	Friccional
Mallas inextensibles	Alfombras con alambres	Friccional + Pasiva
	Alambre soldado	Friccional + Pasiva
Mallas extensibles	Geomallas	Friccional + Pasiva
	Malla de alambre tejido	Friccional + Pasiva

2.5 Pruebas de extracción de refuerzos de un suelo en laboratorio

2.5.1 Principio

Las pruebas de arranque de refuerzos de un suelo en laboratorio, es un método para la determinación de la resistencia de refuerzos a su separación de un suelo, utilizando un cajón de separación de laboratorio, el objetivo es suministrar datos relativos al desarrollo de fricción en materiales utilizados principalmente como refuerzo.

El método de ensayo está destinado a ser una prueba de rendimiento realizada lo más cerca posible de reproducir los esfuerzos en la construcción bajo condiciones de carga. La prueba se realiza mientras a la capa superior del suelo está sometida a tensiones de compresión normales para poder reproducir la altura del refuerzo en el muro, también puede utilizarse para comparar diferentes geosintéticos, tipos de suelo, etc., y por lo tanto, utilizarse como un procedimiento de pruebas de investigación y desarrollo.

¹² U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration Volume I (November 2009), Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes.

En este método, un refuerzo está incrustado entre dos capas de suelo dentro del cajón Figura 6, se aplica una fuerza de extracción a los geosintéticos, y se mide la fuerza necesaria para tirar de los geosintéticos hacia fuera del cajón midiendo el desplazamiento en diferentes punto del refuerzo.

2.5.2 Normativas

Las normativas seguidas en el presente trabajo son las siguientes:

Norma ASTM D6706-01 (Reapproved 2013) Standard test method for measuring geosynthetic pullout resistance in soil.

UNE-EN 13738 2005 Geotextiles y productos relacionados determinación de la resistencia a la separación en suelo.

2.5.3 Componentes del ensayo

Aparato

La caja de extracción de laboratorio (Figura 20), es una caja rígida, que consta de dos lados lisos laterales paralelos, una pared posterior, una puerta delantera extraíble, una placa inferior y una camisa de transferencia de carga superior. La puerta se encuentra en la parte delantera según lo definido por la dirección de la fuerza aplicada de arrancamiento.

La caja debe ser cuadrada o rectangular con unas dimensiones mínimas según normativas mencionadas anteriormente donde se describen restricciones de anchura altura y largo debido al tamaño máximo del árido, espacios desde el refuerzo a los laterales y un largo mínimo debido a la largura del refuerzo.



Figura 20.

Puente de tensado frontal:

El cajón de extracción incluye, el puente de tensado frontal, donde está el gato de tensión horizontal que va acoplado al puente de tensión, al gato de tensión va acoplado el cabezal de sujeción del refuerzo, este cabezal tendrá que ser específico para el tipo de refuerzo que va a ser ensayado, también tendremos que acoplar un transductor de desplazamientos conectado al refuerzo y célula de carga para monitorizar la tensión de extracción (Figura 21).



Figura 21

La caja deberá estar equipada con una funda de metal en la entrada (Figura 21), Front box opening) de la caja por donde se transfiere la fuerza al suelo, a una distancia horizontal suficiente para reducir significativamente el estrés en la puerta de la caja. La funda constará de dos placas finas de no más de 13 mm de grosor. En la parte trasera de la caja tendremos que acoplar un transductor de desplazamientos también (Figura 22).



Figura 22

La fuerza de tensión horizontal:

Debe ser suministrada por un dispositivo con la capacidad de tirar los refuerzos horizontalmente hacia fuera de la caja de extracción. El sistema de retirada debe ser capaz de aplicar la retirada de la fuerza en un ritmo constante de los desplazamientos. Además, deberá estar equipado con un dispositivo para medir la fuerza de retirada tal como una célula de carga (Figura 23).

El método que controla la tasa de estrés (a corto plazo) la condición de carga de la fuerza de extracción aplicada a los refuerzos, se aplica bajo una velocidad uniforme que no supere los 2 mm/min hasta que se logre el fracaso del refuerzo o en su defecto una distancia marcada en las normativas.



Figura 23

Puente de tensado vertical y parte trasera del cajón:

En la parte superior del cajón se emplaza el puente de tensión vertical (Figura 24), acoplado al gato doble de tensión vertical y la placa de carga. Con certificado de calibración, capaz de anticipar tensiones de hasta 100 KPa y capaz de mantener tensión constante durante la prueba, un dispositivo neumático o hidráulico flexible de carga que es continuo en todo el área del cuadro superior debe ser utilizado y capaz de mantener la tensión normal aplicada dentro del 62%. Es necesario acoplar al sistema una célula de carga para monitorizar la presión que transmite el sistema al suelo.



Figura 24

2.5.4 Metodología

Preparación de la caja extracción:

La caja debe de ser llenada con el suelo seleccionado para la prueba en capas debidamente niveladas y compactadas. Para la secuencia de colocación, extender, compactar y nivelar el suelo de relleno. El esfuerzo compactante, el contenido de humedad y el número de capas son función del tipo de suelo utilizado.

Seguidamente y una vez llenado el cajón hasta la mitad, se coloca la probeta de ensayo en paralelo con las paredes laterales la cual necesita estar colocada con unas medidas de acuerdo a la normativa para el ensayo y paralelo a la dirección de tiro.

Posteriormente, se prepara el mecanismo de tracción, los gatos, las bombas y las conexiones necesarias con medidores de desplazamiento, en el caso de tiras poliméricas. Es importante tener en cuenta que las tiras deben estar bien alineadas y se debe evitar cualquier holgura de la tira, hay que asegurarse de que el punto central del eje está alineado a la mitad de la caja de prueba.

Las paredes laterales del cajón deben estar limpias para reducir la transferencia de carga se recomienda lubricante, ya que la fricción lateral puede afectar a los resultados de la prueba. En este punto, se deberá llenar el cajón de arena hasta donde marque la normativa siguiendo la secuencia de colocación, extender, compactar y nivelar el suelo de relleno.

Se deberá aplicar tensión de compresión normal, la tensión normal puede ser proporcionada por medio de un método de diafragma hidráulico o neumático como se ha descrito anteriormente, el esfuerzo normal debe ser aplicado antes de que la prueba se inicie.

Es importante asegurar una completa conexión del sistema de arrancamiento aplicando una ligera carga de asientos con la retirada del dispositivo de fuerza inicial, una vez alcanzada la presión normal deseada, las lecturas del manómetro se pueden asentar a cero y proceder a la ejecución de la prueba de extracción y luego tome las lecturas del manómetro.

Realizados los pasos anteriores, se cargará la pieza tirando a un ritmo constante de desplazamiento, tomando las lecturas de carga y desplazamiento.

Se debe continuar cargando hasta el fallo de los geosintéticos o un desplazamiento predeterminado es alcanzado.

Una vez realizada la prueba se quitará y desmontará el dispositivo. Este será el momento para identificar e inspeccionar el suelo-interfaz de geosintéticos, esto es la comprobación de que la deformación de geosintéticos es uniforme.

Se repetirá el procedimiento tantas veces como sea necesario bajo tensiones de compresión normal diferentes.

3 Modelo

3.1 Introducción

Se ha generado un modelado 3D, con GID Y CODE BRIGHT, a partir de la normativa para los ensayos de resistencia a la separación de un refuerzo de un suelo, ASTM D6706 y UNE-EN 13738, cumpliendo estas normativas, en cuanto a geometría y condiciones de contorno. Seguidamente, se ha analizado la malla y diferentes parámetros del modelo en cuanto a rigidez y resistencia, donde se valorará si es fácil de reproducir el modelo con un ensayo de tracción. Finalmente, se ha calibrado con respecto a unos ensayos aportados para el caso.

3.2 Modelo caso base

3.2.1 Geometría

El dominio donde se resuelve el problema, es una idealización de la geometría real del cajón de ensayo de extracción de refuerzos de un suelo. Por este motivo, al crear el volumen en 3D, creamos tres zonas diferenciadas geométricamente unas de las otras. Las zonas se llaman, SOIL, INTERFASE y REFUERZO, la zona llamada SOIL representa el suelo utilizado en los ensayos de extracción, la zona llamada REFUERZO es una simplificación de todos los posibles refuerzos que se pueden utilizar en muros de suelo reforzado, de esta forma simplificamos la geométrica de la gran cantidad de refuerzos disponibles. Si quisiéramos representar los diferentes refuerzos geométricamente, sería verdaderamente complicado ya que las geometrías de los refuerzos en algunos casos son complejas de representar en un sistema CAD, sistema utilizado por GID para representar los modelos. El volumen entre el REFUERZO y SOIL será la zona llamada INTERFASE, este volumen será una zona de interacción entre el suelo y refuerzo donde realizaremos el análisis de los diferentes parámetros.

Las medidas para el volumen exterior con el nombre SOIL, son de 1250 mm de longitud, 750 mm de alto y 500 mm de ancho (Figura 25). En el interior del volumen SOIL, se crea un volumen interior INTERFASE, con unas medidas de 1050 mm de longitud, 105 mm de alto y 150 mm de ancho (Figura 26). En el interior de la

INTERFASE, se crea un volumen llamado REFUERZO, con unas medidas de 1050 mm de largo, 5 mm de alto y 50 mm de ancho (Figura 27).

Tabla 3.

	Largo (mm) dirección X del eje.	Ancho (mm) dirección Y del eje.	Alto (mm) dirección Z del eje.
SOIL	1250	500	750
INTERFASE	1050	150	105
REFUERZO	1050	50	5

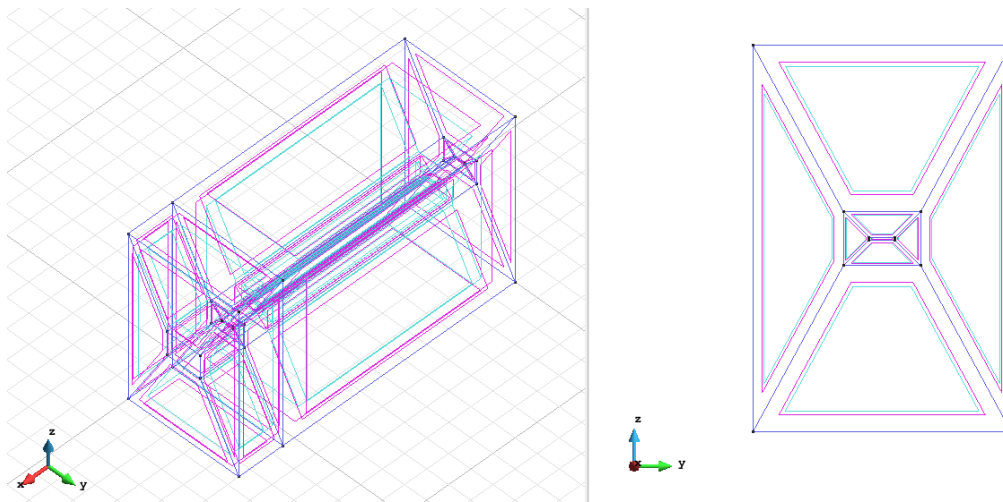


Figura 25. Volumen generado total, SOIL, INTERFASE y REFUERZO, medidas del volumen SOIL, A) Isométrico, B) Plano ZY

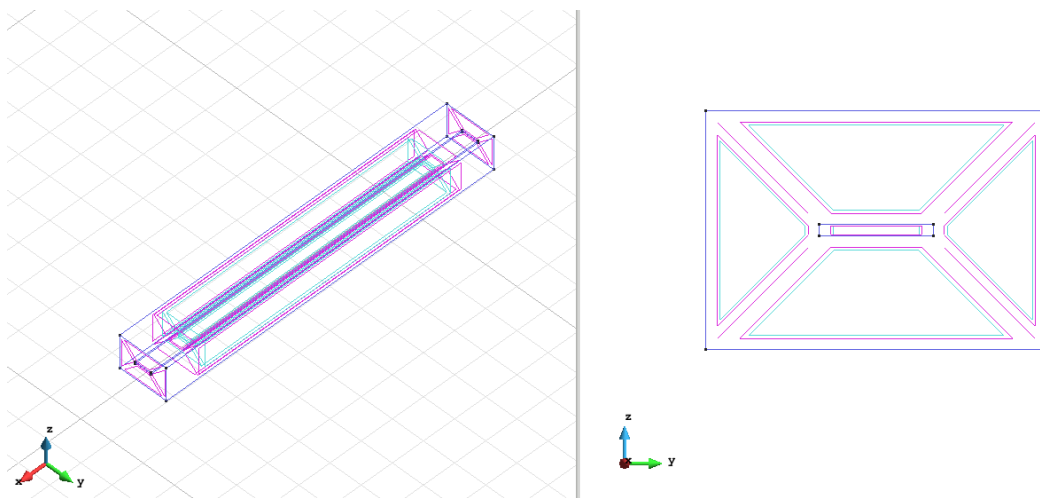


Figura 26. Volumen generado INTERFASE y REFUERZO, medidas del volumen INTERFASE , A) Isométrico, B) Plano ZY

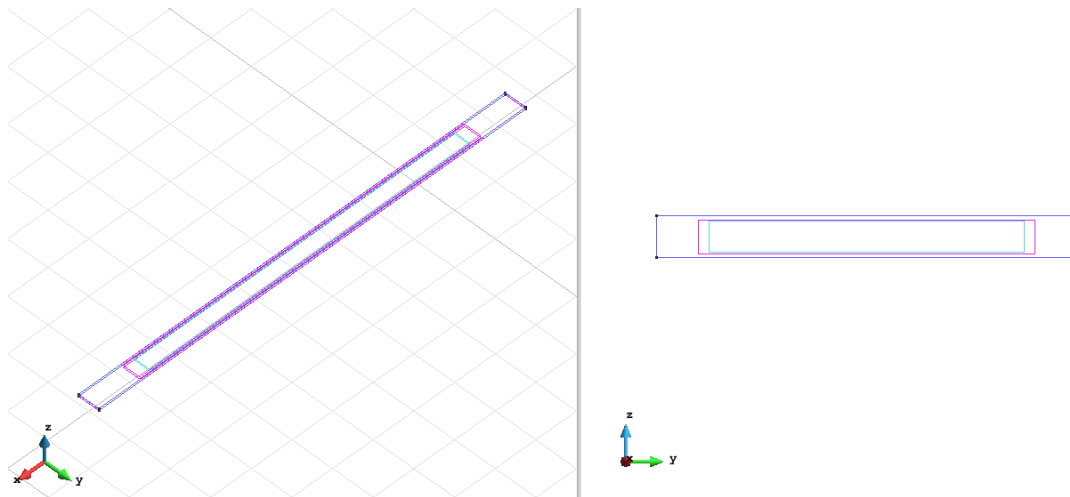


Figura 27. Volumen generado REFUERZO, medidas del volumen REFUERZO, A) Isométrico, B) Plano ZY.

3.2.2 Materiales

El volumen se subdivide en tres partes como hemos mencionado anteriormente, a cada una de las tres partes, tenemos la opción de darle características de los materiales diferentes. Los materiales fueron modelados para representar el comportamiento tensión-deformación de un material a partir de la ley elástica en su primera parte, según esta ley el material se deformaría ilimitadamente si se aumenta la tensión y recuperaría las deformaciones si se produjera una descarga, Sin embargo, el suelo llega a rotura debido a niveles de tensión muy elevados y es necesario implementar el comportamiento de rotura, debido a esto, en su segunda parte se les da a los materiales un comportamiento de la tensión-deformación a partir de una ley elástico-plástica para materiales granulares donde se produce la rotura del material. Esto equivale a que llegados a cierto punto de tensión, la deformación aumenta indefinidamente para la misma tensión.

Los parámetros para modelar la ley elástica en el modelo serán los parámetros de rigidez que son el módulo elástico (E) en unidades de MPa y el coeficiente de Poisson (ν). Con estos dos parámetros serán modeladas las tres partes del volumen SOIL, INTERFASE y REFUERZO, (Tabla 6). En la (Tabla 4) se muestran algunos valores orientativos para el módulo de Young y Coeficiente de Poisson de los suelos, se adoptan valores medios de arena densa.

Tabla 4.

Tipo de suelo	Módulo de Young MPa	Coefficiente de Poisson
Arena suelta	10-24	0.2-0.4
Arena densa media	17-27	0.25-0.4
Arena densa	34-55	0.3-0.45
Arena limosa	10-17	0.2-0.4
Arena y grava	69-172	0.15-0.35

Los parámetros para modelar la ley elástico-plástica en el modelo serán los parámetros de resistencia, que incluyen los parámetros de ángulo de rozamiento interno (ϕ) en grados, cohesión (c) en MPa y ángulo de dilatación (ψ) en grados. Con estos tres parámetros serán modeladas solo dos partes del volumen SOIL y INTERFASE (Tabla 6).

Se adoptan valores del peso específico, ángulo de rozamiento y ángulo de dilatación aportados para el caso de los ensayos de laboratorio, apartado 4 ensayos.

En la (Tabla 5) pueden verse algunos valores referencia para la cohesión de los suelos. Adoptamos un valor muy cercano al cero casi nulo.

Tabla 5.

Tipo de suelo	Cohesión MPa
Arcilla rígida	0.025
Arcilla semirrígida	0.009
Arcilla blanda	0.0009
Arcilla arenosa	0.0050
Limo rígido o duro	0.002

Para el ángulo de dilatación de la zona INTERFASE, se adopta un valor de 0.004 grados debido a que en la gráfica de Fuerza/Desplazamiento figura X, el modelo adopte un valor de dilatación lo más pequeño posible.

Tabla 6. Resumen de los parámetros característicos de los materiales.

Parámetros	Soil	Interfase	Refuerzo
Peso específico (Kg/m ³)	2190	2190	7653
Modulo Young (MPa)	50	50	210000
Coefficiente de Poisson	0.35	0.35	0.35
Angulo rozamiento interno ϕ (grad)	40.2	40.2	
Cohesión c (Mpa)	0.0001	0.0001	
Angulo de dilatación ψ (grad)	10.2	0.004	

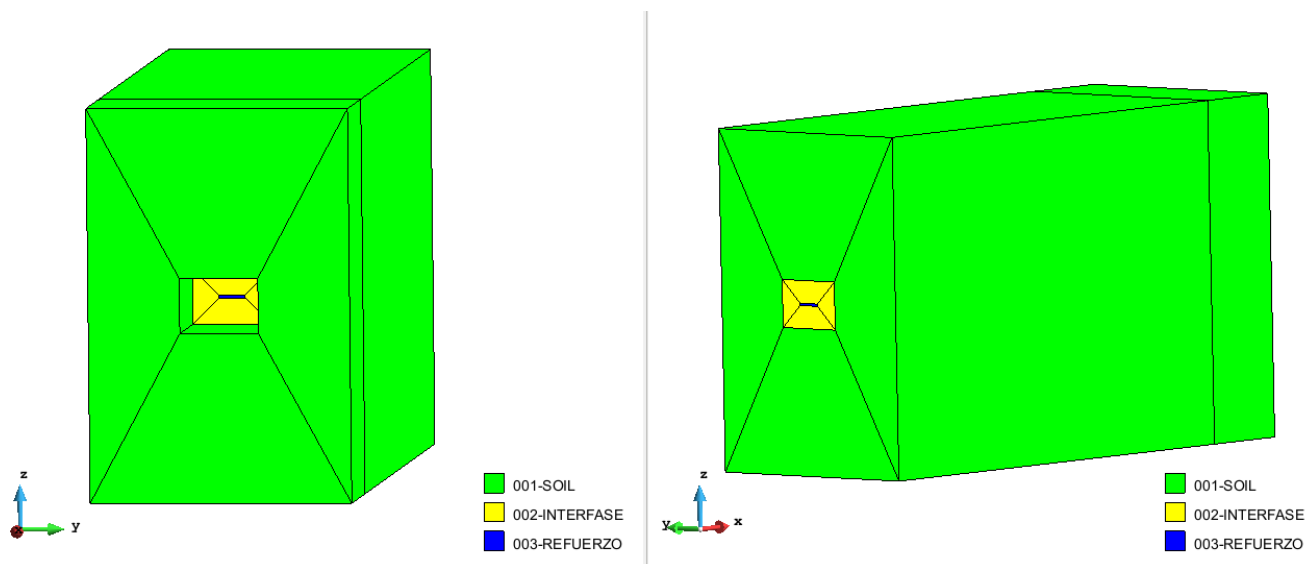


Figura 28. Materiales.

3.2.3 Condiciones de contorno

El problema que queremos reproducir en el modelado en 3D, es el mismo que el de extracción de refuerzos de un suelo con cajón en el laboratorio. Por lo tanto, tendremos que reproducir mediante restricciones de desplazamientos en los materiales creados, las paredes exteriores del cajón de laboratorio y el pequeño volumen delantero del cajón por donde se hará la extracción del refuerzo. Siguiendo las indicaciones de la normativa para ensayos, la parte superior del cajón queda libre debido a que tendremos que aplicar la carga de presión superior al terreno, para poder reproducir una profundidad u otra del refuerzo en el muro de suelo reforzado, seguidamente aplicaremos la fuerza de extracción en el refuerzo,(figura 29).

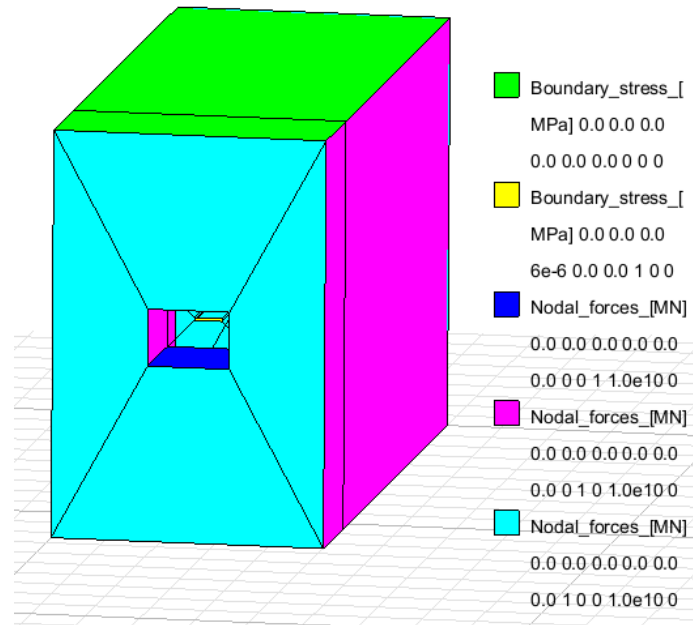


Figura 30. Condiciones de contorno.

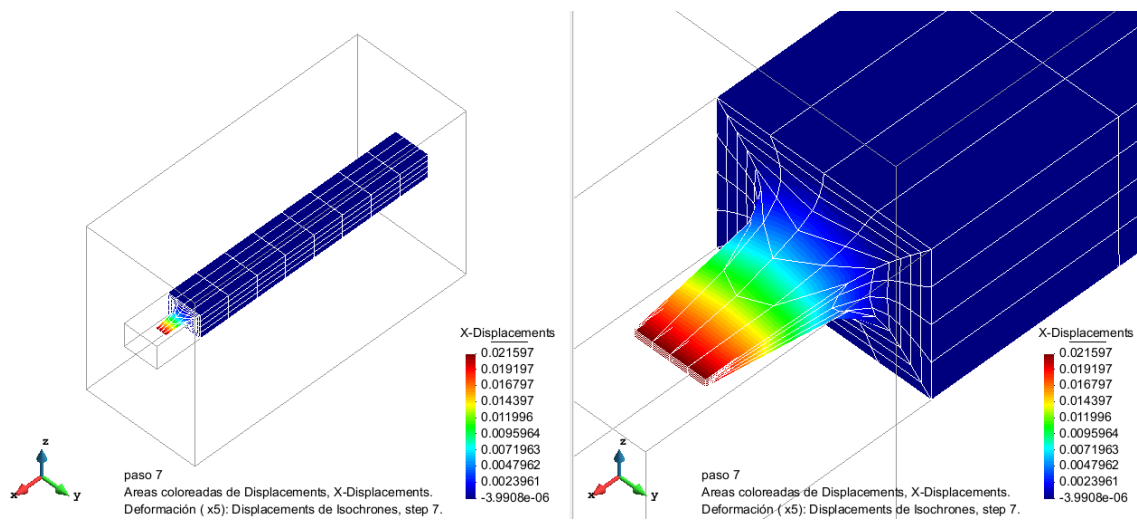


Figura 31. Desplazamiento del refuerzo.

3.2.4 Malla

Se genera una malla para el caso base, con forma de los elementos de tipo hexaedro, donde el resultado después de hacer las divisiones en las aristas del volumen, es de 1505 nodos y 1248 elementos, las divisiones de las aristas del volumen para generar la malla se pueden ver en la (Tabla 7) y (Figura 32).

Tabla 7. Divisiones de las partes de la malla creada para el caso base.

	Numero de divisiones		
	SOIL	INTERFASE	REFUERZO
Longitudinal	10	8	8
Ancho	4	4	4
Alto	4	4	4
Espesor	3	5	-

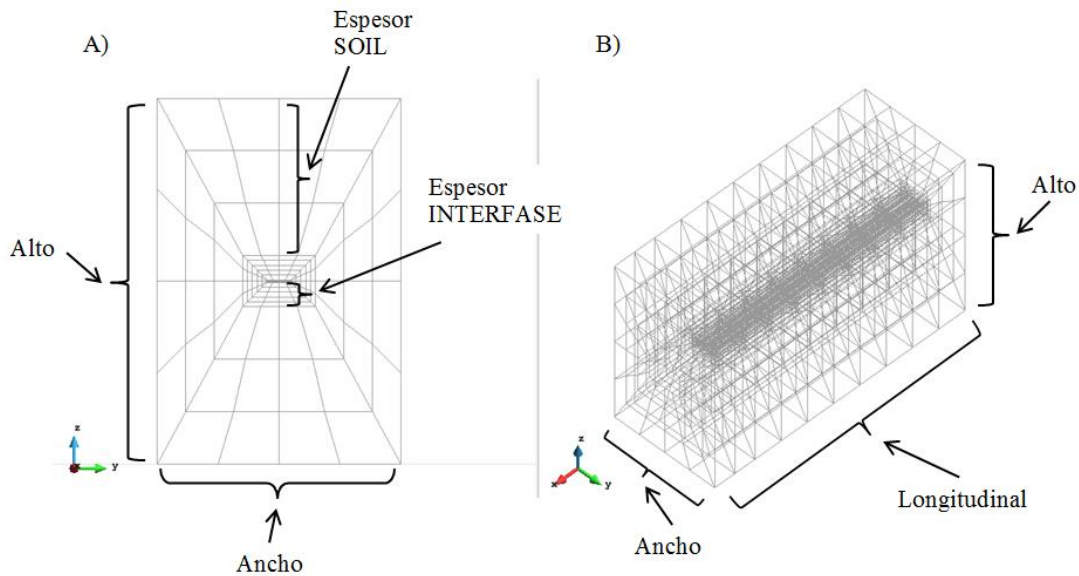


Figura 32. Malla generada para el caso base, indicando distribución para número de elementos, A) plano XY, B) Isométrico.

3.2.5 Resultados caso base

Los primeros resultados del modelado para el caso base se obtienen después de un tiempo de cálculo de 45 minutos, donde generamos una gráfica (Fuerza/Desplazamiento), a partir de la fuerza (KN) necesaria para arrastrar el refuerzo en la dirección positiva del eje X y la evolución en el desplazamiento en la cabeza del refuerzo. El caso generado, arrastra el refuerzo hasta una distancia en su cabeza de 21 mm suficiente para llegar al punto de fallo de los materiales como puede verse en los casos aportados para el caso en el punto 4 ensayos. Podemos observar dos tendencias claras en los datos obtenidos (Figura 34), una primera parte donde se puede observar una tendencia elástica del material y una segunda parte con una tendencia plástica, donde el aumento de la fuerza es mucho inferior al de la primera parte, aunque se conserva un pequeño aumento de la fuerza. Este comportamiento se debe a que existe una dilatación del material (2.4.1 Mecanismos de Transferencia de Estrés), este comportamiento no es muy real, una vez el material falla no se produce el aumento de la fuerza sino que para una misma fuerza el desplazamiento aumenta indefinidamente.

Fuerza/Desplazamiento, Modelo caso base, parametros de la INTERFASE

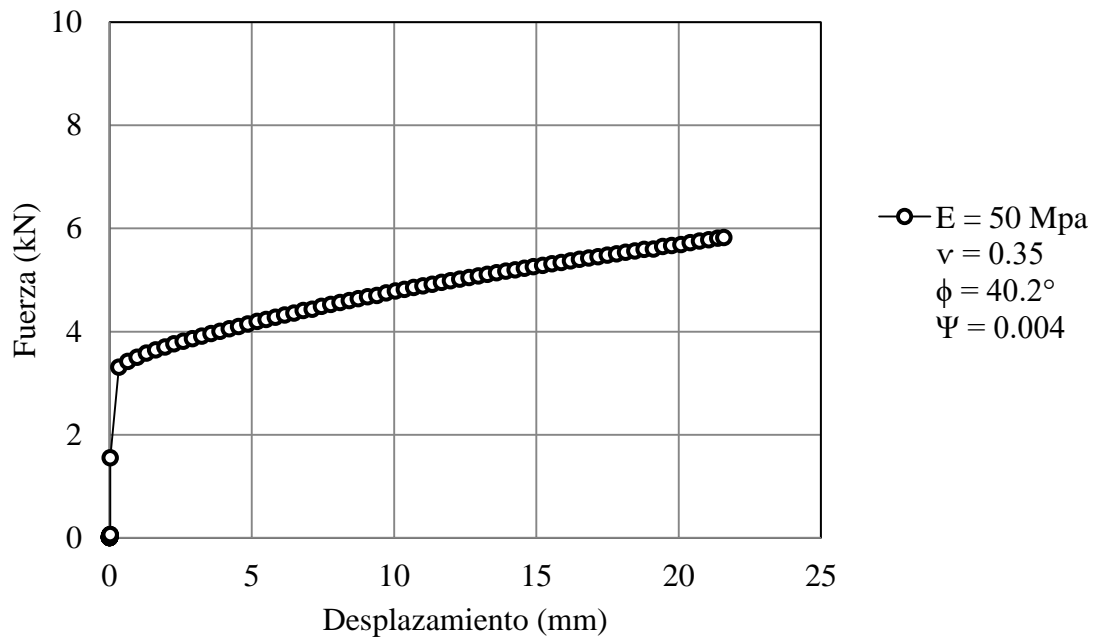


Figura 33. Resultados caso base Fuerza/Desplazamiento.

En el punto 9 anejos, se ha desarrollado un tutorial paso a paso para poder desarrollar el modelo creado de forma sencilla hasta este punto.

3.3 Sensibilidad de la malla

Para realizar la sensibilidad de la malla, se generan diferentes casos con diferentes números de elementos en la zona SOIL y en la zona INTERFASE.

Como se ha mencionado anteriormente, la precisión en los cálculos en el método de los elementos finitos depende de la cantidad de elementos y su tamaño en la malla. Cuantos más elementos tenga la malla y menor sea su tamaño más preciso será sus análisis, el problema que provoca el generar más número de elementos y más pequeños para este caso es el coste computacional en tiempo, tendremos que estudiar si es viable o no generar más o menos elementos para tener un resultado lo más aproximado posible.

3.3.1 Sensibilidad de la malla zona SOIL.

Para analizar la malla en la zona SOIL, se generan 3 casos con diferentes números de elementos en esta zona, conservando siempre el número de elementos en la zona INTERFASE y REFUERZO. En el caso base se divide el espesor en la zona SOIL con 3 elementos (Figura 34), se genera un caso con menos elementos donde, se divide el espesor de la malla en la zona SOIL con 2 elementos y dos casos con mayor número de elementos, uno con 4 divisiones y otro con 5 divisiones en la zona SOIL, ver (Tabla 8).

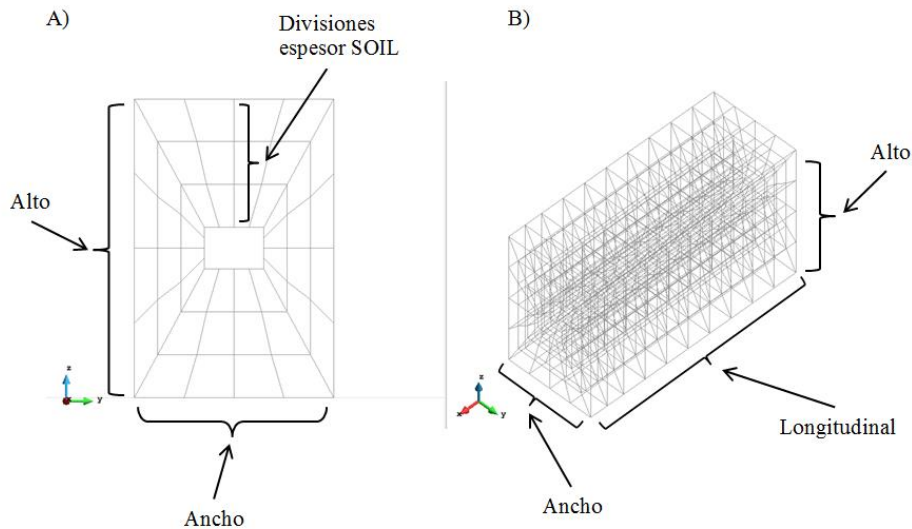


Figura 34. Malla generada zona SOIL caso base, 3 divisiones en el espesor SOIL, A) plano XY, B) Isométrico.

Tabla 8. Divisiones de las partes de la malla creada y casos creados para la sensibilidad de la malla zona SOIL.

	Numero de divisiones			N° Total de elementos	N° Total de nodos	Tiempo total de cálculo (min)
	Refuerzo	Interfase	Soil			
Longitudinal	8	8	10			
Ancho	4	4	4			
Alto	4	4	4			
Espesor	-	5	Caso 2 divisiones	1088	1392	48
			Caso 3 divisiones	1248	1505	45
			Caso Base			
			Caso 4 divisiones	1408	1681	56
			Caso 5 divisiones	1568	1857	58

Para los casos generados para la sensibilidad en la zona SOIL el aumento y la disminución de elementos en esta zona, no provoca ninguna diferencia apreciable en la gráfica de fuerza/desplazamiento, esto quiere decir que el aumento o disminución de elementos en esta zona no provoca ninguna diferencia en los resultados (Figura 35).

Todos los resultados obtenidos son igual de exactos, en este caso al no haber variación en los resultados lo más interesante para el modelo es adoptar un caso en el que el coste computacional sea el más pequeño, caso 3 divisiones en el espesor de la zona SOIL con un coste computacional de 45 minutos, aunque la diferencia del coste computacional tampoco es muy grande (Figura 36).

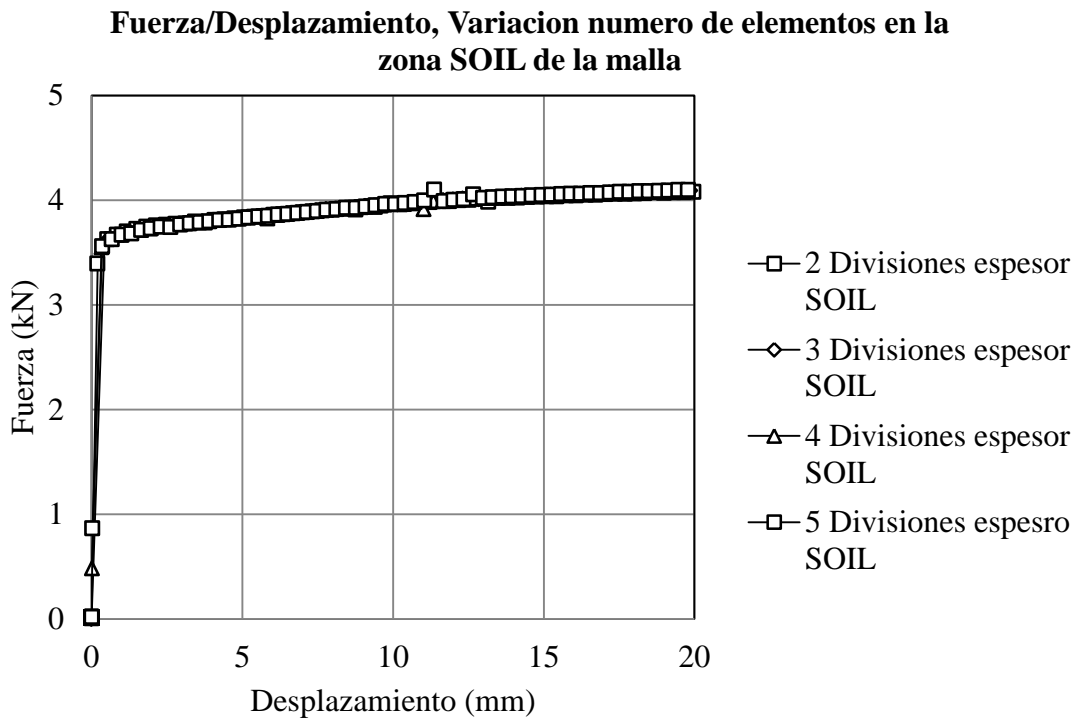


Figura 35. Resultados de la sensibilidad de la malla para diferentes elementos de la zona SOIL.

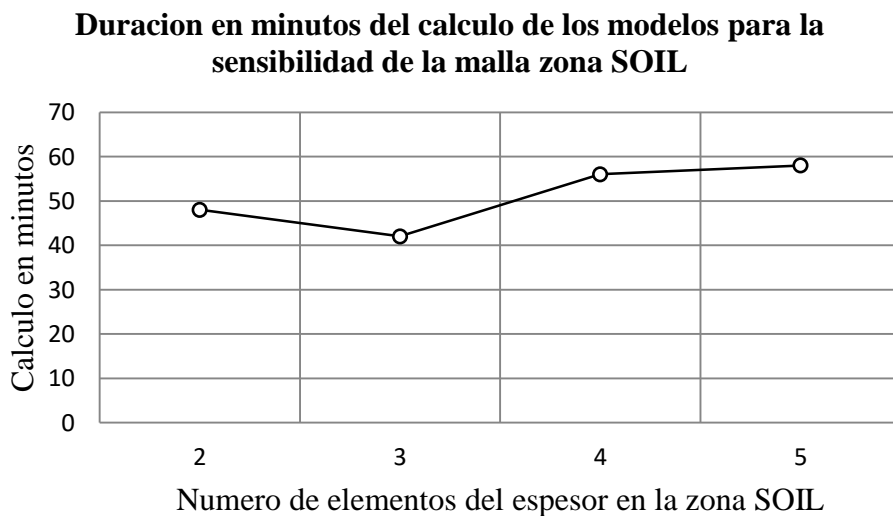


Figura 36. Coste computacional en minutos.

3.3.2 Sensibilidad de la malla zona INTERFASE.

Para analizar la malla en la zona INTERFASE, se generan 3 casos con diferentes números de elementos en esta zona, conservando siempre el número de elementos en la zona SOIL y REFUERZO. En el caso base se divide el espesor en la zona INTERFASE con 5 elementos (Figura 37), se genera un caso con menos elementos, donde se divide el espesor de la malla en la zona SOIL con 3 elementos y dos casos con mayor número de elementos, uno con 7 divisiones y otro con 9 divisiones en la zona SOIL, ver (Tabla 9).

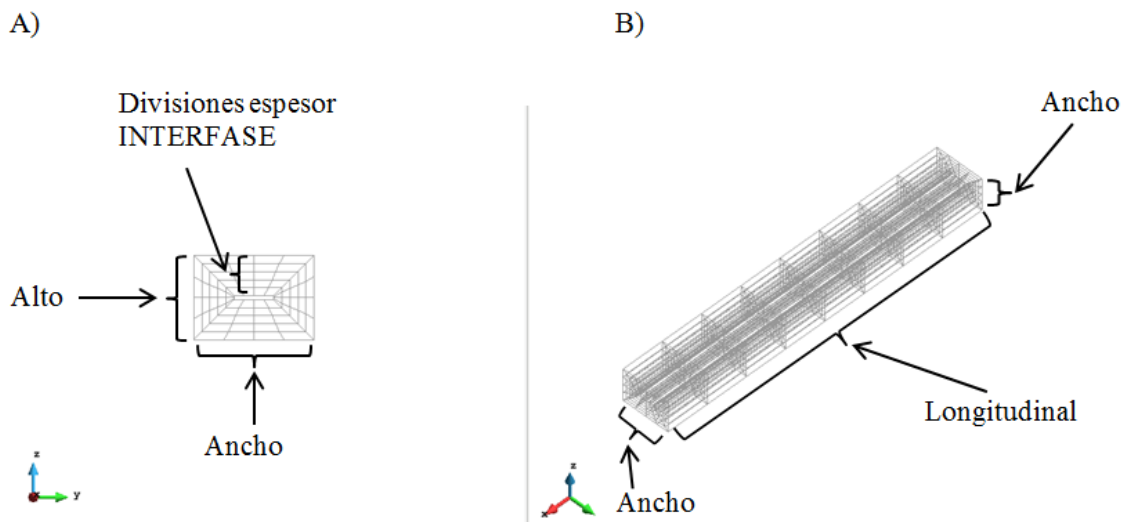


Figura 37. Malla generada para la sensibilidad de la zona INTERFASE caso base, 5 divisiones en la diagonal. A) plano XY, B) Isométrico.

Tabla 9. Medidas del volumen caso base, divisiones de las partes de la malla creada y casos creados para la sensibilidad de la malla zona INTERFASE.

	Numero de divisiones			N° Total de elementos	N° Total de nodos	Tiempo total de cálculo (min)
	Refuerzo	Soil	Interfase			
Longitudinal	8	10	8			
Ancho	4	4	4			
Alto	4	4	4			
Diagonal	-	3	Caso 3 divisiones	992	1217	30
			Caso 5 divisiones	1248	1505	45
			Caso Base			
			Caso 7 divisiones	1504	1793	47
			Caso 9 divisiones	1760	2081	62

En la zona INTERFASE se puede apreciar diferencia en los resultados obtenidos en la gráfica de fuerza/desplazamiento (Figura 38), esto significa que la zona INTERFASE sí que es sensible al aumento o disminución del número de elementos por lo tanto, tendremos unos resultados que serán más exactos que otros. El caso que proporciona los resultados más exactos, es el realizado con 9 elementos en la división del espesor en la INTERFASE ya que proporciona un mayor número de elementos, pero el tiempo de cálculo es superior al caso de 7 elementos en la división del espesor en 15 minutos (Figura 39). El caso con 7 elementos tiene unos resultados en la gráfica de fuerza/desplazamiento muy parecidos al de 9 elementos, por lo tanto, adoptamos el caso con 7 elementos como caso base.

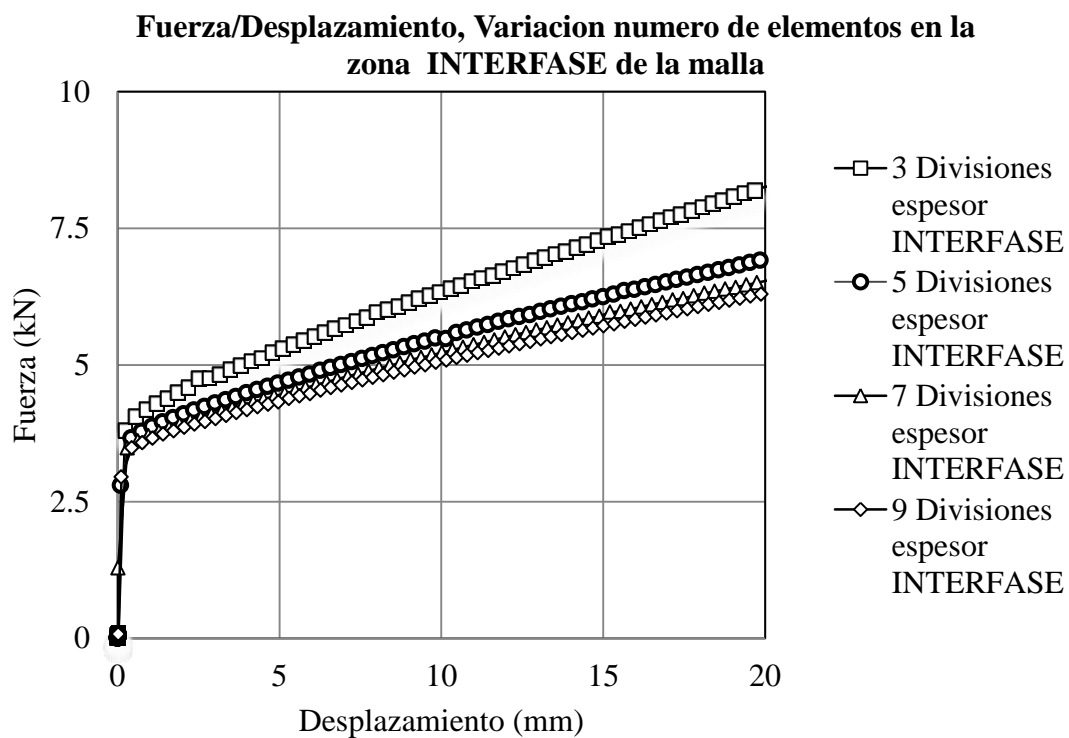


Figura 38. Resultados de la sensibilidad de la malla, para diferentes elementos en el espesor de la zona INTERFASE.

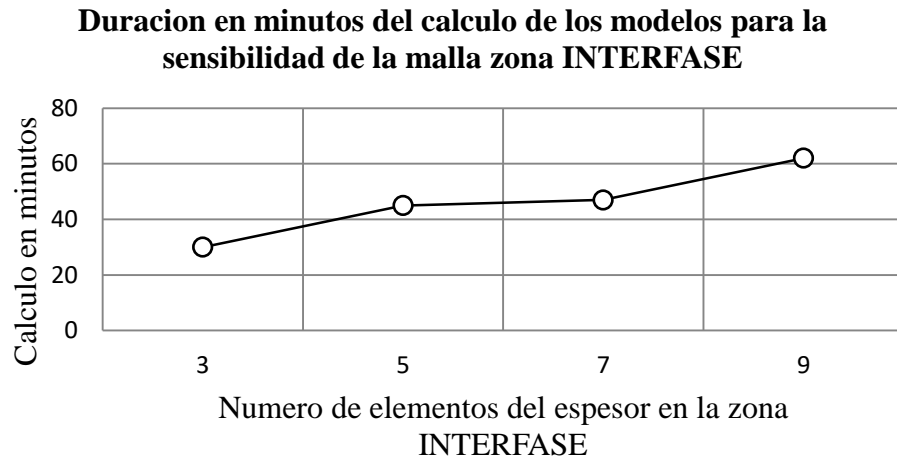


Figura 39. Coste computacional en minutos.

3.4 Sensibilidad de los parámetros relacionados con la rigidez y resistencia de los materiales

Todos los parámetros analizados a continuación son modificaciones del caso base y se realizan en la zona llamada INTERFASE.

3.4.1 Sensibilidad de los parámetros relacionados con la rigidez del suelo.

En ingeniería, la rigidez es considerada como la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material, que contempla la capacidad de un elemento a soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones. Los parámetros que dan forma a esta ley en el modelo son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, en la (Tabla 10), se presentan los valores para estos parámetros en las tres zonas del modelado, en el caso base las zonas SOIL y INTERFASE tienen valores iguales para parámetros de rigidez con unos valores de 50 MPa para el módulo de Young y 0.35 para el coeficiente de Poisson.

Tabla 10. Parámetros caso base, relacionados con la rigidez del suelo.

Parametros	Parametros caso base		
	Soil	Refuerzo	Interfase
Modulo Young (MPa)	50	210000	50
Coficiente de Poisson	0.35	0.35	0.35

3.4.1.1 Variación del módulo de Young (E).

El módulo de Young es un parámetro que caracteriza la rigidez del suelo, se trata de una cantidad proporcional a la rigidez de un material cuando se somete a una tensión externa de tracción o compresión, básicamente es la relación entre la tensión aplicada y la deformación experimentada por el cuerpo cuando el comportamiento es lineal. Se han generado 2 casos, para poder estudiar el comportamiento de la gráfica Fuerza/Desplazamiento, en la zona elástica, los casos generados son de 20 MPa para el caso inferior al caso base y de 100 MPa para el caso superior, (Tabla 11).

Tabla 11. Parámetros caso base, relacionados con la rigidez del suelo, casos creados de la variación módulo de Young en la INTERFASE.

Parametros	Caso base	Parametros sensibilidad zona Interfase	
	Interfase	Caso 1	Caso 2
Modulo Young (MPa)	50	25	100

En la (Figura 40), detalle de la zona elástica del material, se presentan la gráfica Fuerza/Desplazamiento con las variaciones resultantes del módulo de Young de la INTERFASE. Como se puede observar, la variación del módulo de Young tiene una influencia significativa en la parte elástica del material, donde se puede comprobar que para un cuerpo más rígido, donde el módulo de Young es más alto, 100 MP a la fuerza aplicada al refuerzo de extracción tiene que ser mayor a las demás para conseguir el mismo desplazamiento. En la zona plástica del material el modelo tiende a recuperarse de esta diferencia (Figura 41).

Fuerza/Desplazamiento, Variación del Modulo de Young E

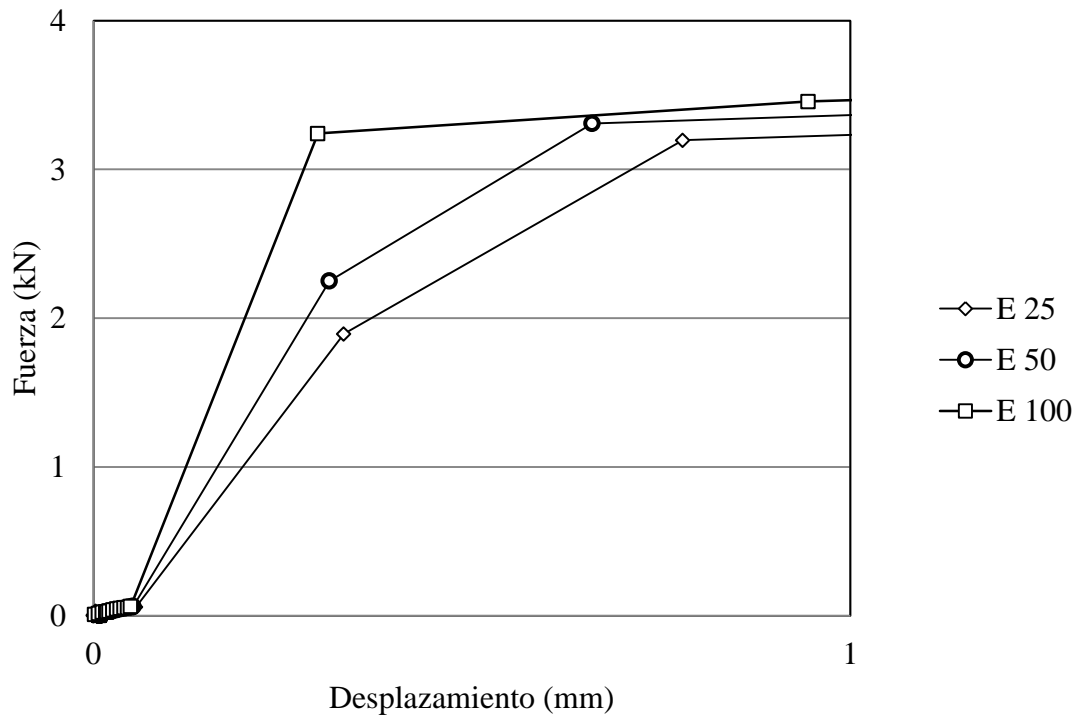


Figura 40. Resultados sensibilidad de los casos creados en la variación del módulo de Young en la zona INTERFASE.

Fuerza/Desplazamiento, Variación del Modulo de Young E

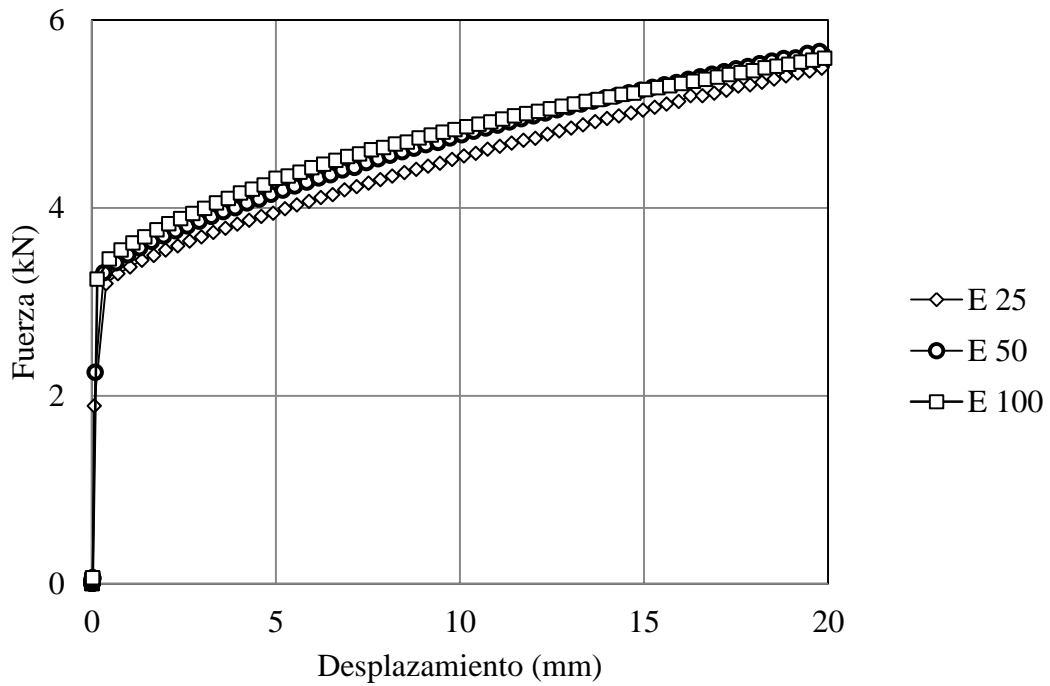


Figura 41. Resultados sensibilidad de los casos creados en la variación del módulo de Young en la zona INTERFASE.

3.4.2 Sensibilidad de los parámetros relacionados con la resistencia del suelo

La resistencia de un suelo es un concepto relacionado con la rotura del mismo. En estado de rotura, el suelo no es capaz de soportar una carga mayor y la deformación progresa indefinidamente aunque la carga no aumenta. Los parámetros analizados seguidamente son parámetros relacionados con la resistencia del terreno, Angulo de rozamiento interno (ϕ), cohesión (c) y ángulo de dilatación del terreno (ψ). En la (Tabla 12) se presentan los valores que adoptan los parámetros de resistencia para el caso base, en el caso.

Tabla 12. Parámetros caso base relacionados con la resistencia del suelo.

Parámetros	Parámetros caso base	
	Soil	Interfase
Angulo rozamiento interno ϕ (grad)	40.2	40.2
Cohesión c (Mpa)	0,0001	0,0001
Angulo de dilatación ψ (grad)	10.2	0.004

Los parámetros ángulo de rozamiento interno y ángulo de dilatación del terreno están relacionados entre ellos por el parámetro reductor de la dilatancia (α) de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{\psi}{\phi}$$

α = Parámetro reductor de la dilatancia

Para realizar la sensibilidad de los parámetros ϕ y ψ , fijamos un valor de cualquiera de los parámetros ϕ , ψ o α y daremos valores al parámetro que queramos valorar, generando valores para el parámetro que resta.

3.4.2.1 Variación del ángulo de rozamiento interno (ϕ)

El ángulo ϕ , es característico de cada superficie. En suelos, el movimiento significa rotura por un plano. En realidad implica que en este plano los desplazamientos relativos de un lado respecto a otro se producen indefinidamente o lo que equivale a que las deformaciones de corte progresen indefinidamente, a este ángulo donde las

deformaciones de corte progresan indefinidamente debido a los esfuerzos tangenciales se le llama ángulo de rozamiento interno.¹³

Para analizar el efecto de la variación de ϕ en la INTERFASE, se generan 3 casos con diferentes valores de ϕ en esta zona. Se genera un caso con menor valor y dos casos con valores superiores de ϕ que el de la INTERFASE (Tabla 13). Como puede observarse en la figura 42, con el aumento de ϕ y manteniendo el parámetro reductor de la dilatación, aumentamos la resistencia del terreno en la zona plástica de la gráfica Fuerza/Desplazamiento, para un mismo desplazamiento del terreno se requiere una fuerza superior para arrastrar el refuerzo. Se observa también que, con el aumento de ϕ a partir de 50° se empieza a observar un comportamiento irregular de la interacción entre el terreno y el refuerzo, produciéndose ondulaciones.

Tabla 13. Parámetros caso base relacionados con la resistencia del terreno y casos creados variando ángulo de rozamiento interno y fijando parámetro reductor de la dilatación.

Parámetros	Parámetros caso base		Parámetros sensibilidad zona Interfase		
	Soil	Interfase	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Angulo rozamiento interno ϕ (grad)	40.2	40.2	20	50	55
Cohesión c (Mpa)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Angulo de dilatación ψ (grad)	10.2	0.004	0.002	0.005	0.0055
Parámetro reductor de la dilatación α	0.25	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

¹³ Geotecnia – GICO UPC. Tema 7, Resistencia y deformación.

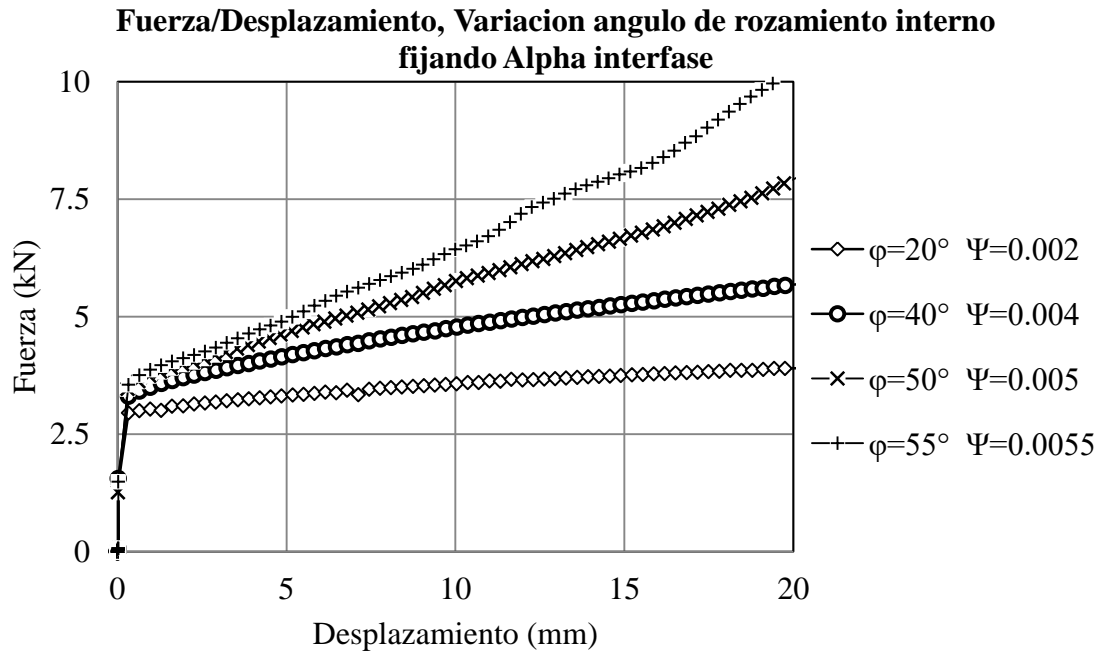


Figura 42. Resultados sensibilidad en la variación de ϕ en la zona INTERFASE.

3.4.2.2 Variación ángulo de dilatación (ψ).

Como se ha mencionado anteriormente (2.5.1.1 Dilatancia), el ángulo ψ , es una propiedad de los materiales utilizada frecuentemente para describir el incremento en volumen de un material granular frente a un esfuerzo de corte. Para analizar el efecto de la variación de ψ en la INTERFASE, se generan 3 casos con diferentes valores de ψ en esta zona, se generan casos con valores superiores de ψ que en la INTERFASE (Tabla 14). Como puede observarse en la (Figura 43) fijando el ϕ y dando valores a la dilatancia se puede observar un aumento significativo de la resistencia del terreno, esto se debe al comportamiento de dilatancia que tiene el terreno debido a los esfuerzos cortantes que se producen entre el refuerzo y el terreno y al confinamiento que tiene el terreno. Para poder modelar un caso en el que se llegue al punto de rotura, es necesario que la dilatancia tenga valores cercanos a cero, de lo contrario el material sigue aumentando los desplazamientos y la fuerza indefinidamente sin llegar a la rotura lejos de los casos reales de ensayos en suelo (Figura 44).

Tabla 14. Parámetros caso base relacionados con la resistencia del terreno y casos creados variando ángulo de dilatación fijando ángulo de rozamiento interno.

Parámetros	Parámetros caso base		Parámetros sensibilidad zona Interfase		
	Soil	Interfase	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Angulo rozamiento interno ϕ (grad)	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2
Cohesión c (Mpa)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Angulo de dilatación ψ (grad)	10.2	0.004	1	5	10.2
Parámetro reductor de la dilatación α	0.25	0.0001	0.02	0.12	0.25

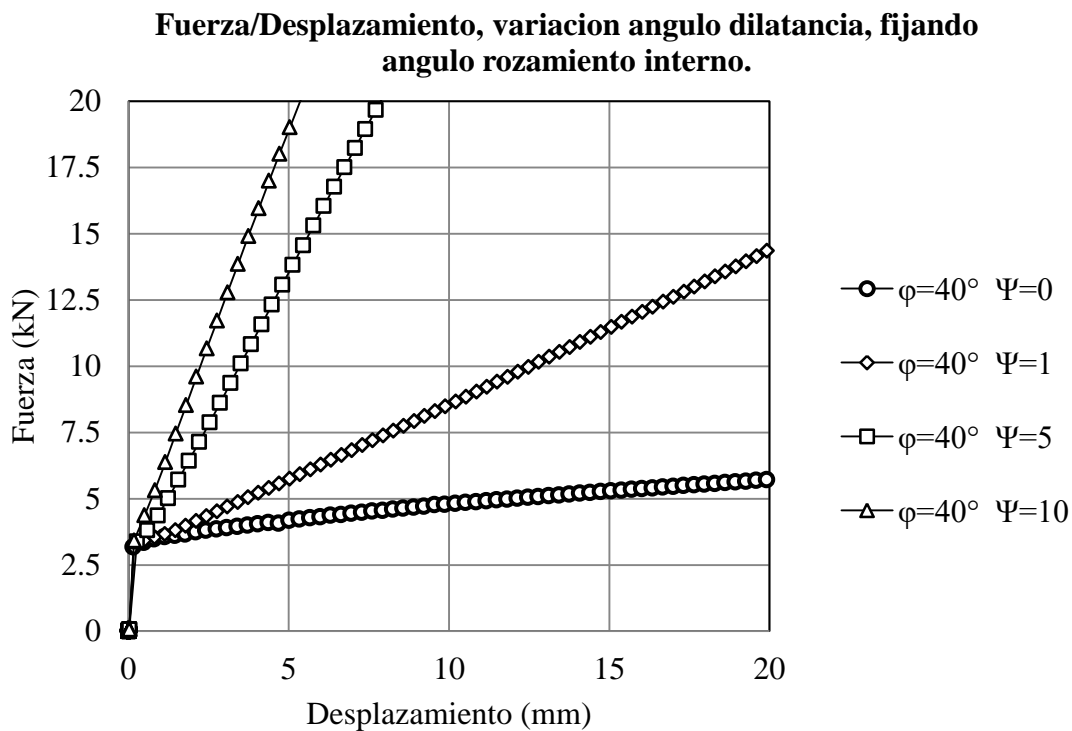


Figura 43. Resultados sensibilidad en la variación ángulo de dilatación fijando ángulo de rozamiento interno del terreno, en la zona INTERFASE.

Fuerza/Desplazamiento, variación ángulo dilatancia, fijando ángulo rozamiento interno.

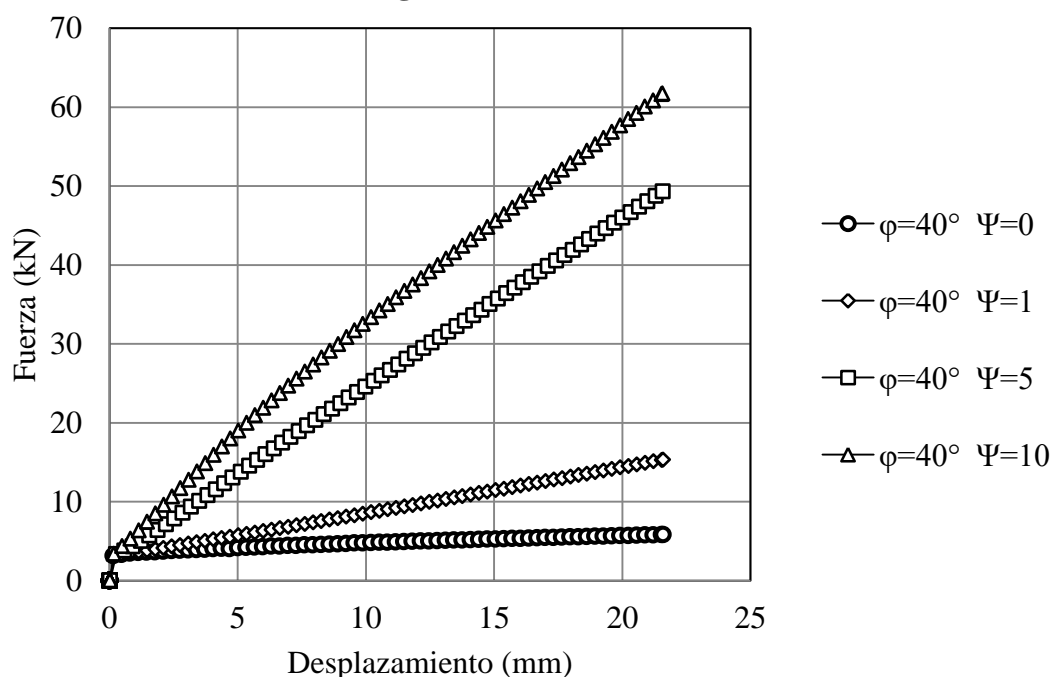


Figura 44. Resultados sensibilidad en la variación ángulo de dilatación fijando ángulo de rozamiento interno del terreno, en la zona INTERFASE.

3.4.2.3 Variación del parámetro de la cohesión (c).

Cuando un suelo en ausencia de fuerzas exteriores, presenta una cierta consistencia se dice que tiene cohesión. Se define como la resistencia que presenta un suelo en ausencia de fuerzas gravitatorias y de fricción. Una forma más intuitiva de definir la cohesión es considerarla como resultado de las fuerzas de interacción entre partículas sólidas. A modo de ejemplo, se puede considerar que la arena de la playa seca no presenta cohesión, dado que al cogerla entre las manos las partículas sólidas se deslizan entre los dedos, por el contrario al coger una porción de terreno arcilloso hay cohesión entre las partículas y la forma de la porción de terreno se mantiene en la mano.

Para analizar el efecto de la variación de la cohesión en la INTERFASE, se generan 3 casos con diferentes valores de cohesión en esta zona, se generan casos con valores superiores al del caso base (0.0001 MPa) (Tabla 15). Como puede observarse en la (Figura 45), con el aumento de la cohesión aumenta considerablemente la fuerza de extracción del terreno para un mismo desplazamiento del refuerzo, de modo que la gráfica sufre un aumento de todos sus puntos por igual.

Tabla 15. Parámetros caso base relacionados con la resistencia del terreno y casos creados variando la cohesión del terreno.

Parámetros	Parámetros caso base		Parámetros sensibilidad zona Interfase		
	Soil	Interfase	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Cohesión c (Mpa)	0.0001	0.0001	0.05	0.025	0.01

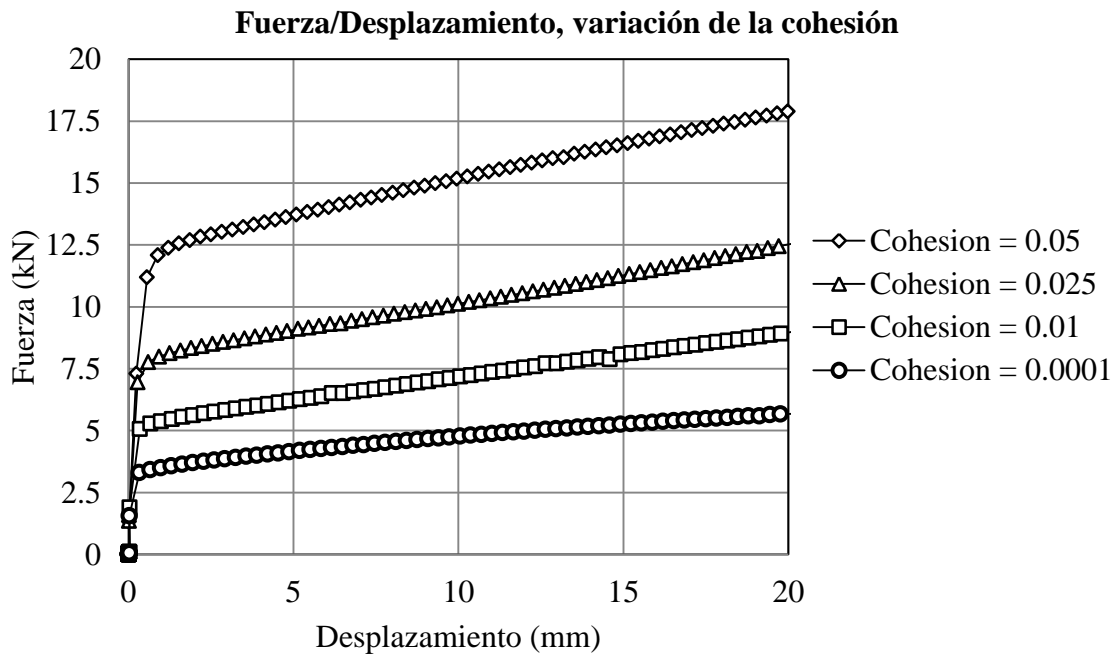


Figura 45. Resultados sensibilidad en la variación de la cohesión, en la zona INTERFASE.

3.4.3 Variación en la carga superior

Para analizar el efecto de la variación de la carga superior del conjunto en la INTERFASE, de forma que se puedan reproducir diferentes profundidades del refuerzo en el muro de suelo reforzado y saber cuál es el comportamiento de la gráfica Fuerza/Desplazamiento, en el caso base la carga aplicada es de 50 KPa, se generan 2 casos con diferentes valores en la carga aplicada al conjunto superiormente. Un caso donde la carga es nula y otro caso donde la carga es de 100 KPa, como puede apreciarse en la (Figura 46). La variación en la carga vertical, produce un efecto parecido al de la dilatancia, donde para más carga vertical aumenta la fuerza necesaria para extraer el refuerzo del suelo.

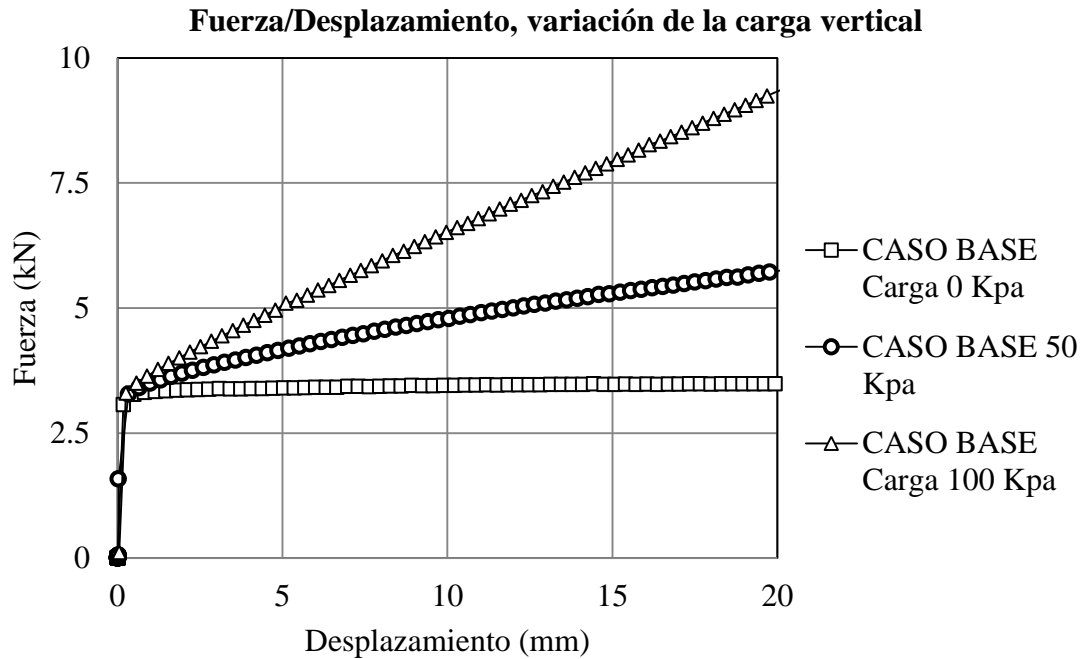


Figura 46. Resultados sensibilidad variando la carga superior.

4 Ensayos

4.1 Materiales y componentes de la prueba

Se aportan para el caso dos ensayos de extracción de refuerzo de un suelo, con el nombre de Gelida, donde se aportan datos en Excel de las características de los materiales utilizados, en concreto del suelo y del refuerzo, y tres hojas de datos donde están los datos del transcurso de los ensayos donde obtenemos los datos sobre el desplazamiento de la cabeza del refuerzo en mm cada 60 segundos y la fuerza necesaria de extracción en ese instante en KN, la extracción se realiza hasta un desplazamiento máximo de 100 mm, donde se observa en la (Figura 47) que los materiales fallan antes, a 14.53 mm se produce el fallo para la carga vertical de 0 KPa y a 18.69 mm se produce el fallo para la carga vertical de 55 KPa.

Para la prueba se utiliza un suelo tipo granular con un peso específico de 21.9 KN/m³, un ángulo de rozamiento interno ϕ de 40 grados, un coeficiente de uniformidad (Cu) de 54.

Las escaleras de acero utilizadas para la prueba, tienen un diámetro de las barras (t) de 8 mm, un espacio entre barras longitudinalmente (b) de 168 mm, un espacio de las barras transversales (st) de 150 mm y una longitud de las barras longitudinales para el ensayo (Le) de 1.05 m.

En primer lugar, se reproduce una profundidad del refuerzo de 0.375 m que es una carga en el refuerzo de 8.21 KPa no aplicamos carga vertical y, en segundo lugar aplicamos una carga de 55 KPa que reproducen una profundidad de 2.88 m.

Como se puede observar en los resultados obtenidos (Figura 47), para la carga vertical de 55 KPa la gráfica no cumple con la tendencia esperada, sobre todo en la primera mitad de la gráfica donde la fuerza para la extracción del refuerzo son inferiores que en el caso de la carga de 0 KPa, por otra parte sí que se puede apreciar en las tendencias de las gráficas que la pendiente en la mitad de las gráficas sí que sufre este efecto parecido a la dilatación al aumentar la carga. Se han generado dos casos con el modelo base con estas dos cargas para ver el comportamiento de las gráficas en un detalle de la zona elástica del modelo (Figura 48), como puede verse a más carga de confinamiento la fuerza necesaria para la extracción es superior, también se ha observado este comportamiento en la zona plástica del modelo, apartado sensibilidad variación de la carga superior (Figura 49), por lo tanto, se entiende que en principio una de las dos tendencias es errónea en su primera parte, en teoría la gráfica de 55 KPa de carga superior tendría que ser superior a la de 0 KPa.

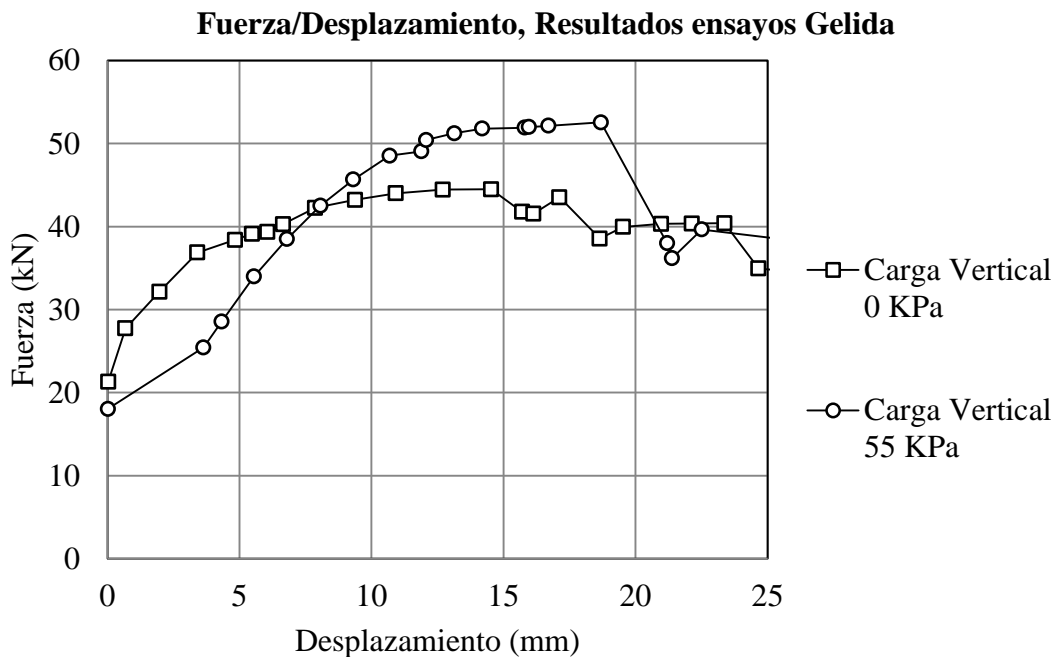


Figura 47. Resultados ensayos Gelida.

Fuerza/Desplazamiento, Modelo caso base carga vertical 0 KPa y carga vertical 55 KPa

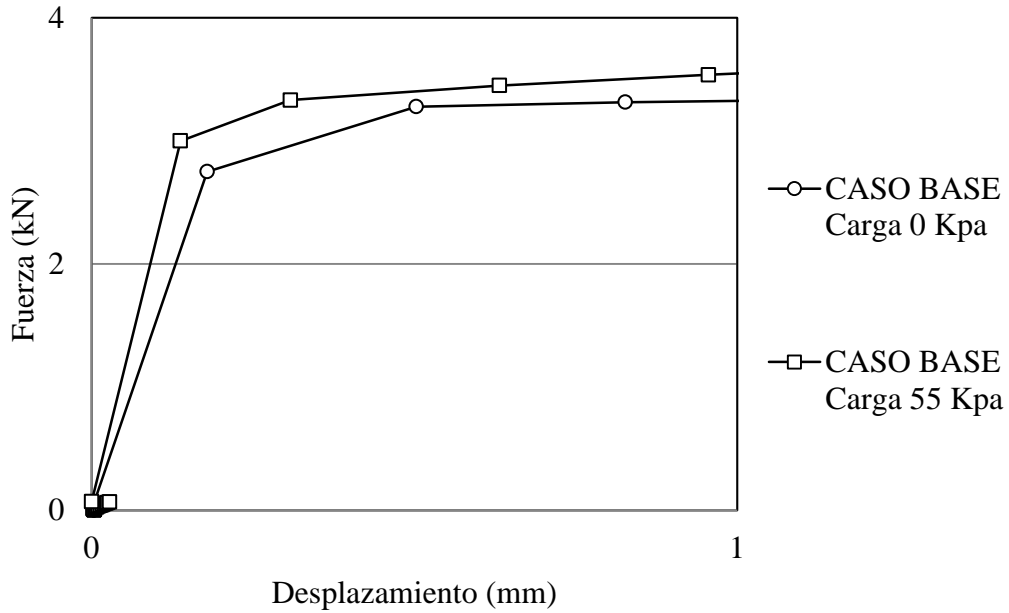


Figura 48

Fuerza/Desplazamiento, Modelo caso base carga vertical 0 KPa y carga vertical 55 KPa

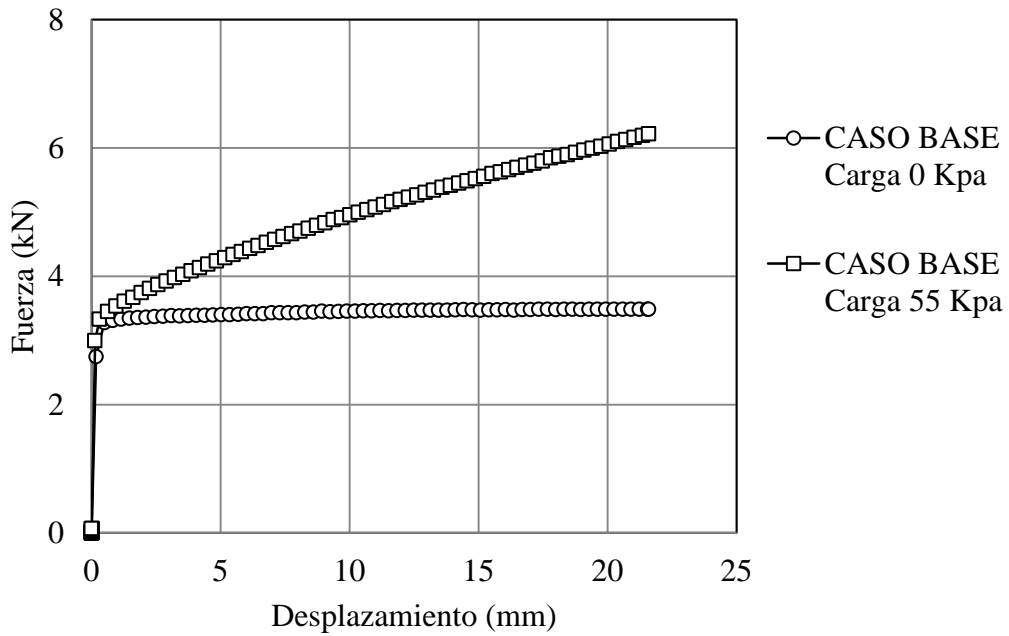


Figura 49

5 Calibración del modelo.

5.1 Comparación de resultados modelo caso base y ensayos Gelida

Como puede verse en las (Figuras 50 y 51), las fuerzas de extracción del modelo caso base generado con las cargas superiores de 0 KPa y 55 KPa, se quedan muy por debajo de las fuerzas de extracción de los casos de Gelida, esto puede ser debido a la simplificación del refuerzo en el modelo generado, ya que es un refuerzo plano en toda su longitud, como se ha explicado anteriormente en el apartado 2.5.1.2, fricción y resistencia pasiva, el factor de resistencia a la extracción F^* sería igual a la suma de Resistencia Pasiva + Resistencia de la fricción, donde en nuestro modelo al ser un refuerzo plano carece de resistencia pasiva provocada por los elementos transversales de los refuerzos.

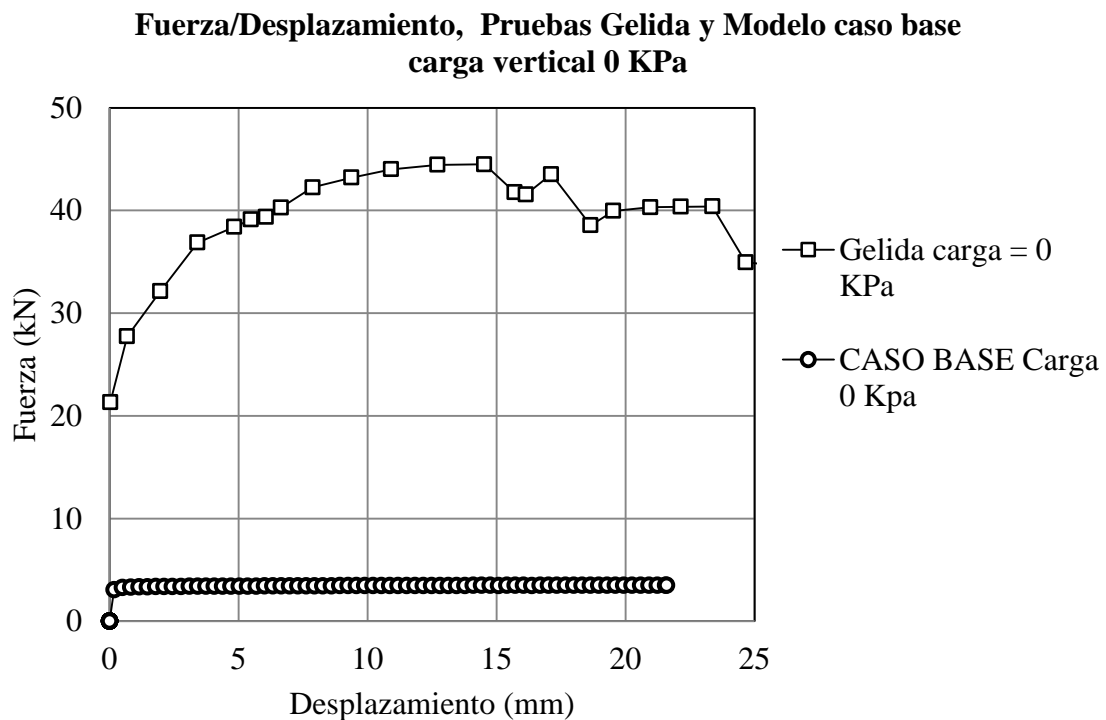


Figura 50

Fuerza/Desplazamiento, Pruebas Gelida y Modelo caso base carga vertical 55 KPa

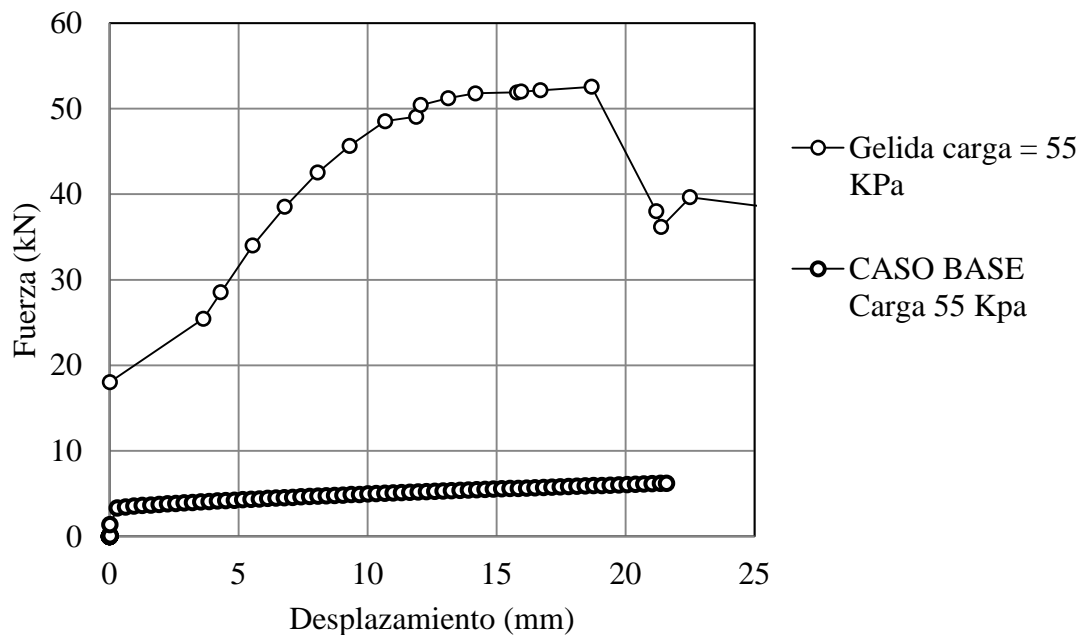


Figura 51

5.2 Calibración del modelo caso base con ensayos Gelida.

Para la calibración del modelo caso base con los ensayos de Gelida, necesitamos aportar un aumento de resistencia a la INTERFASE de nuestro modelo. Debido a la falta de resistencia a la extracción, la tendremos que aportar a partir de parámetros resistentes del modelo, ya sea ángulo de rozamiento interno, cohesión o ángulo de dilatación, como se ha visto en el apartado (3.4.2 sensibilidad de los parámetros relacionados con la resistencia del suelo), el parámetro que es capaz de subir la resistencia de la INTERFASE sin desarrollar un comportamiento de dilatación es la cohesión la cual aporta una resistencia superior al subir su valor.

En primer lugar, se ha generado un modelo donde, con carga superior de 0 KPa y con parámetros resistentes de la zona SOIL y Zona INTERFASE como se muestra en la (Tabla 16), se ha aumentado el valor de la cohesión a 0.3 MPa un valor muy superior al de los suelos granulares. Como referencia, tendríamos que la arcilla rígida tiene una cohesión de 0.025 MPa, con el aumento de la cohesión el modelo parece adaptarse bastante bien a los datos de los ensayos (Figura 52). Cabe señalar que los datos aportados del ensayo con carga 0 KPa en su inicio ya empieza con una fuerza de arrastre de 21 KN en comparación con nuestro modelo que empieza de una fuerza de 0 KN, en esta primera parte de las gráficas es lógico que los modelos no se adapten correctamente, en la parte media de los desplazamientos hay una ligera variación de las gráficas debido a que el ensayo de gélida sufre una pequeña pérdida de resistencia que luego recupera y se vuelve a acoplar con el modelo.

Tabla 16.

Parametros	Parametros caso base	
	Soil	Interfase
Angulo rozamiento interno ϕ (grad)	40.2	40.2
Cohesión c (Mpa)	0.0001	0.3
Angulo de dilatación ψ (grad)	10.2	0.004

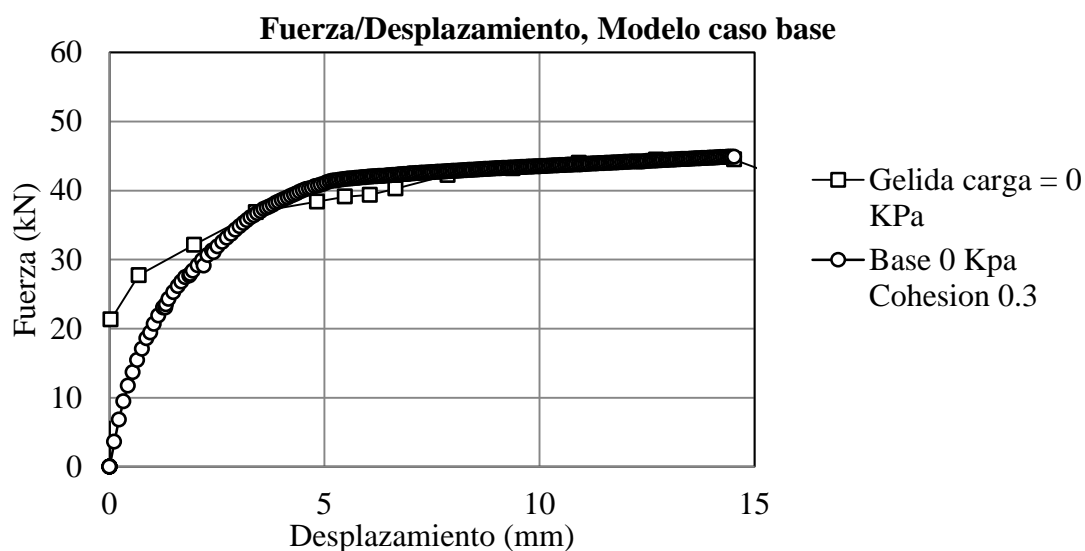


Figura 52

En segundo lugar, se ha generado un modelo donde con carga superior de 55KPa y con parámetros resistentes de la zona SOIL y Zona INTERFASE como se muestra en la (Tabla 17), se ha aumentado el valor de la cohesión a 0.2MPa un valor muy superior al de los suelos granulares. Con el aumento de la cohesión y la carga superior, el modelo aumenta la resistencia al arrastre inicial como puede verse en la (Figura 53), los datos aportados del ensayo con carga 55KPa en su inicio ya empieza con una fuerza de arrastre de 19 KN ligeramente inferior al ensayo de carga 0 KPa este dato y sabiendo que la carga superior es más grande no es lógico ya que la carga de arrastre tendría que ser superior, el modelo y el ensayo no concuerdan en ningún momento en la primera mitad del ensayo, en la segunda parte del ensayo de gélida la curva se estabiliza y parece seguir una misma tendencia que podemos adaptar con nuestro modelo.

Tabla 17

Parametros	Parametros caso base	
	Soil	Interfase
Angulo rozamiento interno ϕ (grad)	40.2	40.2
Cohesión c (Mpa)	0.0001	0.2
Angulo de dilatación ψ (grad)	10.2	0.004

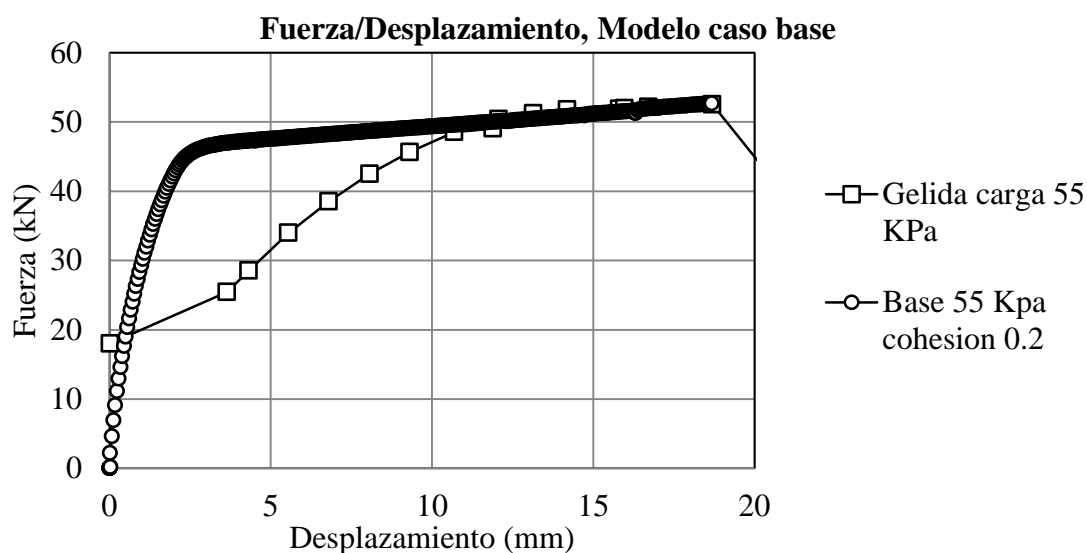


Figura 53.

6 Futuros trabajos.

Sería interesante hacer unos ensayos con diferentes refuerzos y diferentes condiciones de contorno, donde tengamos unos datos suficientemente amplios como para hacer una buena calibración y saber que el modelo es totalmente fiable.

En concreto sería necesario realizar ensayos con tiras de acero inextensible y escaleras de acero, suficientes pruebas como para tener resultados fiables con unas tendencias adecuadas y sin zonas de caída de tensión, ver cuál es la diferencia real de fuerza de extracción entre ensayos con refuerzos con y sin resaltes.

En cuanto a las características de rigidez y de resistencia del suelo, deberíamos hacer ensayos con diferentes suelos con características de rigidez y resistencia del terreno

diferentes y asegurarnos de tener todas las características del terreno definidas para poder hacer una adecuada calibración del modelo lo más ajustada posible.

Una vez tengamos datos adecuados de ensayos, hacer una adecuada calibración del modelo para ajustarlo lo más posible a la realidad.

7 Conclusión.

En primer lugar el estudio de los tipos de muros de suelo reforzado y que elementos lo forman nos ha permitido conocer a qué tipo de condiciones de contorno está sometido el muro y que tipo de esfuerzos se desarrollan en la interacción de sus elementos, seguidamente el conocimiento de la normativa para ensayos de extracción y su metodología nos ha dado la base para desarrollar el modelado numérico 3D del problema. Una vez modelado y valorado cual era la malla más idónea para el desarrollo de la simulación, con el caso base hemos podido conocer el comportamiento del modelo variando características en cuanto a rigidez y resistencia de la interfase, comprobando que el modelo se comporta de manera adecuada. Siguiendo con la metodología del trabajo se ha realizado una calibración del modelo con ensayos reales de extracción y se han descrito futuros trabajos para ampliar y seguir con el estudio de la modelización del ensayo de extracción de refuerzos de suelos. Por último, este TFG también puede llegar a servir como guía de usuario ya que en el anejo 9 se ha escrito un tutorial paso a paso para generar un modelo 3D, para todo aquel que quiera iniciarse con GID junto CODE BRIGHT.

8 Referencias bibliográficas.

- Rodríguez Ortiz, J. y Hinojosa Cabrera, J. (1994), Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration Volume I (November 2009), Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes
- Norma ASTM D6706-01 (Reapproved 2013) Standard test method for measuring geosynthetic pullout resistance in soil.
- UNE-EN 13738 2005 Geotextiles y productos relacionados determinación de la resistencia a la separación en suelo.
- CODE_BRIGHT USER'S GUIDE (February 2016) Departamento de Ingeniería Geotécnica y Geo-Ciencias de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
- Geotecnia – GICO UPC. Tema 2, Estructura y propiedades de los suelos, identificación y clasificación.
- Geotecnia – GICO UPC. Tema 7, Resistencia y deformación.
- Ingeniería Geotécnica – GICO UPC. Tema 11, Métodos numéricos en Geotecnia
- TUTORIAL I: zapata circular superficial ASIGNATURA: Ingeniería Geotécnica Ingeniería de la construcción Universidad Politécnica de Cataluña Escola de Camins
- TUTORIAL II: zapata corrida ASIGNATURA: Ingeniería Geotécnica Ingeniería de la construcción Universidad Politécnica de Cataluña Escola de Camins
- TUTORIAL III: construcción de una pantalla ASIGNATURA: Ingeniería Geotécnica Ingeniería de la construcción Universidad Politécnica de Cataluña Escola de Camins

9 Anejos

9.1 Tutorial

MODELO:

1. CONFIGURACIÓN E INSTALACIÓN DEL PROGRAMA:

GiD ha sido desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería (CIMNE) (www.cimne.com), un centro de investigación con sede en Barcelona (España).

Para su instalación, descargamos el programa en la página de [www.gidhome](http://www.gidhome.com) en el apartado de descargas, seleccionando la versión que nos interese:

En nuestro caso descargamos la versión GID13.0.2 para Windows 64 bits en el siguiente enlace:

<http://www.gidhome.com/download/official-versions/win64/>

Guardamos la descarga en la ruta que se indica a continuación e instalamos:

Equipo / Disco local (C:) / Archivos de programa

Una vez hemos descargado e instalado GID, necesitamos cargar el software que nos permitirá trabajar con nuestro problema en particular, se trata de un problema mecánico en un medio geológico, donde nuestras incógnitas principales serán los desplazamientos y tensiones.

CODE_BRIGHT ha sido desarrollado, en el Departamento de Ingeniería Geotécnica y Geo-Ciencias de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

Para su instalación, descargamos el programa en la página del departamento de ingeniería del terreno, cartografía y geofísica de la universidad politécnica de Cataluña.

En nuestro caso descargamos la versión Code_bright_v6.3Compilado para procesadores de 64 bits, en el siguiente enlace:

https://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code_bright/downloads

Una vez descargada la información de CODE_BRIGHT, necesitamos introducirla en GID para que el programa la reconozca.

Introducimos la carpeta CODE_BRIGHT descargada, dentro de la carpeta de GID que hemos guardado en archivos de programa anteriormente, en el apartado de problemtypes. En nuestro caso seguimos la siguiente ruta.

Equipo / Disco local (C:) / Archivos de programa / GID / GID 13.0.1 / Problemtypes

Una vez hallamos guardado la carpeta de CODE_BRIGHT en el apartado de problem types, ya disponemos de la opción, en la interfaz de GID para importar la información necesaria para realizar la simulación.

SELECCIONAR EL TIPO DE PROBLEMA:

Esta opción permite seleccionar entre todos los tipos de problemas disponibles de los cuales dispone GID.

Podemos importar toda la información de CODE_BRIGHT con el siguiente comando:

Datos / Tipo de problema / Code_bright_v6_3, (figura 1).

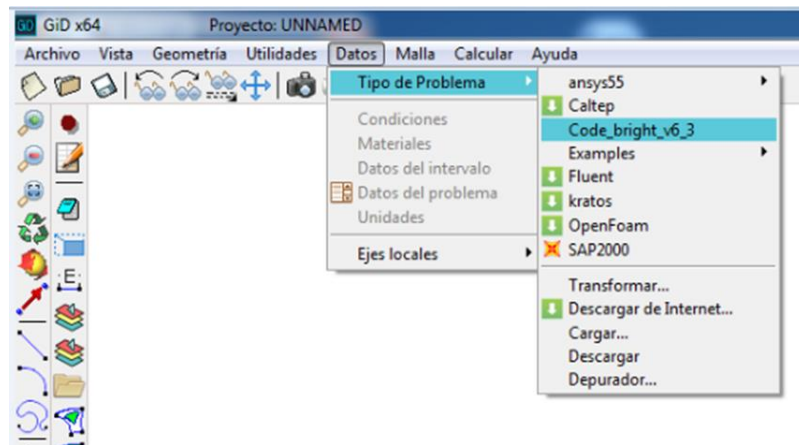


Figura 1.

Una vez *Code_bright_v6_3* ha sido seleccionado como la interfaz actual, todos los parámetros necesarios para realizar el análisis están disponibles en el desplegable de “*Datos*” ubicado en el menú (figura 2).

DESPLEGABLE DATOS

Los datos del problema incluyen todos los parámetros, condiciones, propiedades de los materiales, datos del problema y datos de intervalos que definen el problema mecánico.

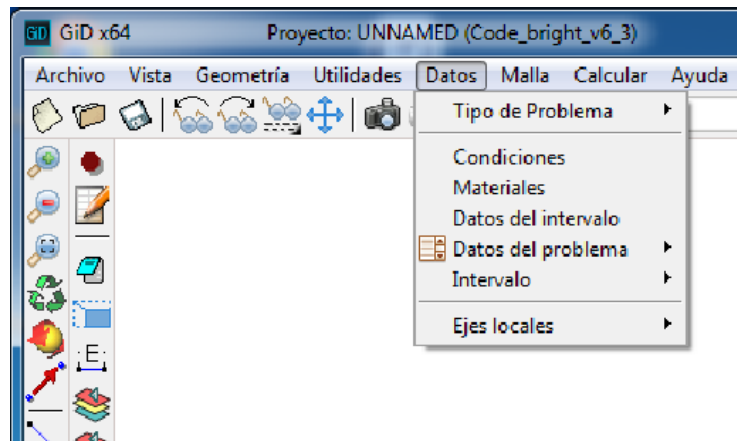


Figura 2.

2. DESARROYO DE LA SIMULACION

2.1. INTRODUCCION

Para llevar a cabo la simulación, el programa GID divide el proceso en dos grandes grupos, el pre-proceso que desarrollamos la parte en la que cargamos la información del problema al programa y el post-proceso donde el programa nos devuelve una serie de datos que nosotros debemos de interpretar.

2.1.1. PREPROCESO

El pre-procesamiento, incluye modelado geométrico, materiales que la componen, condiciones de contorno, estrategia de resolución, generación de malla y calculo entre otros parámetros. El programa crea una malla a la que transfiere los datos asociados a la geometría y realiza el cálculo de la simulación numérica.

Para realizar la simulación y dentro del pre-proceso, es necesario seguir los siguientes cinco (5) pasos principales:

- 2.1.1 Definir la geometría
- 2.1.2. Definir las características y condiciones
 - 2.1.2.1. Materiales
 - 2.1.2.2 Condiciones
 - 2.1.2.3 Datos del intervalo
- 2.1.3. Datos del problema
- 2.1.4. Generar malla
- 2.1.5. Calcular

2.1.2 POSTPROCESO

El post-procesamiento consiste en la interpretación de los resultados obtenidos, para esto, el programa nos facilita diferentes herramientas, para que los datos obtenidos sean fácilmente interpretables.

- 2.1 Ver resultados

2.1.1. DEFINIR LA GEOMETRÍA

2.1.1.1. INTRODUCCIÓN

Para la definición de la geometría, el programa funciona como un sistema CAD (Computer Aided Design) “Diseño asistido por ordenador”. La geometría se desarrolla en un modo jerárquico. Esto significa que una entidad de nivel superior (dimensión) se construye sobre entidades de nivel inferior, dos entidades adyacentes compartirán entonces la misma entidad de nivel inferior, las entidades de menor a mayor dimensión, serán las siguientes:

- Puntos
- Líneas
- Superficies
- Volúmenes

En nuestro caso la geometría estará compuesta por volúmenes, que representaran el cajón de ensayo del pullout test, como hemos mencionado anteriormente un volumen es la entidad de mayor nivel en dimensiones, para construirlo necesitaremos dibujar puntos líneas y superficies en primer lugar, para desarrollar en última instancia los volúmenes.

Necesitaremos identificar bien nuestros ejes de coordenadas (x, y, z) y saber en cada momento cual es la situación de nuestro volumen respecto estos ejes y cuáles son las coordenadas en las cuales se sitúan todas sus entidades, ya que trabajaremos en 3 dimensiones, y muchos de los datos de condiciones de contorno más a delante desarrollados, será necesario situarlos respecto un eje de coordenadas.

Nuestra geometría será la misma en dimensiones que el cajón a ensayar en laboratorio y cumpliendo las normativas reportadas para el caso, que serán las siguientes:

- ASTM D6706-1 (2013) Método de prueba estándar para medir la resistencia de extracción de Geosintéticos en el suelo.
- UNE-EN 13738 (2005) Geotextiles y productos relacionados determinación de la resistencia a la separación del suelo.

2.1.1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Cambio de manera de visualizar la figura:

A partir de ahora cambiaremos la manera de visualizar la figura, por defecto en el programa GID la interfaz nos ofrece dibujar en el plano (x,y), nosotros cambiaremos el plano de dibujo al plano (y,z) de manera que el eje de coordenadas “z”, sea nuestra altura y el eje de coordenadas “y” sea nuestra anchura, de la siguiente manera:

1. Seleccionamos en el menú desplegable: *Vista/ Rotar/ Plano YZ.*

De tal manera que veamos el eje de coordenadas de nuestra interfaz en la siguiente posición (Figura 3):

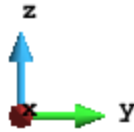


Figura 3

Definir la geometría utilizando el sistema de coordenadas:


Para definir la geometría, utilizamos el método de definición de coordenadas (x, y, z), que consiste en construir la geometría escribiendo las coordenadas de los puntos de nuestro volumen, en el cuadro de comandos que nos ofrece la interfaz de GID, para esto seguimos los siguientes pasos:

Creación de líneas para definir la figura:

1. Haga clic en la pestaña Geometría que se encuentra en el menú desplegable y seleccione: **Geometría / Crear / Línea recta**
2. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Entrar los puntos para definir la línea (Escape para terminar)”
3. Haciendo clic en la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x,y,z) de los puntos que definen cada línea.
4. Coordenadas **0, 0, 0** y pulse **Enter**
5. Coordenadas **0, 0, 0.75** y pulse **Enter**
6. Coordenadas **0, 0.5, 0.75** y pulse **Enter**.
7. Coordenadas **0, 0.5, 0** y pulse **Enter**.
8. Coordenadas **0, 0, 0** y pulse **Enter**.
9. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de cerrar el perímetro del cuadrilátero.
10. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
11. Pulse **Esc**.
12. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Abandonando creación de curvas. 4 nuevas curvas, Entrar los puntos para definir la línea (Escape para terminar)”
13. Pulse **Esc**.

Zum:


Para visualizar la pieza entera, en caso que al mover la pieza no nos quede todo a la vista y necesitemos volver a un modo más cómodo de visualización.


1. Seleccionamos en el menú desplegable: **Vista / Zum / Todo**, o clicamos encima del icono .

Para visualizar la parte de la pieza que más nos interese, seleccionamos:

1. Seleccionamos en el menú desplegable: **Vista/Zum/Dinámico**.
2. El cursor se convierte en una lupa.
3. Presione y mantenga presionado el botón izquierdo del ratón, a continuación, mueva el cursor a la izquierda de la pantalla. Al mover el cursor hacia la izquierda, la vista del área gráfica se amplifica.

Guardar el trabajo realizado

1. Seleccionar en el menú desplegable: **Archivo/Guardar**, o hacer un clic sobre el icono de guardar .
2. Seleccionar el directorio donde se desea guardar el proyecto, Por ejemplo: C:/Desktop/GiD o en otra carpeta que el usuario desee.
3. Escriba el nombre de proyecto en el cuadro de edición “Nombre del Archivo”. Por ejemplo: **PULLOUT_TEST**(no incluir espacios!)
4. Haga clic en **Salvar**.

Sera necesario ir repitiendo la operación de guardado cada poco tiempo haciendo clic sobre el icono guardar .

Borrar la geometría:

1. Seleccionar en el menú desplegable: **Geometría/ Borrar/ Todos los tipos**.
2. El cursor se convierte en un cuadrado y en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Entrar figuras a borrar (Escape para terminar)”
3. Con el ratón y apretando el botón izquierdo seleccionamos las partes de la figura que queramos borrar, una vez seleccionados los elementos pasan a ser rojos, (significa que están seleccionados). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado “X” nuevas Figuras a la selección. Entrar más Figuras. (Escape para terminar)”
4. Pulse **Esc**.
5. En el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Eliminado “X” elementos. Abandonando la función de borrado”.

Repetimos el proceso de creación de líneas para crear un cuadro interior:

1. Haga clic en la pestaña Geometría que se encuentra en el menú desplegable y seleccione: **Geometría / Crear / Línea recta**.
2. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Entrar los puntos para definir la línea (Escape para terminar)”

3. Haciendo clic en la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x,y,z) de los puntos que definen cada línea.
4. Coordenadas **0, 0.175, 0.3225** y pulse **Enter**
5. Coordenadas **0, 0.175, 0.4275** y pulse **Enter**
6. Coordenadas **0, 0.325, 0.4275** y pulse **Enter**.
7. Coordenadas **0, 0.325, 0.3225** y pulse **Enter**.
8. Coordenadas **0, 0.175, 0.3225** y pulse **Enter**.
9. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de cerrar el perímetro del cuadrilátero.
10. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
11. Pulse **Esc**.
12. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Abandonando creación de curvas. 4 nuevas curvas, Entrar los puntos para definir la línea (Escape para terminar)”
13. Pulse **Esc**.

Repetimos el proceso de creación de líneas para crear un cuadro interior:

1. Haga clic en la pestaña Geometría que se encuentra en el menú desplegable y seleccione: **Geometría / Crear / Línea recta**
2. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Entrar los puntos para definir la línea (Escape para terminar)”
3. Haciendo clic en la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) de los puntos que definen cada línea.
4. Coordenadas **0, 0.225, 0.3725** y pulse **Enter**
5. Coordenadas **0, 0.225, 0.3775** y pulse **Enter**
6. Coordenadas **0, 0.275, 0.3775** y pulse **Enter**.
7. Coordenadas **0, 0.275, 0.3725** y pulse **Enter**.
8. Coordenadas **0, 0.225, 0.3725** y pulse **Enter**.
9. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de cerrar el perímetro del cuadrilátero.
10. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
11. Pulse **Esc**.
12. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Abandonando creación de curvas. 4 nuevas curvas, Entrar los puntos para definir la línea (Escape para terminar)”
13. Pulse **Esc**.

Repetimos el proceso de creación de líneas para crear las líneas que unirán los cuadriláteros:

1. Haga clic en la pestaña Geometría que se encuentra en el menú desplegable y seleccione: *Geometría / Crear / Línea recta*
2. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Entrar los puntos para definir la línea (Escape para terminar)”
3. Haciendo clic en la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x,y,z) de los puntos que definen cada línea.
4. Coordenadas **0, 0, 0** y pulse **Enter**
5. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción *Juntar* con el fin de juntar los puntos.
6. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
7. En la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) de los puntos que definen cada línea.
8. Coordenadas **0, 0.175, 0.3225** y pulse **Enter**
9. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción *Juntar* con el fin de juntar los puntos.
10. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
11. En la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x,y,z) de los puntos que definen cada línea.
12. Coordenadas **0, 0.225, 0.3725** y pulse **Enter**.
13. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción *Juntar* con el fin de juntar los puntos.
14. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
15. Pulse **Esc**.
16. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Abandonando creación de curvas. 2 Curvas nuevas.
17. Pulse **Esc**.

Repetimos el proceso de creación de líneas para crear las líneas que unirán los cuadriláteros:

1. Haga clic en la pestaña Geometría que se encuentra en el menú desplegable y seleccione: *Geometría / Crear / Línea recta*
2. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Entrar los puntos para definir la línea (Escape para terminar)”
3. Haciendo clic en la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x,y,z) de los puntos que definen cada línea.

4. Coordenadas **0, 0.5, 0** y pulse **Enter**
5. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de juntar los puntos.
6. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
7. En la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) de los puntos que definen cada línea.
8. Coordenadas **0, 0.325, 0.3225** y pulse **Enter**
9. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de juntar los puntos.
10. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
11. En la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) de los puntos que definen cada línea.
12. Coordenadas **0, 0.275, 0.3725** y pulse **Enter**.
13. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de juntar los puntos.
14. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
15. Pulse **Esc**.
16. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Abandonando creación de curvas. 2 Curvas nuevas.
17. Pulse **Esc**.

Repetimos el proceso de creación de líneas para crear las líneas que unirán los cuadriláteros:

1. Haga clic en la pestaña Geometría que se encuentra en el menú desplegable y seleccione: **Geometría / Crear / Línea recta**
2. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Entrar los puntos para definir la línea (Escape para terminar)”
3. Haciendo clic en la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) de los puntos que definen cada línea.
4. Coordenadas **0, 0.225, 0.3775** y pulse **Enter**
5. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de juntar los puntos.
6. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
7. En la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) de los puntos que definen cada línea.
8. Coordenadas **0, 0.175, 0.4275** y pulse **Enter**

9. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de juntar los puntos.
10. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
11. En la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) de los puntos que definen cada línea.
12. Coordenadas **0, 0, 0.75** y pulse **Enter**.
13. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de juntar los puntos.
14. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
15. Pulse **Esc**.
16. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Abandonando creación de curvas. 2 Curvas nuevas.
17. Pulse **Esc**.

Repetimos el proceso de creación de líneas para crear las líneas que unirán los cuadriláteros:

1. Haga clic en la pestaña Geometría que se encuentra en el menú desplegable y seleccione: **Geometría / Crear / Línea recta**
2. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Entrar los puntos para definir la línea (Escape para terminar)”
3. Haciendo clic en la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) de los puntos que definen cada línea.
4. Coordenadas **0, 0.275, 0.3775** y pulse **Enter**
5. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de juntar los puntos.
6. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
7. En la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x,y,z) de los puntos que definen cada línea.
8. Coordenadas **0, 0.325, 0.4275** y pulse **Enter**
9. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de juntar los puntos.
10. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
11. En la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) de los puntos que definen cada línea.
12. Coordenadas **0, 0.5, 0.75** y pulse **Enter**.

13. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “crear un punto nuevo o seleccionar el existente”. Aparece la ventana de “Procedimiento de creación de punto”. Haga clic en la opción **Juntar** con el fin de juntar los puntos.
14. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “enganchando a un punto existente”
15. Pulse **Esc**.
16. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Abandonando creación de curvas. 2 Curvas nuevas.
17. Pulse **Esc**.

En la figura 4, se muestra como queda la geometría dibujada.

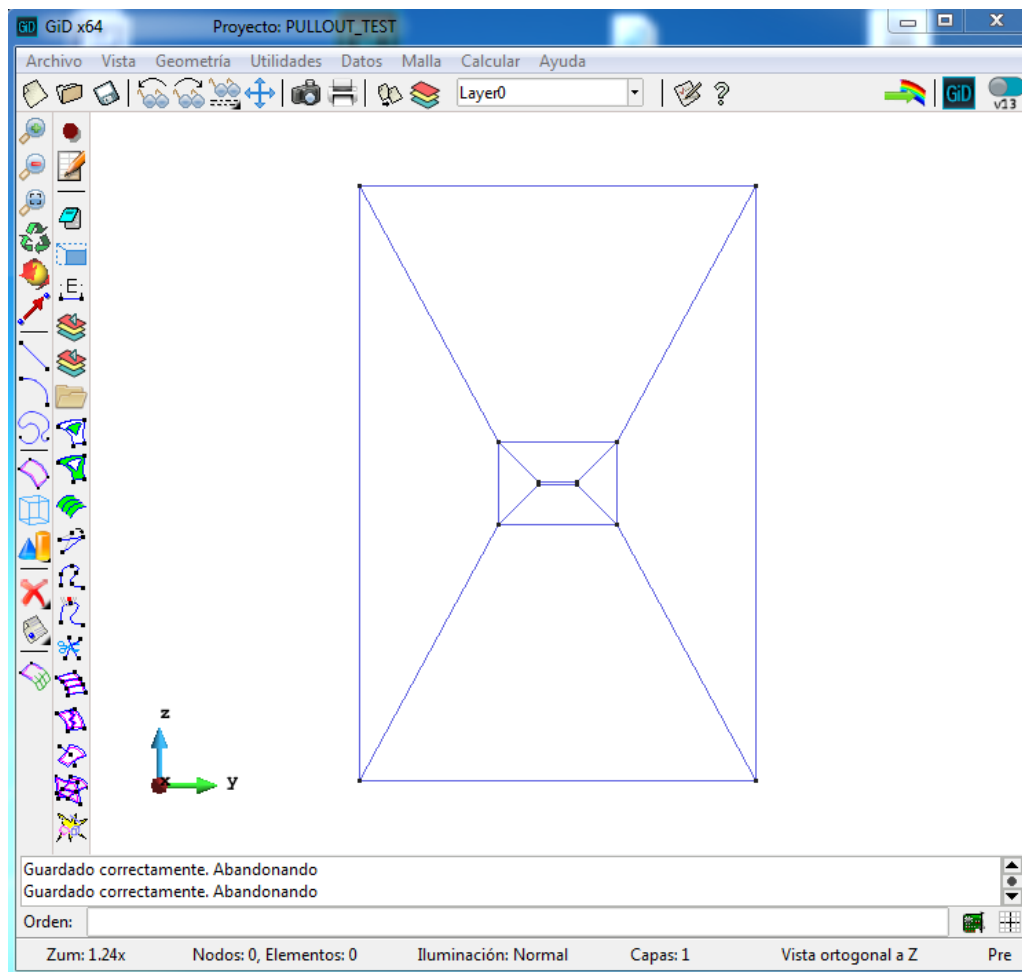


Figura 4.

Definición de las superficies en la geometría:

Crearemos superficies en los interiores de las líneas creadas, como se muestra a continuación:

1. Haga clic en la pestaña Geometría que se encuentra en el menú desplegable y seleccione: **Geometría/Crear/Superficie NURBS/ Por contorno**

2. El cursor se convierte en un cuadrado y en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “entrar las líneas para definir la superficie NURBS (Escape para terminar)”
3. Con el ratón y **apretando el botón izquierdo seleccionamos toda la figura**, una vez seleccionados los elementos pasan a ser rojos, (significa que están seleccionados). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 20 nuevas líneas a la selección. Entrar más líneas. (Escape para terminar)”
4. Pulse **Esc**.
5. En el cuadro de mensaje aparece el siguiente mensaje: “Creadas 9 nuevas superficies”
6. La superficie generada es representada por un cuadrilátero de color fucsia dentro del contorno, presione **Esc** y aparece el siguiente mensaje en el cuadro de mensaje: “Abandonando creación de superficie NURBS. No hay cambios.”



Tenemos también la posibilidad de crear las superficies de la siguiente manera:

Crearemos superficies en los interiores de las líneas creadas, Seleccionamos:

1. Haga clic en la pestaña Geometría que se encuentra en el menú desplegable y seleccione: **Geometría/Crear/Superficie NURBS/ Automático**.
1. Aparecerá una ventana de entrada de valor, donde pondremos el número 4 y daremos a **Aceptar**.
2. En el cuadro de mensaje aparece el mensaje: “creadas 9 nuevas superficies”
3. Aparecerá de nuevo la ventana de entrada de valores, presionamos a **Cancelar**.

Crear capas:

Siempre que trabajemos con un sistema CAD (Computer Aided Design) (Diseño asistido por ordenador) y el programa nos de la opción de trabajar con capas, es muy interesante utilizar las capas para un mejor manejo de las opciones de dibujo, debido a que si trabajamos con dibujos complicados tendremos la opción de simplificar el dibujo utilizando las capas.

1. Hacemos clic sobre el icono de capas  que se encuentra debajo del menú desplegable.
2. Nos aparece la ventana de capas, Figura 5, dentro de la ventana seleccionamos el icono de nueva capa , en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Creada nueva capa: ‘Layer1’. Establecida como capa en uso”
3. Clicamos encima del nombre en la ventana de capas y cambiamos el nombre, en nuestro caso será: **001SOIL**
4. Pulsamos **Enter**.
5. Repetimos los pasos 2, 3 y 4 para crear dos capas más, en nuestro caso las llamaremos: **002INTERFASE** y **003REFUERZO**.

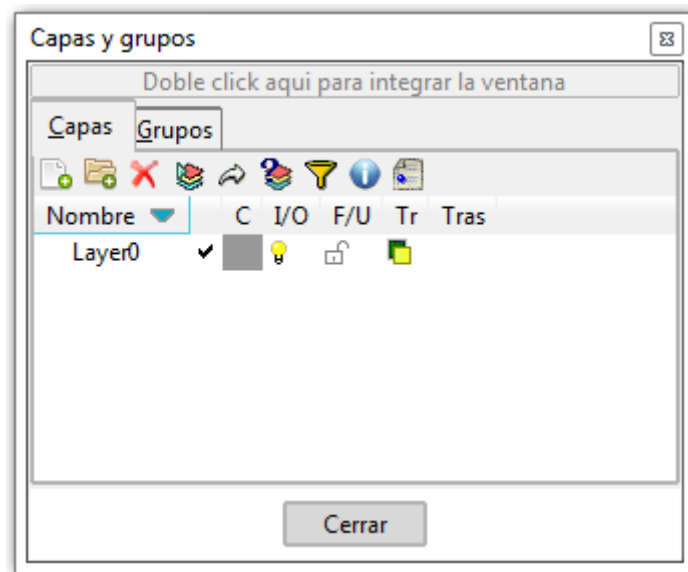



Figura 5.

En estos momentos todos los elementos creados pertenecen a la capa “Layer0” que el programa incorpora por defecto, vamos a cambiar a las capas que nos interese, elementos que más adelante trabajaremos individualmente de la siguiente forma:

1. Seleccionamos la capa **001SOIL** clicando dos veces encima del nombre, un tic negro se pondrá en esta capa (esto quiere decir que la capa esta seleccionada como activa en este momento) En el cuadro de mensaje aparece el siguiente mensaje: “Capa en uso: 001SOIL”
2. Hacemos clic sobre el icono de “Enviar las entidades seleccionadas a una capa”  que se encuentra en la ventana de capas. Se abre un desplegable donde seleccionamos **Todo**. El cursor se convierte en un cuadrado y en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Entrar Figuras para cambiar con sus entidades a la capa: 001SOIL”
3. Con el ratón y **apretando el botón izquierdo seleccionamos el cuadrado más exterior juntamente con las superficies exteriores los puntos y las diagonales exteriores como se muestra en la Figura 6**, una vez seleccionados los elementos pasan a ser rojos, (significa que están seleccionados). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 24 nuevas Figuras a la selección. Entrar más Figuras. (escape para terminar)”
4. Clicamos en **Terminar**.
5. en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “asignadas 16 nuevas entidades y 8 sub-entidades a la capa: 001SOIL. Abandonando Cambio de capas”

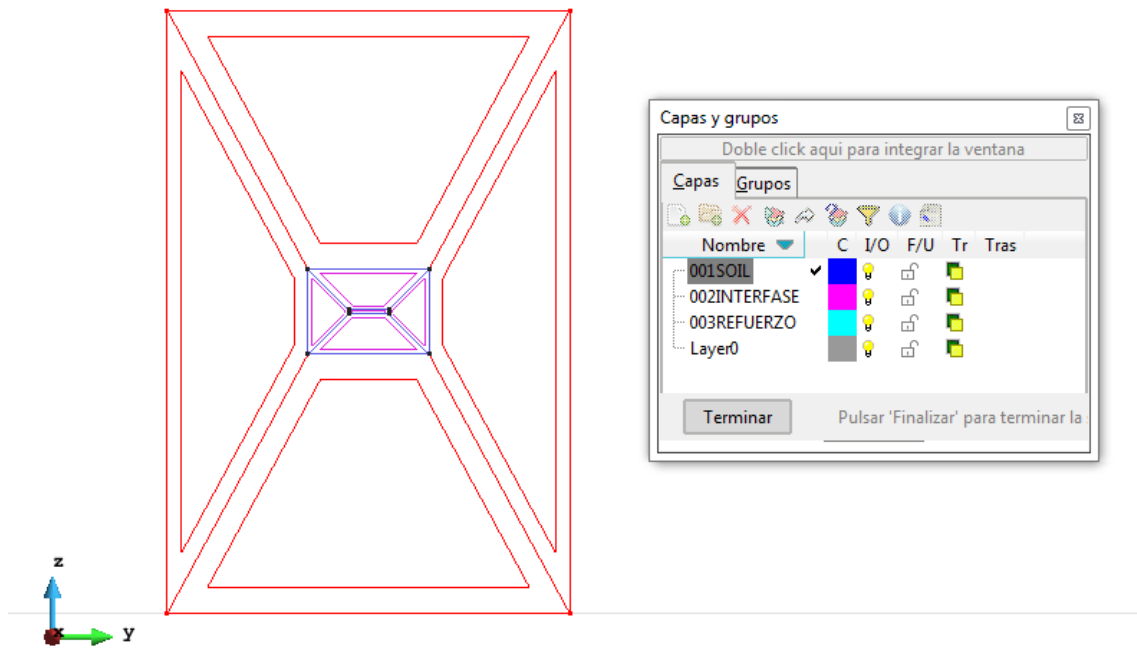


Figura 6.

6. Repetimos los pasos **1**, **2**, **3** y **4** para poner los elementos que se indican a continuación en la Figura 7, en la capa **002INTERFASE**.

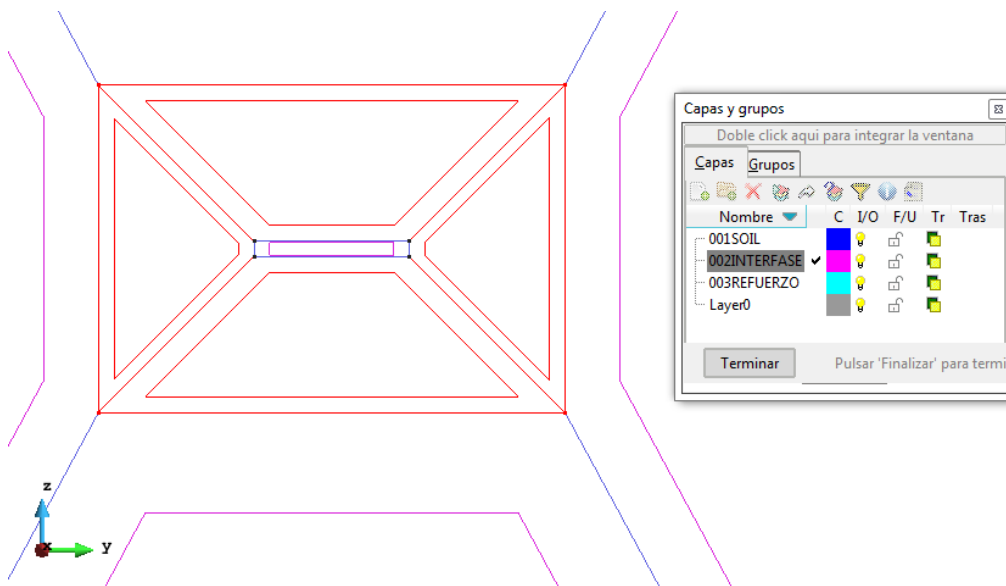


Figura 7.

7. Repetimos los pasos **1**, **2**, **3** y **4** para poner los elementos que se indican a continuación en la Figura 8, en la capa **003REFUERZO**.

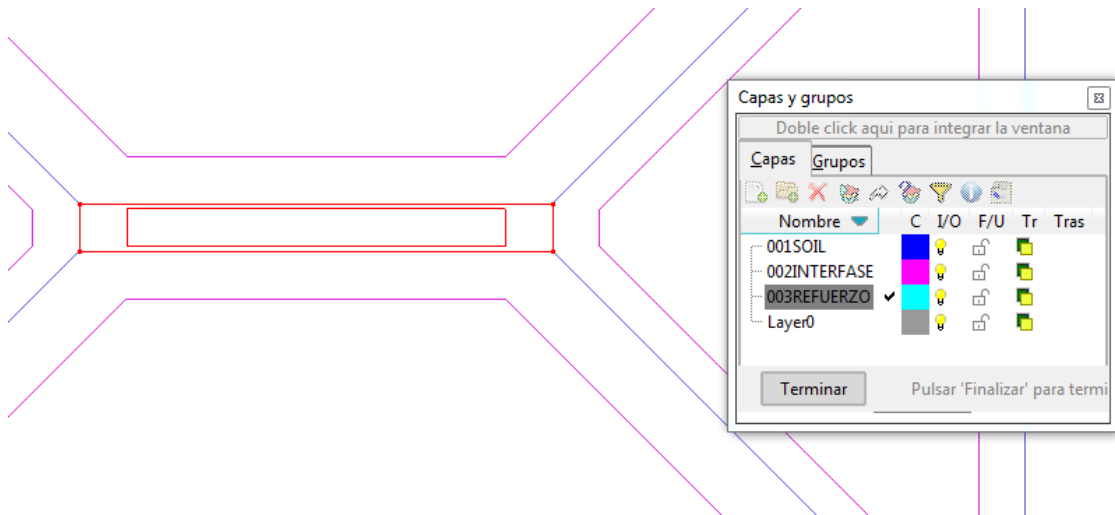




Figura 8.

8. Seleccionamos la capa **Layer0** clicando dos veces encima del nombre, un tic negro se pondrá en esta capa y seguidamente clicamos el icono de borrar capa  , la capa se borrara.
9. Podemos seleccionar el icono de apagar y encender capas  , para ver qué elementos pertenecen a cada capa, se apagaran y se encenderán.
10. Clicamos **Cerrar** en la ventana de capas.

Cambio de manera de visualizar la figura:

A partir de ahora cambiaremos la manera de visualizar la figura, para esta simulación en 3 dimensiones, a partir de ahora será mejor trabajar en modo isométrico donde podamos visualizar la figura en 3 dimensiones:

1. Seleccionamos en el menú desplegable: **Vista/ Rotar/ Isométrico**

Comando Rotación Libre:

Para poder mover la figura en posición isométrico y poder posicionar la figura de diferentes formas en 3D, disponemos del comando Rotación Libre con el siguiente

icono .

Activar la rejilla:

Activaremos la rejilla para ayuda a la construcción del dibujo.

1. Seleccionamos en el menú desplegable: **Utilidades/Preferencias.**
2. Se abrirá la **ventana preferencias**, Figura 9, seleccionamos la pestaña de **rejilla.**
3. Marca las opciones de **Mostrar las líneas de la rejilla** y **Activar forzado de coordenadas.**

Utilizaremos como unidad el metro para marcar los números de las casillas.

4. En **centro** marcaremos las coordenadas X e Y que queremos que sean el centro para nuestro eje de coordenadas, marcamos **0** en las dos casillas.
5. En **extensión** marcaremos la extensión máxima de la rejilla, marcamos **5** en las dos casillas.
6. En **espaciado** marcaremos la distancia entre líneas de rejilla, **0.1** en **espaciado X** e **Y**, en **línea principal cada 10**. Como se muestra en figura 9.
7. Hacemos clic en **Aplicar**.
8. En el cuadro de mensaje aparece el siguiente mensaje: “Aceptadas nuevas preferencias Fichero de preferencias salvado”
9. Hacemos clic en **Cerrar**.

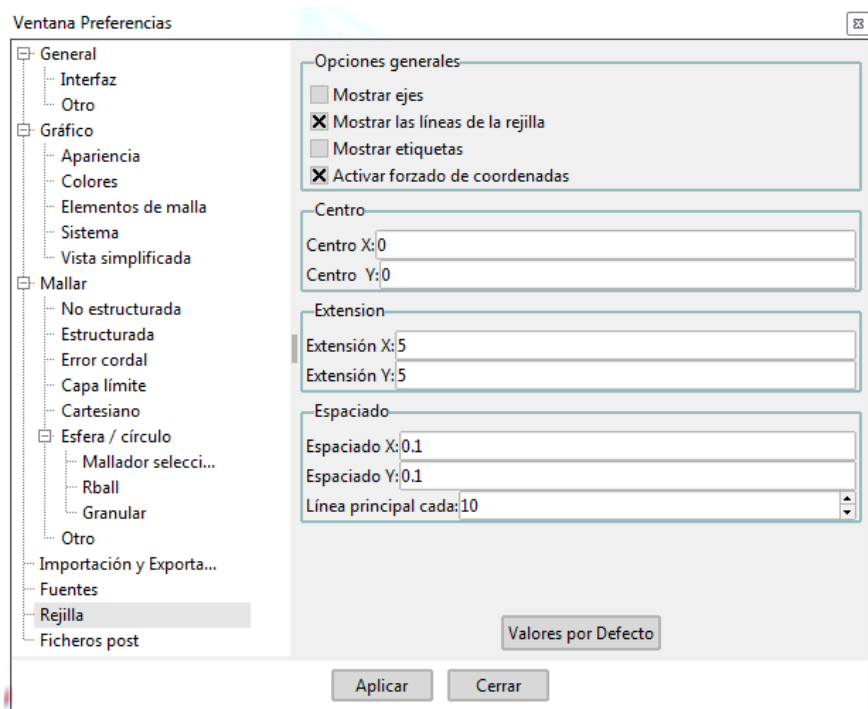


Figura 9.

A continuación se muestra como queda la geometría en posición isométrica con la rejilla activada, figura 10:

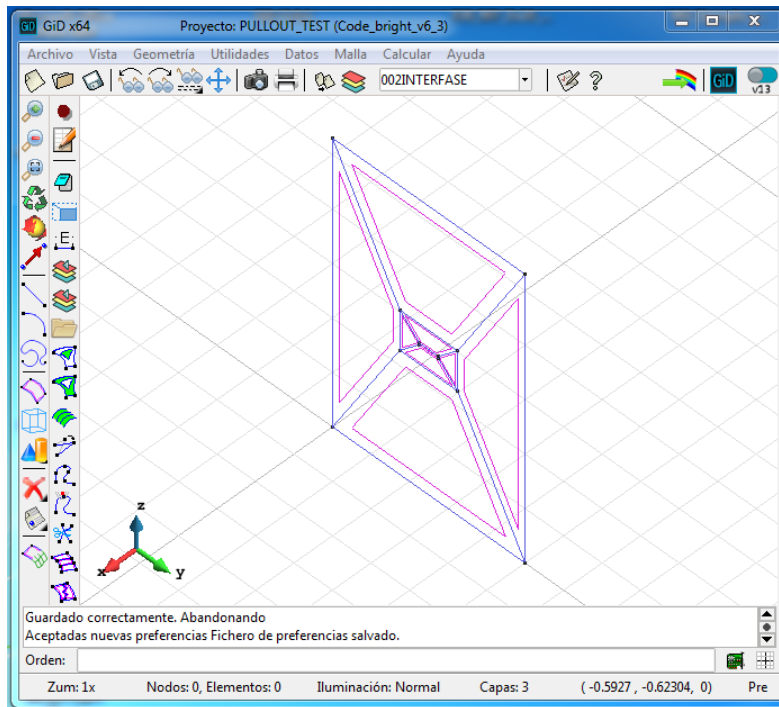


Figura 10.

Etiquetar la geometría

Tenemos la opción de etiquetar la geometría, para todas las entidades del dibujo, si en algún momento nos interesa saber qué características geométricas tiene esa entidad podemos acceder a etiquetar el elemento para identificarlo y seguidamente poder ver sus propiedades.

1. Seleccionamos en el menú desplegable: *Vista / Etiquetas / Todo*.

Ahora se dibujan las etiquetas de todas las entidades. Los números negros corresponden a los puntos, los azules a las líneas, los de color fucsia a las superficies y los volúmenes en azul.

2. Para apagar etiquetas, Seleccionamos en el menú desplegable: *Vista / Etiquetas / Apagada*.

Visualización de las características de las entidades que contiene la geometría:



Para visualizar las características de cada objeto, usando el comando de listar es posible visualizar la información numérica de la geometría de todas las entidades seleccionadas, Por ejemplo, para ver las características geométricas de una línea:

1. Seleccionamos en el menú desplegable: *Utilidades/Listar/Líneas*
2. El cursor se convierte en un cuadrado y en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “entrar las líneas para asignar a la lista”
3. Con el ratón y **apretando el botón izquierdo seleccionamos la línea que nos interese**, una vez seleccionada la línea pasa a ser roja, (significa que está

- seleccionada). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 1 nuevas líneas a la selección. Entrar más líneas. (escape para
4. Pulse **Esc**.
 5. La lista de entidades de las líneas seleccionadas se muestra a continuación en la ventana “listar entidades” donde podemos ver algunas características del elemento. En el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “listadas 1 entidades”
 6. Haga clic en **Cerrar**.

Extruir:

Una vez tengamos la figura en visualización isométrica, extruiremos la figura para darle el volumen deseado con el comando extruir, lo haremos de la siguiente manera:

1. Haga clic en la pestaña Geometría que se encuentra en el menú desplegable y seleccione: **Geometría / Crear / Punto**.
2. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Entrar punto”
3. Haciendo clic en la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) del punto.
4. Coordenadas **1.05, 0, 0** y pulse **Enter**.
5. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Entered Point X. Entrar punto”
6. Haciendo clic en la línea de comandos, introduzca las coordenadas (x, y, z) del punto.
7. Coordenadas **1.25, 0, 0** y pulse **Enter**.
8. El mensaje siguiente aparece en el cuadro de mensaje: “Entered Point X. Entrar punto”
9. Pulse **Esc**.
10. Vamos a etiquetar los puntos de la figura, Seleccionamos en el menú desplegable: **Vista / Etiquetas / Todas en / puntos**
11. En nuestro caso necesitaremos saber la etiqueta del punto número 1 con coordenadas (0, 0, 0) y de los dos puntos creados nuevos, con coordenadas (1.05, 0, 0) y (1.25, 0, 0) etiquetas 13 y 14 en nuestro caso.
12. Seleccionamos en el menú desplegable: **Utilidades / Copiar**
13. Nos aparecerá la ventana “copiar”, figura 11.
14. En el apartado “**tipo de entidades**” seleccionamos con el menú desplegable “**Superficies**”.
15. En el apartado “**Transformación**” seleccionamos con el menú desplegable “**Traslación**”.
16. En el apartado “**Primer punto**” en la casilla “**Núm.**” introducimos el número “**1**” indicando la etiqueta del punto y seguidamente clicamos en el icono punto , las coordenadas del punto se cargan automáticamente.
17. En el apartado “**Segundo punto**” en la casilla “**Núm.**” introducimos el número “**13**” indicando la etiqueta del punto y seguidamente clicamos en el icono punto , las coordenadas del punto se cargan automáticamente.
18. Seleccionamos la casilla “**Colapsar**”
19. En el apartado “**Extruir**” seleccionamos con el menú desplegable “**Volúmenes**”.

20. Las demás casillas dejamos por defecto igual. La ventana Copiar queda de la siguiente forma, Figura 11:

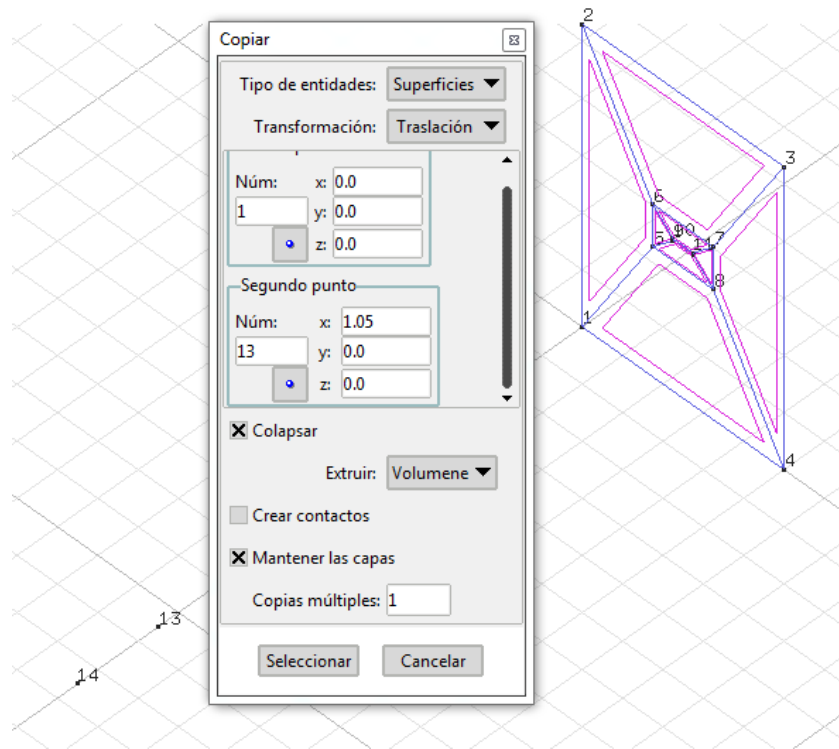


Figura 11.

21. Clicamos la pestaña “**Seleccionar**”, el cursor se convierte en un cuadrado y en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “entrar Superficies a Copiar”
22. Con el ratón y **apretando el botón izquierdo seleccionamos la pieza entera**, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 9 nuevas superficies a la selección. Entrar más superficies. (escape para terminar), (Figura 12).
23. Pulse **Esc**.

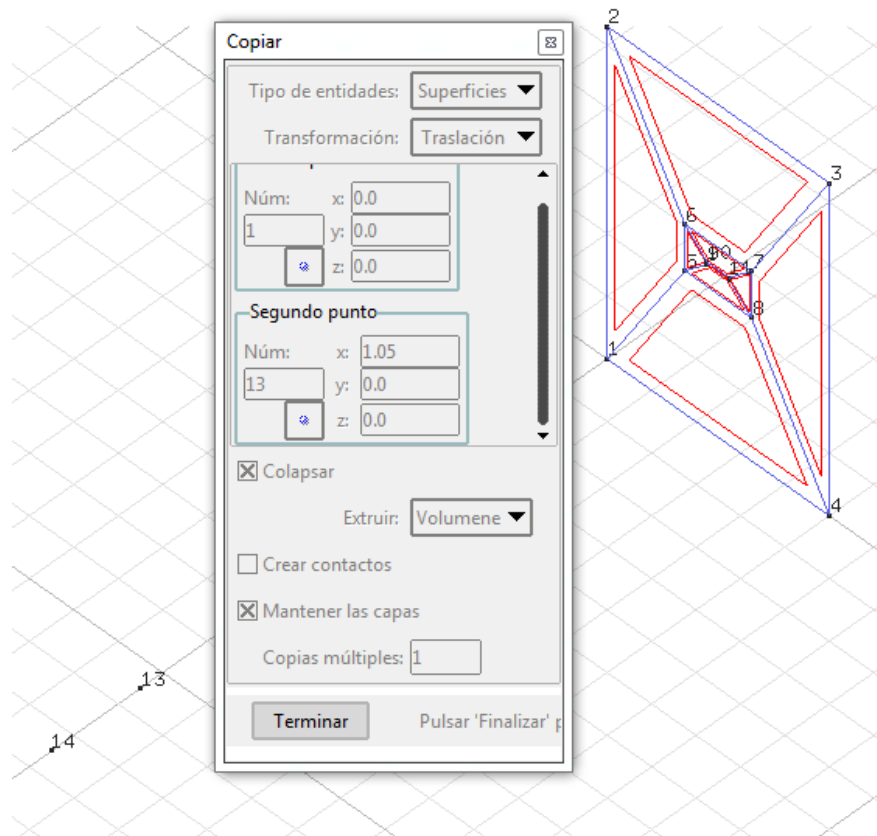


Figura 12.

La pieza se ha extruido creando un volumen, de 1.05 metros de largo, donde podemos apreciar la creación de volúmenes en su interior por piezas geométricas de color azul. (Figura 13).

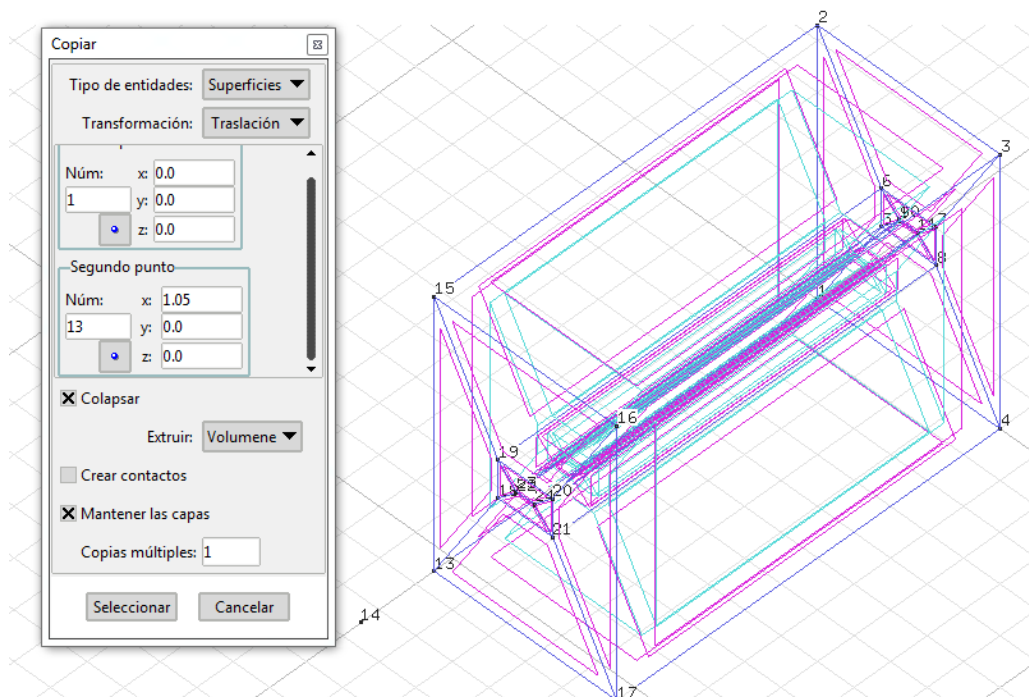




Figura 13.

Extruir:

Repetiremos la operación extruir para crear cuatro volúmenes más en la parte frontal de la pieza dejando un espacio vacío en el centro de la pieza de la siguiente forma:

1. En la ventana “copiar”
2. En el apartado “*tipo de entidades*” seleccionamos con el menú desplegable “*Superficies*”.
3. En el apartado “*Transformación*” seleccionamos con el menú desplegable “*Traslación*”.
4. En el apartado “*Primer punto*” en la casilla “*Núm.*” introducimos el número “13” indicando la etiqueta del punto y seguidamente clicamos en el icono punto , las coordenadas del punto se cargan automáticamente.
5. En el apartado “*Segundo punto*” en la casilla “*Núm.*” introducimos el número “14” indicando la etiqueta del punto y seguidamente clicamos en el icono punto , las coordenadas del punto se cargan automáticamente.
6. Seleccionamos la casilla “*Colapsar*”
7. En el apartado “*Extruir*” seleccionamos con el menú desplegable “*Volúmenes*”.
8. Las demás casillas dejamos por defecto igual. La ventana Copiar queda de la siguiente forma, Figura 14:

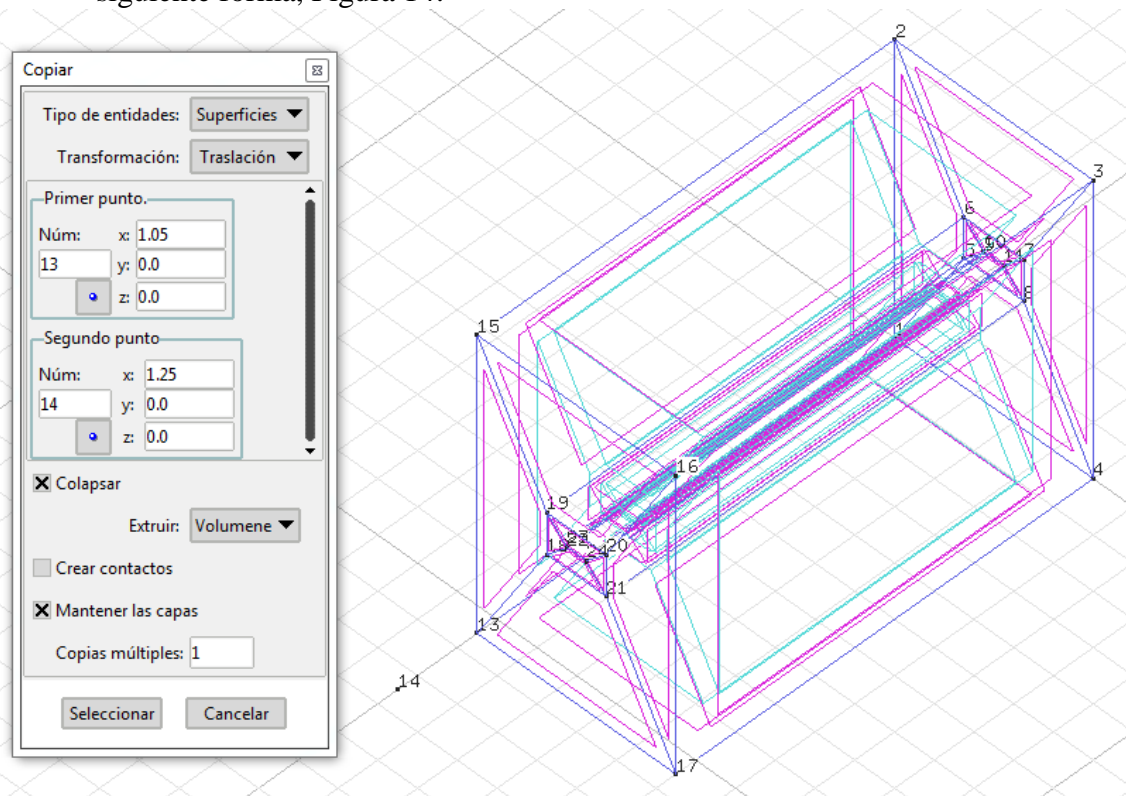


Figura 14.

9. Clicamos la pestaña “**Seleccionar**”, el cursor se convierte en un cuadrado y en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “entrar Superficies a Copiar”
10. Con el ratón y **apretando el botón izquierdo seleccionamos las superficies que se ven marcadas en la figura 15**, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 4 nuevas superficies a la selección. Entrar más superficies. (escape para terminar).

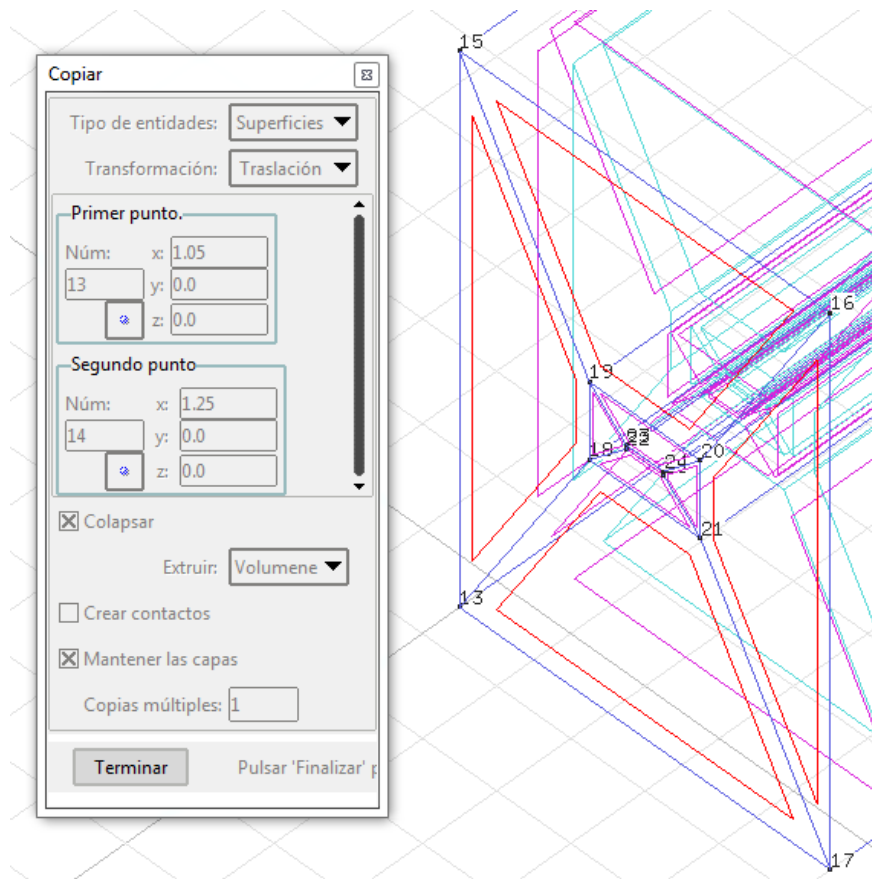



Figura 15.

11. Pulse **Esc**.
12. Cerramos ventana copiar.
13. Guardamos .

La pieza se ha extruido creando un volumen, de 1.25 metros de largo, donde podemos apreciar la creación de volúmenes con un espacio vacío en su interior (Figura 16).

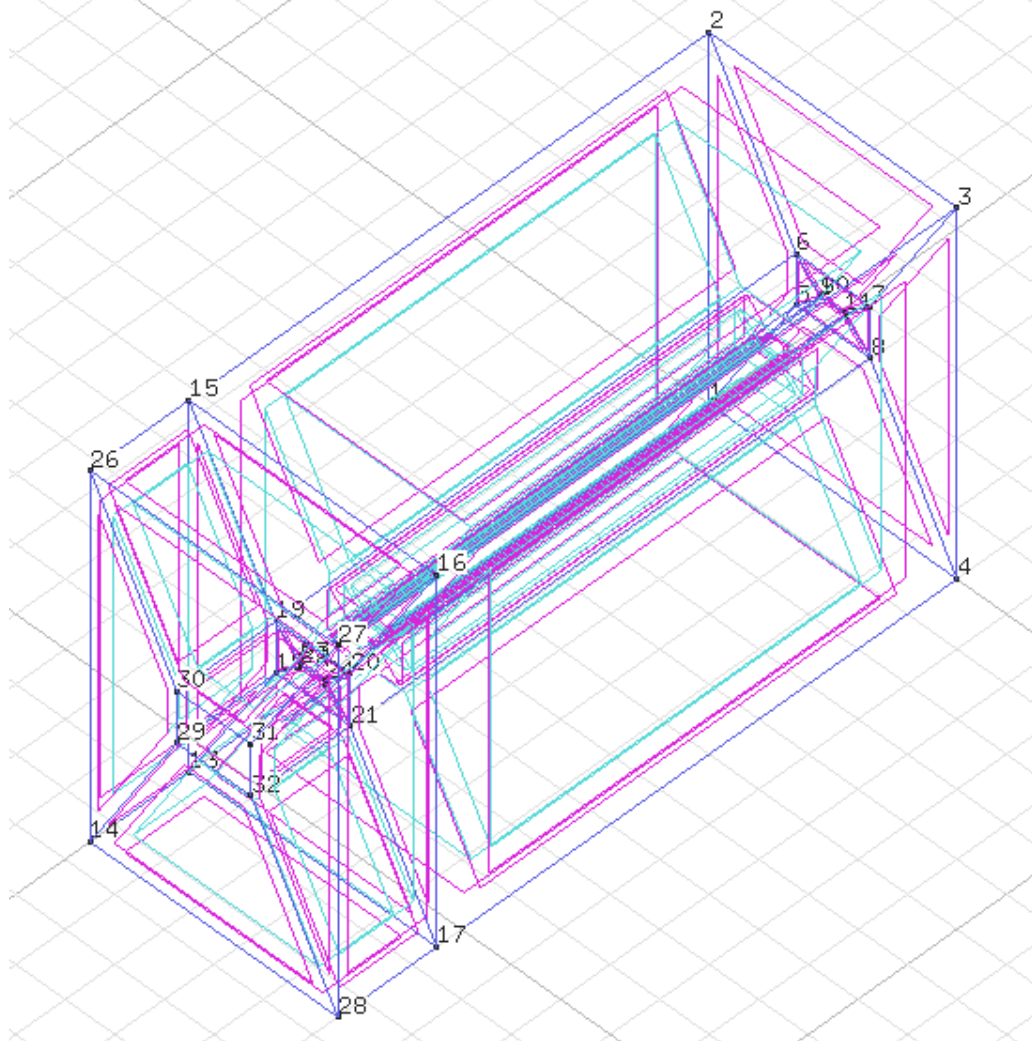





Figura 16.

Comprobar que cada elemento se encuentre en su capa adecuada.

1. Hacemos *clik* sobre el icono de capas  que se encuentra debajo del menú desplegable.
2. Hacemos *clik* sobre el icono de apagar y encender capas , de las capas “001SOIL” y “003REFUERZO” para apagarlas, en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “La capa 001SOIL está apagada, La capa 003REFUERZO está apagada, se apagaran estas capas y podremos trabajar únicamente con la capa 002INTERFASE en la interfaz.
3. Seleccionamos la capa **001SOIL** clicando **dos veces encima del nombre**, un tic negro se pondrá en esta capa (Figura 17) , (esto quiere decir que la capa esta seleccionada como activa en este momento) En el cuadro de mensaje aparece el siguiente mensaje: “Capa en uso: 001SOIL”
4. Hacemos clic sobre el icono de “Enviar las entidades seleccionadas a una capa”  que se encuentra en la ventana de capas. Se abre un desplegable donde seleccionamos **Todo**. El cursor se convierte en un cuadrado y en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Entrar Figuras para cambiar con sus entidades a la capa: “002INTERFASE”.

5. Seleccionamos los elementos que se muestran en la Figura 17 en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Agregados elementos a la selección. Entrar más elementos. (Escape para terminar)”
6. Pulse **Esc**.
7. Clicamos “**Cerrar**” en la ventana capas

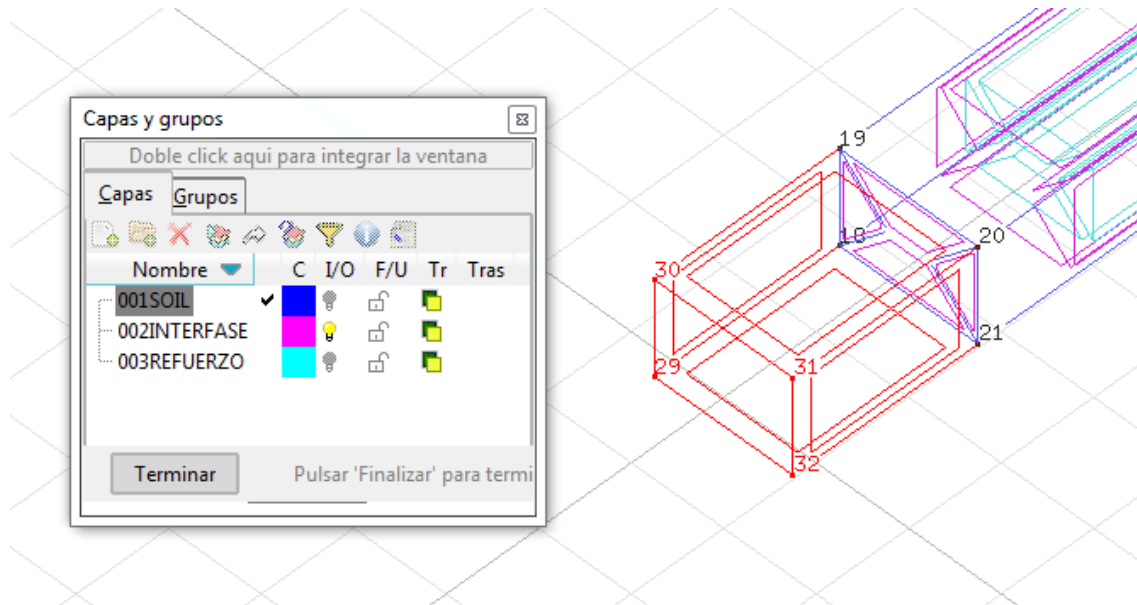


Figura 17.

2.1.2. DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES

2.1.2.1. MATERIALES

2.1.2.1.1. INTRODUCCIÓN

Las características de los materiales del suelo se definen dentro de este tema. Las características de los materiales, incluyen los datos mecánicos del suelo, los datos hidráulicos y térmicos que en este caso no serán necesarios y las características de la fase.

Antes de entrar a definir los materiales deberíamos explicar algunas cosas sobre el funcionamiento de GID con CODE BRIGHT que nos serán de utilidad para abordar el tema de materiales.

Todos los materiales deben ser definidos a partir de un material genérico. El cual nos servirá de base y a partir de ahí podremos hacer modificaciones para definir los demás materiales.

Para crear nuevos materiales, se debe escribir un nombre de material y completar las leyes constitutivas necesarias y hacer un Aceptar datos para validar los datos introducidos. Es necesario crear un material antes de asignarlo en la geometría.

La asignación de materiales, debe respetar la estructura jerárquica de las entidades (es decir, no se puede asignar un material a una línea perteneciente a una superficie que acaba de ser identificada con otro material). Este tipo de error puede crear conflictos.

Las modificaciones posteriores en los parámetros de los materiales asignados no requieren un proceso de re-mallado.

Las propiedades de los materiales pueden variar en cada intervalo o constante de mantenimiento.

En nuestro caso tendremos que definir tres materiales con características diferentes, los separaremos en: 001 SOIL, para definir el suelo que llena la gran parte del cajón, 002 INTERFASE, para definir el suelo que se encuentra cercano al refuerzo, 003 REFUERZO para definir el refuerzo.

Leyes constitutivas en CODE_BRIGTH

El programa CODE_BRIGTH, diferencia cada tipo de problema en diferentes leyes constitutivas, para la entrada de datos en la interfaz.

Cada ley constitutiva se define con 3 tipos de datos:

1. Número de intervalos. Una caja cerca del nombre de la ley constitutiva debe ser usada para este propósito. Por lo general, los parámetros sólo se introducirán en el primer intervalo.

	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1er intervalo											
2º intervalo											

2. Cada ley constitutiva es diferenciada por el índice ICL. Por ejemplo ICL = 10 son las propiedades de fase. Se consideran grupos de ICL, por ejemplo se utiliza ICL = 1 y 33 para el modelos elásticos y visco-plásticos, los cuales serán los que nosotros necesitemos para nuestro modelo.

En CODE_BRIGTH, están disponibles las siguientes leyes constitutivas:

MODELOS CONSTITUTIVOS HIDRÁULICOS Y TÉRMICOS (a) CURVA DE RETENCIÓN PERMEABILIDAD INTRÍNSECA PERMEABILIDAD RELATIVA DE LA FASE LÍQUIDA PERMEABILIDAD RELATIVA DE LA FASE GAS FLUXOS DIFUSIVOS DE MASA FLUXOS DISPERSOS DE MASA Y	MODELOS CONSTITUCIONALES MECÁNICOS ELASTICIDAD (b) ELASTICIDAD NO LINEAL (b) VISCOPLASTICIDAD PARA MATERIALES SALINOS (b) VISCOPLASTICIDAD PARA MATERIALES GRANULARES b) VISCOPLASTICIDAD PARA SUELOS NO SATURADOS BASADOS EN BBM
---	---

ENERGIA FLUJO CONDUCTIVO DE CALOR	(b) MODELO DANO-ELASTOPLASTICO PARA ROCAS ARGILLACIAS (c) MODELO TERMOELASTOPLÁSTICO PARA SUELOS (d) MODELO EXPANSIVO DE BARCELONA PARA SUELOS (e) MODELOS FAMILIARES DE CASM (f)
PROPIEDADES FASE (a) PROPIEDADES EN FASE SÓLIDA PROPIEDADES DE LA FASE LÍQUIDA PROPIEDADES DE LA FASE GAS	PROCESO DE EXCAVACIÓN (g)

Parámetros para la ley constitutiva. Para cada ley constitutiva se deben introducir una serie de parámetros: ITYCL, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10. El primero (ITYCL) es un entero que indica qué opción entre las disponibles se utiliza. Por ejemplo, en ICL = 10 “Propiedades de fase sólida” ITYCL = 1 significa que los parámetros serán sobre Calor específico sólido, densidad y coeficiente de expansión, esta opción permite la entrada de diferentes datos, que son las casillas de P1 a P10, estas casillas corresponden a parámetros en una ecuación dada.

Trabajaremos con los siguientes modelos:

Propiedades fase (a)

- PROPIEDADES EN FASE SÓLIDA

Modelos constitucionales mecánicos:

- ELASTICIDAD (b)
- ELASTICIDAD NO LINEAL (b)
- VISCOPLASTICIDAD PARA MATERIALES GRANULARES b)

Descripción de los parámetros:

PROPIEDADES EN FASE SOLIDA:

ICL	NOMBRE	ITYCL	DESCRIPCIÓN
10	Propiedades de fase sólida	1	Calor específico sólido, densidad y coeficiente de expansión

Propiedades de fase sólida (ICL = 10). parámetros para ITYCL = 1:

P1	C_s	J kg ⁻¹ K ⁻¹	Calor específico de fase sólida (por defecto: 1000 J kg ⁻¹ K ⁻¹)
P2	ρ_s	Kg/m ³	Densidad de la fase sólida (por defecto: 2700 kg/m ³)

P3	α_s	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	Coefficiente de expansión térmica lineal para granos (no volumétrico) (valor predeterminado = 0.0). Esto no produce expansión térmica del medio.
P4	T_0	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura de referencia para expansión térmica (por defecto: 40)
P5			
P6			
P7	$1/K_s$	MPa^{-1}	Compresibilidad de la fase sólida contra los cambios de tensión media (defecto = 0)
P8	p_0	MPa	Presión de referencia para la compresibilidad sólida (por defecto: 0,1 MPa)

MODELOS CONSTITUCIONALES MECANICOS

ICL	NOMBRE	ITYCL	DESCRIPCION
1	ELASTICO	1	Modelo de elasticidad lineal
33	Viscoplasticidad materiales granulares	4,5	Función de rendimiento y regla de flujo. Mohr-Coulom

MODELO ELASTICO:

ICL	NOMBRE	ITYCL	DESCRIPCION
1	ELASTICO	1	Modelo de elasticidad lineal

Modelo elasticidad lineal (ICL = 1). parámetros para ITYCL = 1:

P1	E	MPa	Modulo de Young
P2	$dE/d\Phi$	MPa	Variacion del modulo de Young con la porosidad
P3	ν		Ratio de Poisson
P4	Φ_0		Porosidad inicial
P5	Φ_{min}		Porosidad minima
P6	E_{min}	MPa	Modulo elastico minimo

VISCOPLASTICIDAD PARA MATERIALES GRANULARES (Datos mecánicos 1)



33	Viscoplasticidad materiales granulares	4,5	Función de rendimiento y regla de flujo. Mohr-Coulom
----	--	-----	--

PARÁMETROS PARA ITYCL = 5 (viscoplasticidad para materiales granulares)

P1	m		Potencia de tensión
P2	Γ_0	s^{-1}	Viscosidad
P3	Q	$Jmol^{-1}$	Energia de activacion
P4	Void		

P5	c'	MPa	Cohesion
P6	Void		
P7	α		Parametro reductor de la dilatacion(Oscila entre 0 y 1) (valor predeterminado = 1)
P8	Void		
P9	Void		
P10	δ		Equivalente a M

2.1.2.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

8. Hacemos **clik** sobre el icono de capas  que se encuentra debajo del menú desplegable.
9. Hacemos **clik** sobre el icono de apagar y encender capas , de las capas 002INTERFASE Y 003REFUERZO para apagarlas, en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “La capa 002INTERFASE está apagada, La capa 003REFUERZO está apagada, se apagaran estas capas y podremos trabajar únicamente con la capa 001SOIL en la interfaz.
10. Clicamos **Cerrar** en la ventana de capas.
11. Seleccionamos en el menú desplegable: **Datos / Materiales**, Nos aparece la ventana materiales (Figura 18)

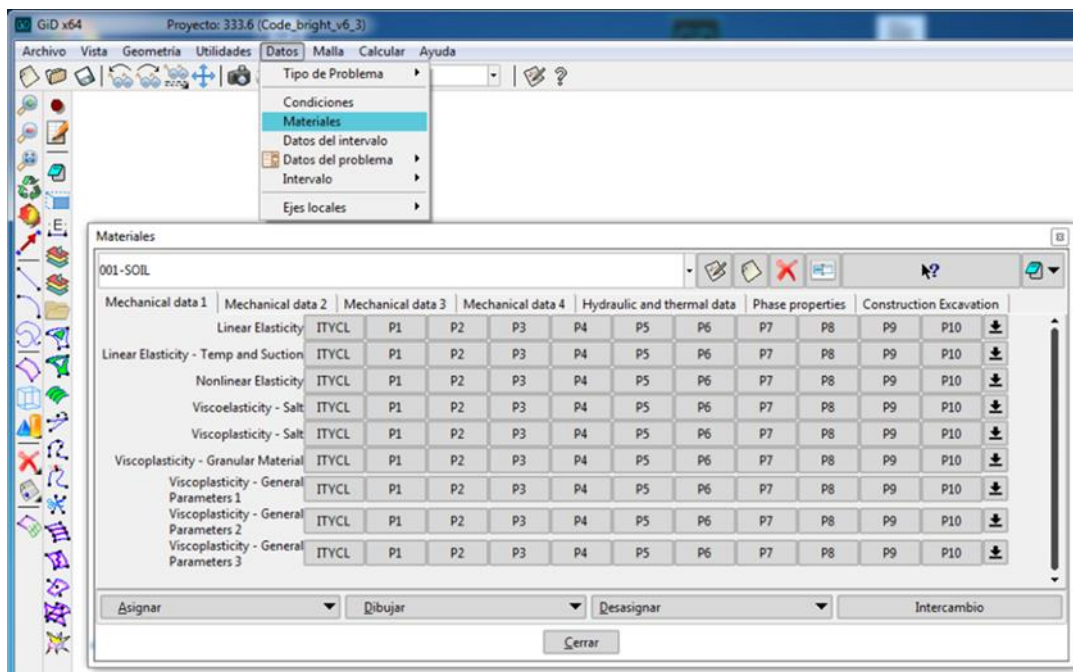



Figura 18.



En primer lugar crearemos tres tipos de materiales, para nuestra simulación mencionados anteriormente. Por defecto al programa nos ofrece un material con el nombre “soil”

14. Seleccionamos el botón “**crear nuevo material**” de la ventana materiales, icono



15. Nos aparece una ventana “Nuevo material”, introducimos el nombre del nuevo material “001 SOIL” y seleccionamos *Acceptar*.
16. En el cuadro de mensajes nos aparece el siguiente mensaje: “Entrado Nuevo material. Abandonando”
17. Seleccionamos con el ratón al lado del nombre la flechita negra que nos ofrece un menú desplegable con el nombre de los materiales, clicamos encima de “*soil*” y lo seleccionamos, seguidamente apretamos el botón “borrar material” icono  , para eliminar el material, nos aparece una ventana de confirmación de eliminación, clicamos “*si*”. Nos aparece el siguiente mensaje en el cuadro de mensajes, “Material soil borrado y designado a 0 entidades”

Creamos los dos materiales que nos faltan.

1. Seleccionamos el botón “*crear nuevo material*” de la ventana materiales, icono .
2. Nos aparece una ventana “Nuevo material”, introducimos el nombre del nuevo material “002INTERFASE” y seleccionamos *Acceptar*, Nos aparece el siguiente mensaje en el cuadro de mensajes, “Entrado un nuevo material. Abandonando”
3. Seleccionamos el botón “*crear nuevo material*” de la ventana materiales, icono .
4. Nos aparece una ventana “Nuevo material”, introducimos el nombre del nuevo material “003REFUERZO” y seleccionamos *Acceptar*, Nos aparece el siguiente mensaje en el cuadro de mensajes, “Entrado un nuevo material. Abandonando”

Asignar las propiedades de los materiales

1. Seleccionamos con el ratón al lado del nombre del material, la flechita negra, que nos ofrece un menú desplegable con el nombre de los materiales, clicamos encima de “*001SOIL*”
2. Seleccionamos la pestaña “*Mechanical data 1*”
3. Haga clic en alguno de los botones que se encuentran al lado de “*Linear elasticity*” y aparecerá la siguiente tabla:

ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10

El campo ITYCL contiene un indicador para definir el tipo de relación a tener en cuenta para la ley constitutiva. Los campos de P1 a P10 contienen los parámetros de la relación.

ITYCL y P1 a P10 dependen de la ley constitutiva. Mencionada anteriormente.

4. Rellenamos las casillas haciendo doble “*click*” encima del parámetro que queramos modificar, y modificamos los parámetros de la siguiente manera:

P1	E	MPa	Modulo de Young
P2	$dE/d\Phi$	MPa	Variacion del modulo de Young con la porosidad
P3	ν		Ratio de Poisson
P4	Φ_0		Porosidad inicial
P5	Φ_{min}		Porosidad minima
P6	E_{min}	MPa	Modulo elastico minimo

ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	50		0.35							
	MPa									

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \nu = \frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}}$$

- Haga clic en alguno de los botones que se encuentran al lado de “*Viscoplasticity-Granular Material*” en la misma pestaña “*Mechanical data 1*”
- Rellenamos las casillas haciendo doble “*click*” encima del parámetro que queramos modificar, y modificamos los parámetros de la siguiente manera:

P1	m		Potencia de tensión
P2	Γ_0	s^{-1}	Viscosidad
P3	Q	$Jmol^{-1}$	Energia de activacion
P4	Void		
P5	c'	MPa	Cohesion
P6	Void		
P7	α		Parametro reductor de la dilatancia(Oscila entre 0 y 1) (valor predeterminado = 1)
P8	Void		
P9	Void		
P10	δ		Equivalente a M

ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	3	1	0	0	0.00001	0	0.25	0	0	1.64
		s^{-1}	mol^{-1}		MPa					

- Seleccionamos la pestaña “*Phaseproperties*” Haga clic en alguno de los botones que se encuentran al lado de “*Solid PhaseProperties*”
- Rellenamos las casillas haciendo doble “*click*” encima del parámetro que queramos modificar, y modificamos los parámetros de la siguiente manera:

P1	C_s	J kg ⁻¹ K ⁻¹	Calor específico de fase sólida (por defecto: 1000 J kg ⁻¹ K ⁻¹)
P2	ρ_s	Kg/m ³	Densidad de la fase sólida (por defecto: 2700 kg/m ³)
P3	α_s	°C ⁻¹	Coefficiente de expansión térmica lineal para granos (no volumétrico)

			(valor predeterminado = 0.0). Esto no produce expansión térmica del medio.
P4	To	°C	Temperatura de referencia para expansión térmica (por defecto: 40)
P5			
P6			
P7	1/Ks	MPa-1	Compresibilidad de la fase sólida contra los cambios de tensión media (defecto = 0)
P8	p_0	MPa	Presión de referencia para la compresibilidad sólida (por defecto: 0,1 MPa)

ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1		2190								
		Kg/m ³								

9. Seleccionamos la pestaña asignar: *Asignar / Volúmenes*.
10. Aparece una ventana “*los datos han cambiado desea grabarlos*” Seleccionamos “*Si*” en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Entrar volúmenes para asignar al material: 001SOIL”
11. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo seleccionamos la pieza entera**, sin problemas ya que trabajamos solo con la capa “001SOIL”, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 8 nuevos volúmenes a la selección. Entrar más volúmenes. (Escape para terminar), (Figura 19).

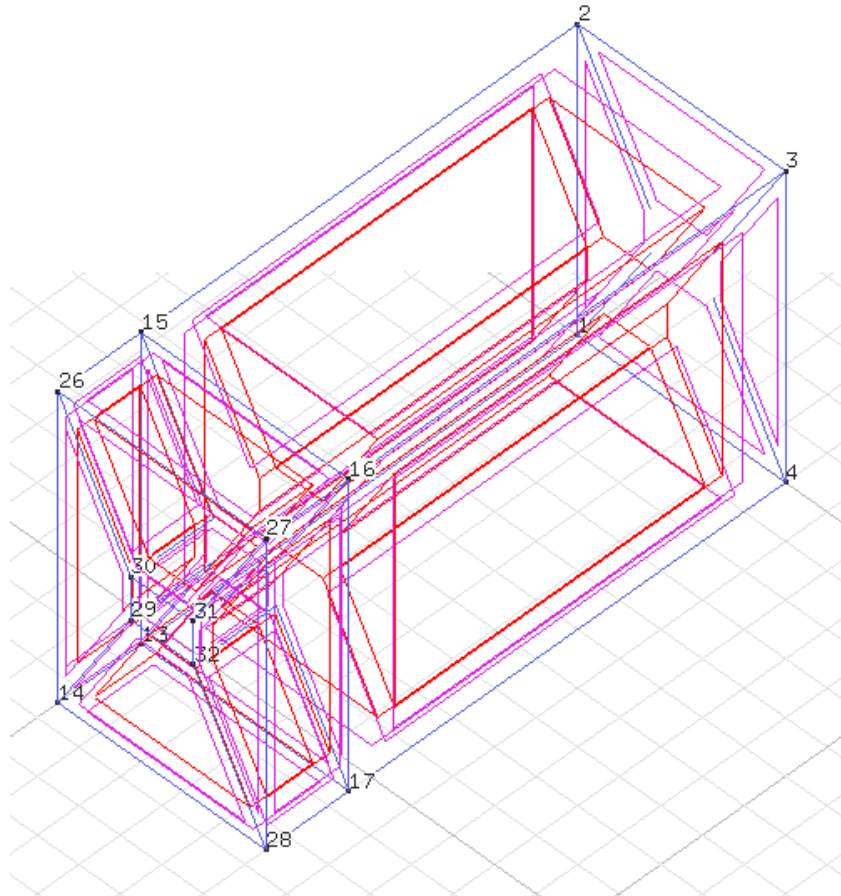




Figura 19.

12. Pulse **Esc**.
13. en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Asignadas 8 nuevas entidades al material: 001SOIL”

Asignar las propiedades a la interfase:

12. Hacemos *click* sobre el icono de capas  que se encuentra debajo del menú desplegable.
13. Hacemos *click* sobre el icono de apagar y encender capas , de las capas “001SOIL” y “003REFUERZO” para apagarlas, y encendemos la capa “002INTERFASE”, en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “La capa 001SOIL está apagada, La capa 003REFUERZO está apagada, se apagaran estas capas y podremos trabajar únicamente con la capa “002INTERFASE” en la interfaz.
14. Clicamos **Cerrar** en la ventana de capas.
14. En la ventana materiales, seleccionamos con el ratón al lado del nombre del material, la flechita negra, que nos ofrece un menú desplegable con el nombre de los materiales ,clicamos encima de “002INTERFASE”
15. Seleccionamos la pestaña “**Mechanical data 1**”

16. Haga clic en alguno de los botones que se encuentran al lado de “**Linear elasticity**”.
17. Rellenamos las casillas haciendo doble “**click**” encima del parámetro que queramos modificar, y modificamos los parámetros de la siguiente manera:

P1	E	MPa	Modulo de Young
P2	$dE/d\Phi$	MPa	Variacion del modulo de Young con la porosidad
P3	ν		Ratio de Poisson
P4	Φ_0		Porosidad inicial
P5	Φ_{min}		Porosidad minima
P6	E_{min}	MPa	Modulo elastico minimo

ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	50		0.35							
	MPa									

18. Haga clic en alguno de los botones que se encuentran al lado de “**Viscoplasticity-Granular Material**” en la misma pestaña “**Mechanical data 1**”
19. Rellenamos las casillas haciendo doble “**click**” encima del parámetro que queramos modificar, y modificamos los parámetros de la siguiente manera:

P1	m		Potencia de tensión
P2	Γ_0	s^{-1}	Viscosidad
P3	Q	$Jmol^{-1}$	Energia de activacion
P4	Void		
P5	c'	MPa	Cohesion
P6	Void		
P7	α		Parametro reductor de la dilatancia(Oscila entre 0 y 1) (valor predeterminado = 1)
P8	Void		
P9	Void		
P10	δ		Equivalente a M

ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	3	1	0	0	0.00001	0	0.25	0	0	1.64
		s^{-1}	mol^{-1}		MPa					

20. Seleccionamos la pestaña “**Phase properties**” Haga clic en alguno de los botones que se encuentran al lado de “**Solid Phase Properties**”
21. Rellenamos las casillas haciendo doble “**click**” encima del parámetro que queramos modificar, y modificamos los parámetros de la siguiente manera:

P1	C_s	J kg ⁻¹ K ⁻¹	Calor específico de fase sólida (por defecto: 1000 J kg ⁻¹ K ⁻¹)
----	-------	------------------------------------	---

P2	ρ_s	Kg/m ³	Densidad de la fase sólida (por defecto: 2700 kg/m ³)
P3	α_s	°C-1	Coefficiente de expansión térmica lineal para granos (no volumétrico) (valor predeterminado = 0.0). Esto no produce expansión térmica del medio.
P4	T ₀	°C	Temperatura de referencia para expansión térmica (por defecto: 40)
P5			
P6			
P7	1/Ks	MPa-1	Compresibilidad de la fase sólida contra los cambios de tensión media (defecto = 0)
P8	p ₀	MPa	Presión de referencia para la compresibilidad sólida (por defecto: 0,1 MPa)

ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1		2190								
		Kg/m ³								

22. Seleccionamos la pestaña asignar: *Asignar / Volúmenes*.
23. Aparece una ventana “*los datos han cambiado desea grabarlos*” Seleccionamos “*Si*” en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Entrar volúmenes para asignar al material: 002INTERFASE”
24. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo seleccionamos la pieza entera**, sin problemas ya que trabajamos solo con la capa “002INTERFASE”, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 4 nuevos volúmenes a la selección. Entrar más volúmenes. (Escape para terminar), (Figura 20).

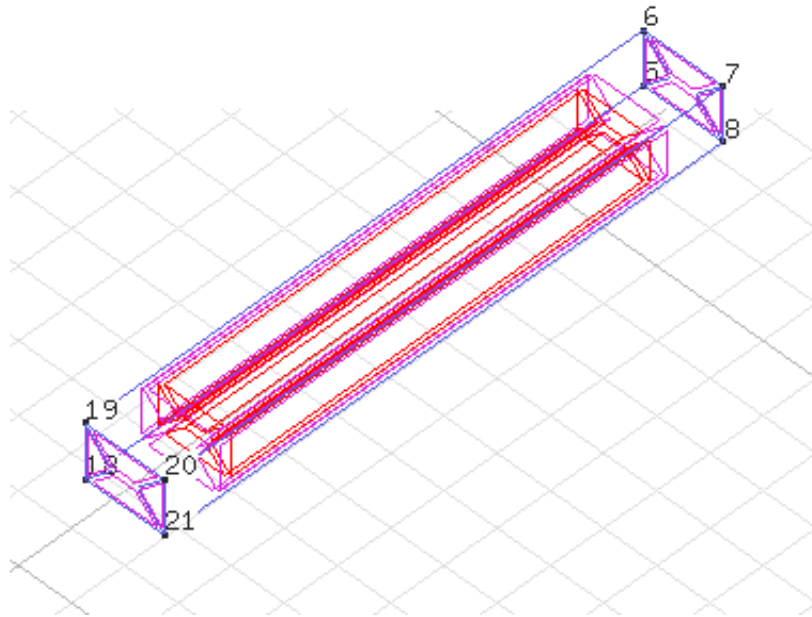




Figura 20.

25. Pulse **Esc**.
26. en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Asignadas 8 nuevas entidades al material: 002INTERFASE”

Asignar las propiedades al refuerzo:

1. Hacemos **click** sobre el icono de capas  que se encuentra debajo del menú desplegable.
2. Hacemos **click** sobre el icono de apagar y encender capas , de las capas “001SOIL” y “002INTERFASE” para apagarlas, y encendemos la capa “003REFUERZO”, en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “La capa 001SOIL está apagada, La capa 002INTERFASE está apagada, se apagaran estas capas y podremos trabajar únicamente con la capa “003REFUERZO” en la interfaz.
3. Clicamos **Cerrar** en la ventana de capas.
4. En la ventana materiales, seleccionamos con el ratón al lado del nombre del material, la flechita negra, que nos ofrece un menú desplegable con el nombre de los materiales, clicamos encima de “003REFUERZO”
27. Seleccionamos la pestaña “**Mechanical data I**”
28. Haga clic en alguno de los botones que se encuentran al lado de “**Linear elasticity**”.
29. Rellenamos las casillas haciendo doble “**click**” encima del parámetro que queramos modificar, y modificamos los parámetros de la siguiente manera:

P1	E	MPa	Modulo de Young
P2	$dE/d\Phi$	MPa	Variacion del modulo de Young con la porosidad
P3	ν		Ratio de Poisson
P4	Φ_0		Porosidad inicial
P5	Φ_{min}		Porosidad minima

P6	Emin	MPa	Modulo elastico minimo
----	------	-----	------------------------

ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	210000		0.35							
	MPa									

30. Seleccionamos la pestaña “*Phase properties*” Haga clic en alguno de los botones que se encuentran al lado de “*Solid Phase Properties*”
31. Rellenamos las casillas haciendo doble “*click*” encima del parámetro que queramos modificar, y modificamos los parámetros de la siguiente manera:

P1	C_s	J kg ⁻¹ K ⁻¹	Calor específico de fase sólida (por defecto: 1000 J kg ⁻¹ K ⁻¹)
P2	ρ_s	Kg/m ³	Densidad de la fase sólida (por defecto: 2700 kg/m ³)
P3	α_s	°C ⁻¹	Coefficiente de expansión térmica lineal para granos (no volumétrico) (valor predeterminado = 0.0). Esto no produce expansión térmica del medio.
P4	To	°C	Temperatura de referencia para expansión térmica (por defecto: 40)
P5			
P6			
P7	1/Ks	MPa ⁻¹	Compresibilidad de la fase sólida contra los cambios de tensión media (defecto = 0)
P8	p_o	MPa	Presión de referencia para la compresibilidad sólida (por defecto: 0,1 MPa)

ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1		7653								
		Kg/m ³								

32. Seleccionamos la pestaña asignar: *Asignar / Volúmenes*.
33. Aparece una ventana “*los datos han cambiado desea grabarlos*” Seleccionamos “*Si*” en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Entrar volúmenes para asignar al material: 003REFUERZO”
34. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo seleccionamos la pieza entera**, sin problemas ya que trabajamos solo con la capa “003REFUERZO”, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 1 nuevos volúmenes a la selección. Entrar más volúmenes. (Escape para terminar), (Figura 21).

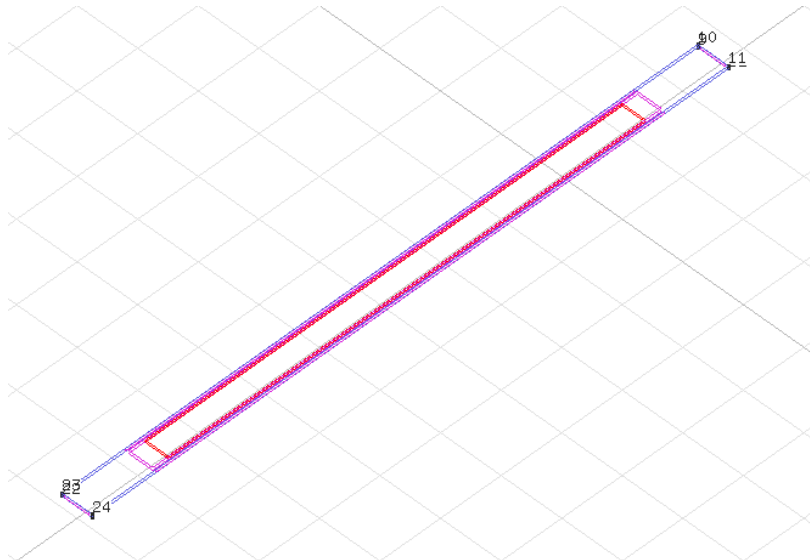






Figura 21.

35. Pulse **Esc**.
36. en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Asignadas 1 nuevas entidades al material: 003REFUERZO”
37. Cerramos ventana copiar.
38. Guardamos .

Encender todas las capas

1. Hacemos *click* sobre el icono de capas  que se encuentra debajo del menú desplegable.
2. Hacemos *click* sobre el icono de apagar y encender capas , de las capas “001SOIL”, “002INTERFASE” y “003REFUERZO” y encendemos todas las capas.
3. Clicamos **Cerrar** en la ventana de capas.

Apagamos las etiquetas.

39. Seleccionamos en el menú desplegable: **Vista / Etiquetas / Apagada**
40. Guardamos .

2.1.2.1.3. HERRAMIENTAS

Visualización de los materiales

Para visualizar los materiales en nuestro volumen disponemos de la opción, dibujar en la ventana de materiales, esta opción dibuja de un color el material seleccionado para todas las entidades que tienen asignado el material requerido. Es posible dibujar uno o dibujar todos los materiales.

1. seleccionamos en la ventana de materiales. *Dibujar/001SOIL*o seleccionamos *Dibujar/todos los materiales* si queremos dibujar más de un material, en nuestro caso los materiales quedaran asignados de la siguiente forma: (Figura 22)

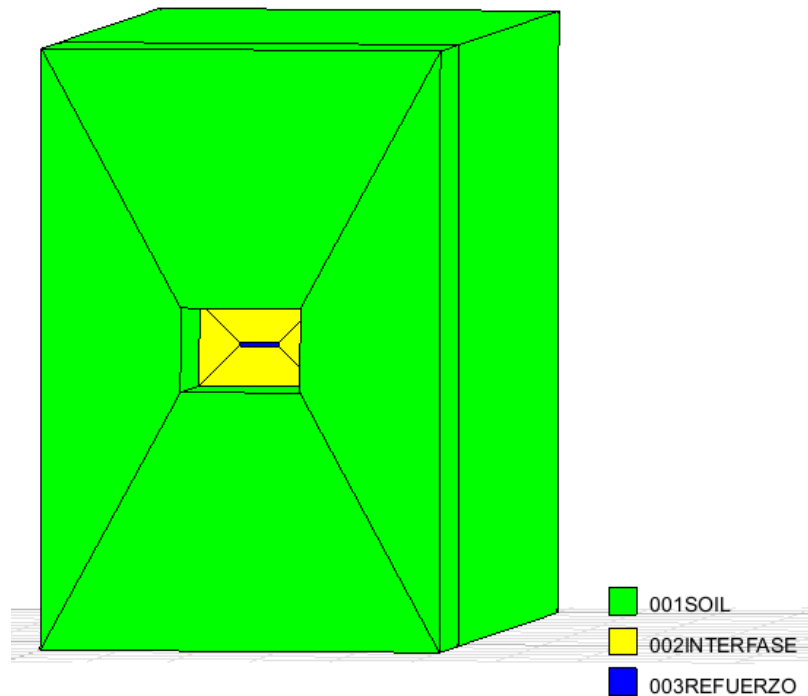


Figura 22.

Desasignar materiales

Las entidades asignadas pueden ser desasignadas utilizando el botón “desasignar” y seleccionando la superficie.

1. Seleccionamos en la ventana de materiales. *Desasignar/001SOIL*o seleccionamos *Desasignar/todos los materiales*

2.1.2.2. CONDICIONES

2.1.2.2.1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones son todas las propiedades de un problema, excluyendo materiales, que pueden ser asignados a una entidad. En este concepto se han incluido varios tipos de condiciones, de las cuales para resolver el problema mecánico de pullout-test nosotros utilizaremos las siguientes:

- Fuerza / Condiciones límite de desplazamiento (“Condiciones de frontera mecánica”)
- Incógnitas iniciales
- Porosidad inicial
- Estrés inicial

Para la construcción de la condición se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- Las condiciones de incógnitas iniciales, la porosidad, el esfuerzo inicial se asignan con las entidades prioridad en el siguiente orden: Puntos, Líneas, Superficies y Volúmenes (es decir, el nodo toma las condiciones de los puntos rechazando las condiciones asignadas a líneas anteriormente).
- Si ya se ha generado una malla, para cualquier cambio en las asignaciones de condición, es necesario volver a acoplar de nuevo para transferir estas nuevas condiciones a la malla.

Ecuación y resumen variable

ECUACIÓN	NOMBRE DE LA VARIABLE	VARIABLE
Equilibrio de tensiones	Desplazamientos	U

Descripción de las condiciones:

Dependiendo de la entidad geométrica en la que debe aplicarse la condición, se encuentran las siguientes opciones, y siempre refiriéndonos a nuestro problema, nosotros asignaremos condiciones a superficies y volúmenes:

Condiciones		
Las superficies (generalmente 3-D)	Force / Disp B.C.	<ul style="list-style-type: none"> • Forces Nodal forces (MN) • Boundary stress (MPa)
	InitialUnknowns	<ul style="list-style-type: none"> • Constante • Lineal
	InitialPorosity	
	Initial Stress	<ul style="list-style-type: none"> • Constante • Lineal
Volúmenes (3-D)	Force / Disp B.C.	<ul style="list-style-type: none"> • Forces Nodal forces (MN) • Boundary stress (MPa)
	InitialUnknowns	<ul style="list-style-type: none"> • Constante • Lineal
	InitialPorosity	
	Initial Stress	<ul style="list-style-type: none"> • Constante • Lineal

Condiciones de fuerza / Condiciones límite de desplazamiento

Las condiciones de contorno mecánico sólo existen si se resuelve el problema mecánico (Resolver el desplazamiento).

Disponemos de las siguientes opciones para la entrada de datos en la ventana de condiciones, en el apartado de Fuerzas:

Condición:	
------------	--

Fuerza / esfuerzo de la dirección X	Valor en MPa o MPa / m ²
Fuerza / esfuerzo de la dirección Y	Valor en MPa o MPa / m ²
Fuerza / esfuerzo de la dirección Z	Valor en MPa o MPa / m ²
X tasa de desplazamiento prescrita	Valor en m / s
Y tasa de desplazamiento prescrita	Valor en m / s
Z tasa de desplazamiento prescrita	Valor en m / s
dirección prescrita en X	= 1 significa que la velocidad de desplazamiento será prescrita en la dirección X. El valor se da arriba.
dirección prescrita en Y	= 1 significa que la velocidad de desplazamiento será prescrita en la dirección Y. El valor se da arriba.
dirección prescrita en Z	= 1 significa que la velocidad de desplazamiento será prescrita en la dirección Z. El valor se da arriba.
Γ (multiplicador)	Las unidades de este parámetro dependen de si se aplica fuerza o tensión.
Δfx° obtenido como carga en rampa durante el intervalo actual.	
Δfy° obtenido como carga en rampa durante el intervalo actual.	
Δfz° obtenido como carga en rampa durante el intervalo actual.	

Desplazamientos iniciales desconocidos

Los valores iniciales de las incógnitas se pueden asignar en superficies / volúmenes de la geometría. Una distribución constante o lineal está disponible.

Distribución:	Constante / Lineal
Desplazamiento de Ux	Valor en m
Desplazamiento de Yx	Valor en m
Desplazamiento de Zx	Valor en m
Presión del líquido: Pl	Valor en MPa
Presión de gas: Pg	Valor en MPa
Temperatura: T	Valor en °C
Concentración	Valor en kg / kg

Porosidad inicial

Se puede asignar un valor inicial constante de porosidad en las superficies / volúmenes de la geometría. El valor de porosidad debe ser menor que 1.

Estrés inicial

Los valores iniciales de las tensiones y variables históricas (dependiendo del tipo de modelo constitutivo mecánico) se pueden asignar sobre superficies / volúmenes sobre la geometría. Una distribución constante o lineal está disponible.

Si la distribución es lineal, se requiere información sobre las tensiones y las variables de la historia en el punto final y las coordenadas de los puntos inicial y final.

		refuerzo	Soil-interfase
Distribución:	Constante / Lineal		
Tensión en X	Valor en MPa	-0.01	-0.0053
Tensión en Y	Valor en MPa	-0.01	-0.0053
Tensión en Z	Valor en MPa	-0.01	-0.018
Tensión en XY	Valor en MPa		
Tensión en XZ	Valor en MPa		
Tensión en YZ	Valor en MPa		
Historia variable 1	(Depende del modelo constitutivo)		
Historia variable 2	(Depende del modelo constitutivo)		

Asignar condición:

Se asigna una condición a las entidades con los valores de campo dados y que introducimos en la ventana de condiciones. Se asigna desde el comando Asignar.

Opción Desasignar borra todas las entidades asignadas de esta condición en particular.

Las condiciones pueden ser asignadas tanto en la geometría como en la malla, pero es conveniente asignarlas a la geometría y las condiciones serán transferidas a la malla.

Si ya se ha generado una malla, para cualquier cambio en las asignaciones de condición, es necesario volver a acoplar de nuevo la malla.

2.1.2.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El problema que abordamos es un problema mecánico, con incógnitas de desplazamientos. En el cual tendremos que definir las siguientes condiciones.

- Fuerza / Condiciones límite de desplazamiento (“Condiciones de frontera mecánica”)
- Incógnitas iniciales
- Porosidad inicial
- Estrés inicial

Definir condiciones

1. Seleccionamos en menú desplegable: *Datos/Condiciones*
2. Aparecerá la ventana siguiente: (Figura 23).

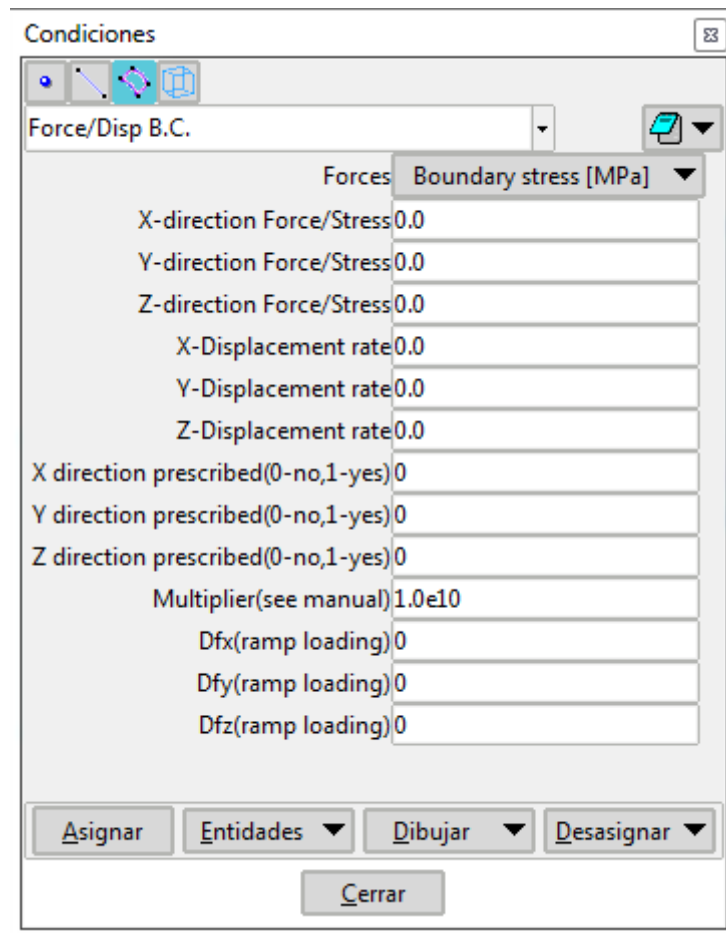



Figura 23.

Restricciones de desplazamientos:

Restricción de los desplazamientos en la dirección del eje X.

1. Haga clic en el icono de “*superficie*” , localizado en la parte superior izquierda de la ventana de condiciones.
2. Elegimos la opción “*Force/Disp B.C*” en el menú desplegable de la parte superior de la ventana de condiciones.
3. Seleccione “*Boundary stress*” en el menú desplegable “*Forces*”.
4. Escriba “1” en la casilla “*X-Direction prescribe (0-no, 1-yes)*”
5. Escriba “0” en la casilla “*X-Displacementrate*”. demás parámetros dejamos igual, como se muestra en la (figura 24).
6. Los pasos 4 y 5 son para impedir el desplazamiento.
7. Deje el valor que aparece por defecto en la casilla “*Multiplier (see manual)*”
8. Los valores típicos para el parámetro “*Multiplier*”, están entre $1e6$ y $1e10$.

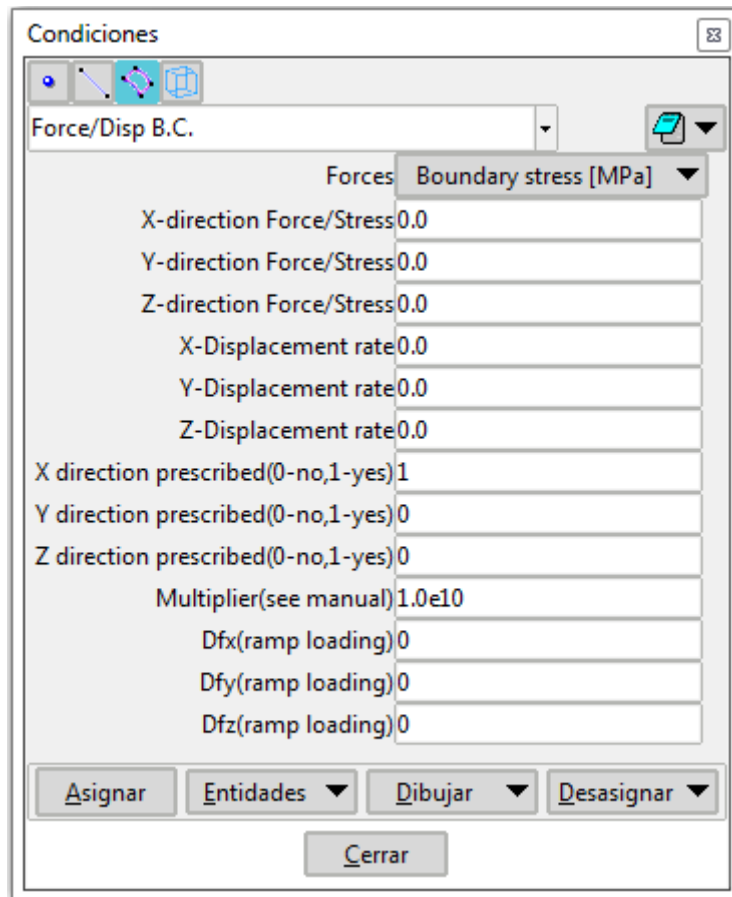


Figura 24.

9. Haga clic en el botón “*Asignar*”.
10. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo**, haga “**clic**” en las superficies ortogonales a la dirección del eje X de las paredes exteriores del volumen como se muestra en la figura 25, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 8 nuevos superficies a la selección. Entrar más superficies. (Escape para terminar).
11. Pulse **Esc**.
12. en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Asignadas 8 nuevas superficies a la condición: al material: Surface_Force/Disp_B.C.”

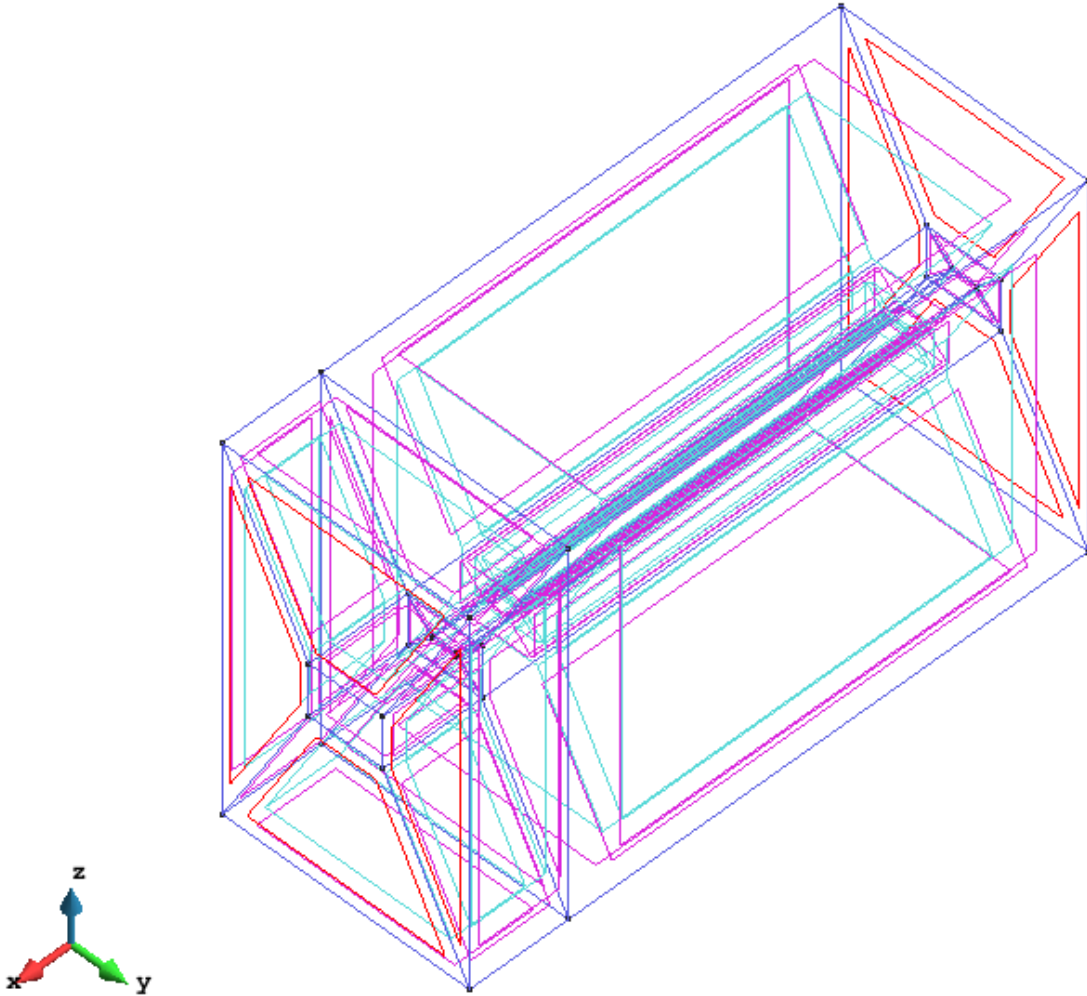


Figura 25.

Visualizar las condiciones asignadas:

13. Seleccionamos en el menú desplegable en la ventana condiciones: *Dibujar / Force/Disp B.C*, nos aparecerá el siguiente dibujo: (Figura 26)
14. Pulse "*Terminar*".

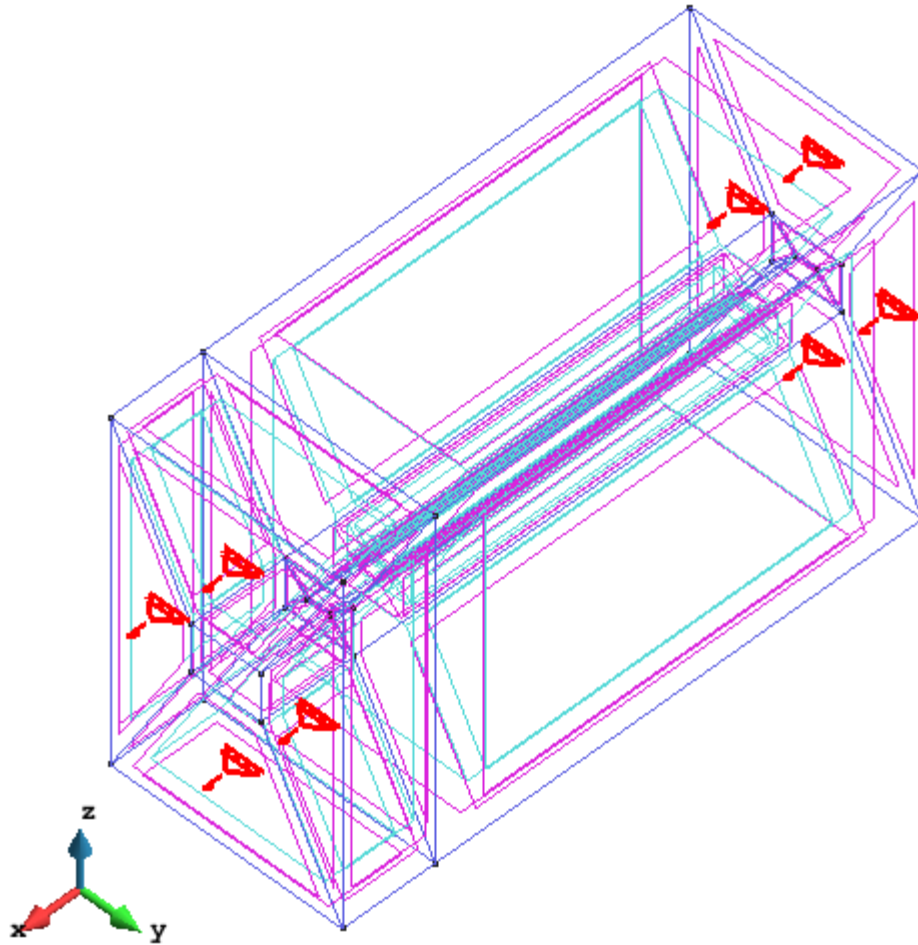



Figura 26.

Restricciones de desplazamientos:

Restricción de los desplazamientos en la dirección del eje Y.

1. Haga clic en el icono de “superficie” , localizado en la parte superior izquierda de la ventana de condiciones.
2. Elegimos la opción “Force/Disp B.C” en el menú desplegable de la parte superior de la ventana de condiciones.
3. Seleccione “Boundary stress” en el menú desplegable “Forces”.
4. Escriba “1” en la casilla “Y-Direction prescribe (0-no, 1-yes)”
5. Escriba “0” en la casilla “Y-Displacementrate”. demás parámetros dejamos igual, como se muestra en la figura 26.
6. Los pasos 4 y 5 son para impedir el desplazamiento.
7. Deje el valor que aparece por defecto en la casilla “Multiplier (see manual)”
8. Los valores típicos para el parámetro “Multiplier”, están entre $1e6$ y $1e10$.
9. Haga clic en el botón “Asignar”.
10. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo**, haga “clic” en las superficies ortogonales a la dirección del eje Y de las paredes exteriores del volumen y en las paredes ortogonales al eje Y del hueco frontal del volumen como se muestra en la figura 27, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está

seleccionada). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 8 nuevas superficies a la selección. Entrar más superficies. (Escape para terminar).

11. Pulse **Esc**.

12. en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Asignadas 8 nuevas superficies a la condición: al material: Surface_Force/Disp_B.C.”

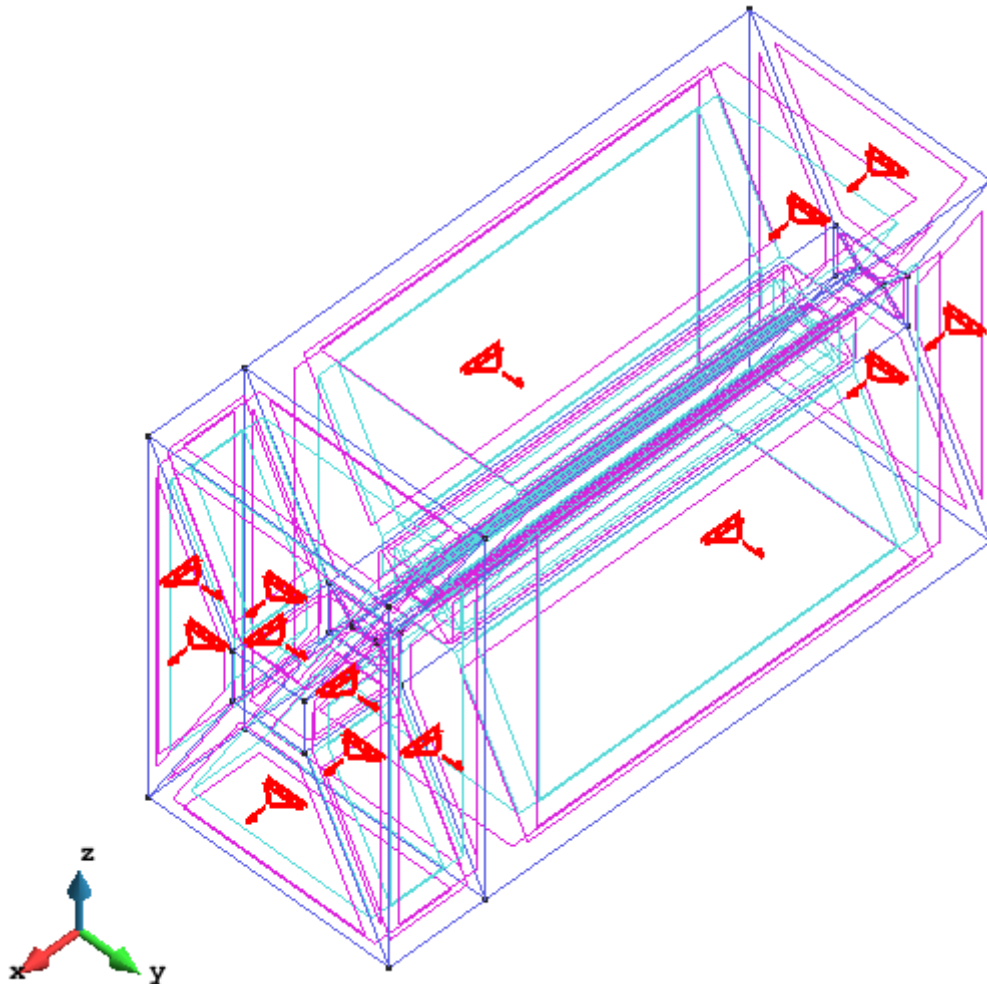



Figura 27.

Restricciones de desplazamientos:

Restricción de los desplazamientos en la dirección del eje Z.

1. Haga clic en el icono de “superficie” , localizado en la parte superior izquierda de la ventana de condiciones.
2. Elegimos la opción “Force/Disp B.C” en el menú desplegable de la parte superior de la ventana de condiciones.
3. Seleccione “Boundary stress” en el menú desplegable “Forces”.
4. Escriba “1” en la casilla “Z-Direction prescribe (0-no, 1-yes)”
5. Escriba “0” en la casilla “Z-Displacementrate”. demás parámetros dejamos igual, como se muestra en la figura 27.
6. Los pasos 4 y 5 son para impedir el desplazamiento.
7. Deje el valor que aparece por defecto en la casilla “Multiplier (see manual)”

8. Los valores típicos para el parámetro "*Multiplier*", están entre $1e6$ y $1e10$.
9. Haga clic en el botón "*Asignar*".
10. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo**, haga "**clic**" en las superficies ortogonales a la dirección del eje Z de las paredes exteriores del volumen y en las paredes ortogonales al eje Z del hueco frontal del volumen como se muestra en la figura 28, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: "agregado 8 nuevos superficies a la selección. Entrar más superficies. (Escape para terminar).
11. Pulse **Esc**.
12. en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: "Asignadas 8 nuevas superficies a la condición: al material: Surface_Force/Disp_B.C."

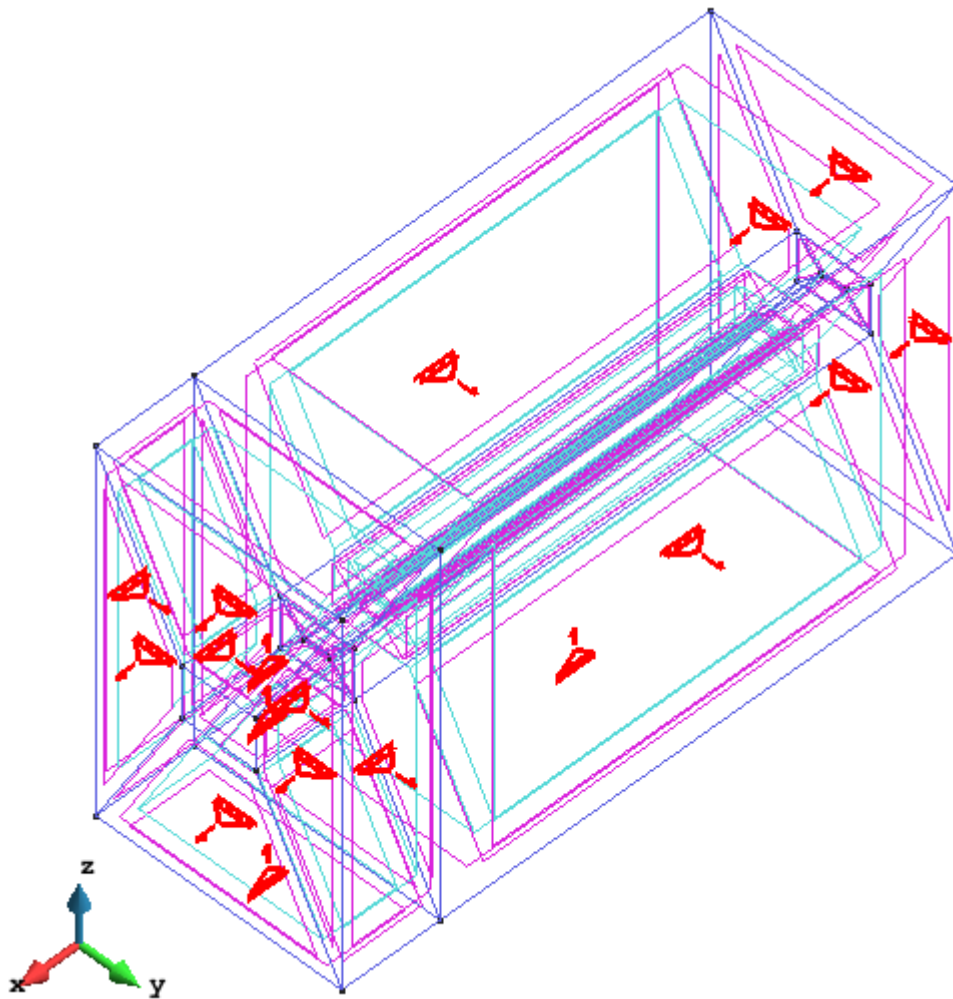



Figura 28.

Carga uniformemente repartida:


Necesitamos aplicar una carga uniformemente repartida en la parte superior del volumen.

1. Haga clic en el icono de “*superficie*” , localizado en la parte superior izquierda de la ventana de condiciones.
2. Elegimos la opción “*Force/Disp B.C*” en el menú desplegable de la parte superior de la ventana de condiciones.
3. Seleccione “*Boundary stress*” en el menú desplegable “*Forces*”.
4. Escriba “*-0.0001*” en la casilla “*Dfz(ramploading)*” (Carga en rampa durante el intervalo actual). Este valor corresponde a una carga uniforme ‘p’ de 1Mpa. El signo negativo indica la dirección de la carga. En este caso, la carga es vertical (dirección Z) y orientada hacia abajo (signo negativo “-“ si la dirección de la carga va hacia abajo)
5. Deje el valor que aparece por defecto en la casilla “*Multiplier (see manual)*”
6. Los valores típicos para el parámetro “*Multiplier*”, están entre $1e6$ y $1e10$.
7. Haga clic en el botón “*Asignar*”.
8. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo**, haga “**clic**” en las superficies ortogonales a la dirección del eje Z de las paredes superiores del volumen como se muestra en la figura 24, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 8 nuevas superficies a la selección. Entrar más superficies. (Escape para terminar).”
9. Pulse **Esc**.
10. en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Asignadas 8 nuevas superficies a la condición: al material: Surface_Force/Disp_B.C.”

Incógnitas iniciales:

Desplazamientos iniciales desconocidos, en esta simulación, las incógnitas primarias son los desplazamientos nodales. En este caso, son iguales a cero (0) a lo largo de la geometría.

Los valores iniciales de las incógnitas se pueden asignar en superficies y volúmenes de la geometría. Una distribución constante o lineal está disponible.

1. Haga clic en el icono de “*volumen*” , localizado en la parte superior izquierda de la ventana de condiciones.
2. Elegimos la opción “*Initialunknowns*” en el menú desplegable de la parte superior de la ventana de condiciones.
3. Seleccione “*Constante*” en el menú desplegable “*Distribución*”.
4. Escriba “*0*” en las casillas de “*Ux[m]*”, “*Uy[m]*” y “*Uz[m]*”. (figura 29).

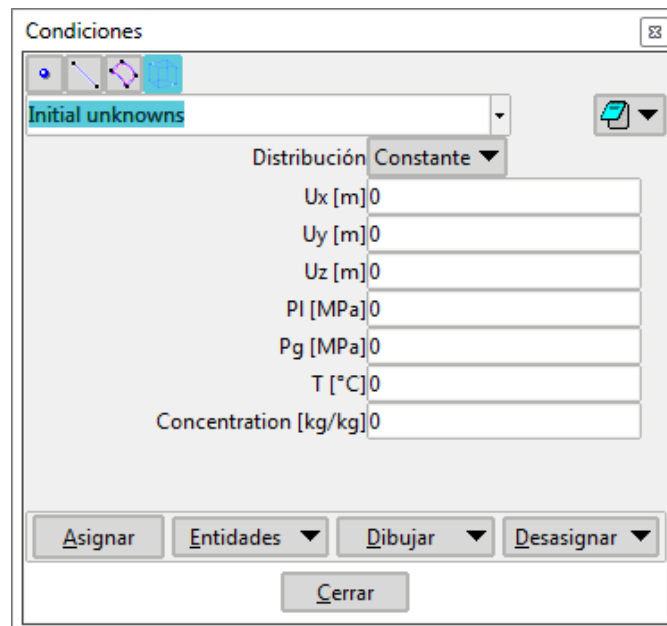


Figura 29.

5. Haga clic en el botón “*Asignar*”.
6. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo**, haga “**clik**” en todos los volúmenes (figura 30), una vez seleccionada la figura los volúmenes pasan a ser rojos, (significa que está seleccionado). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 8 nuevos superficies a la selección. Entrar más superficies. (Escape para terminar).

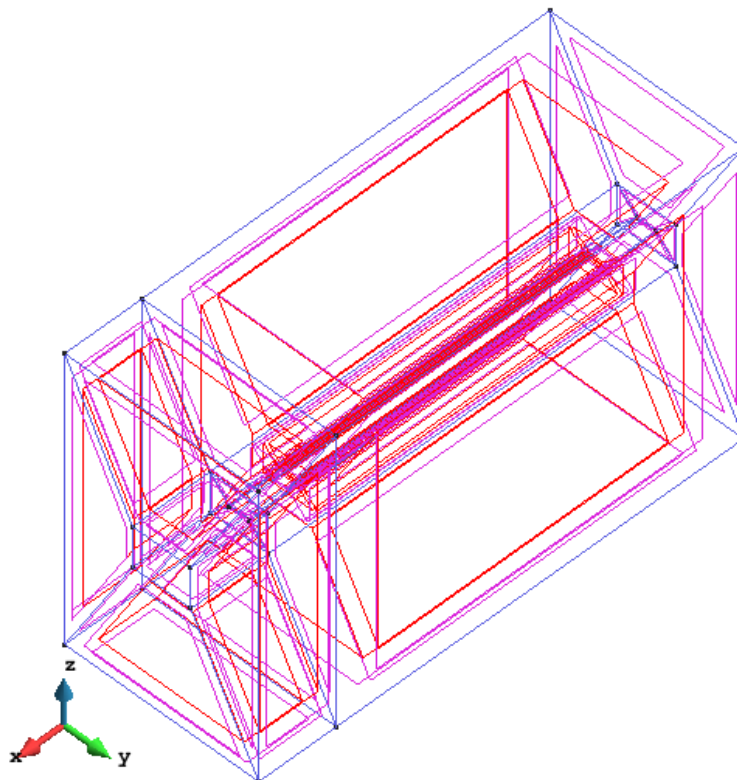


Figura 30.

7. Pulse **Esc**.
8. en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Asignadas 8 nuevas superficies a la condición: al material: Surface_Force/Disp_B.C.”
9. Seleccionamos en el menú desplegable en la ventana condiciones: **Dibujar /Initialunknowns**, nos aparecerá el siguiente dibujo: (Figura 31)
10. Pulse “**Terminar**”.

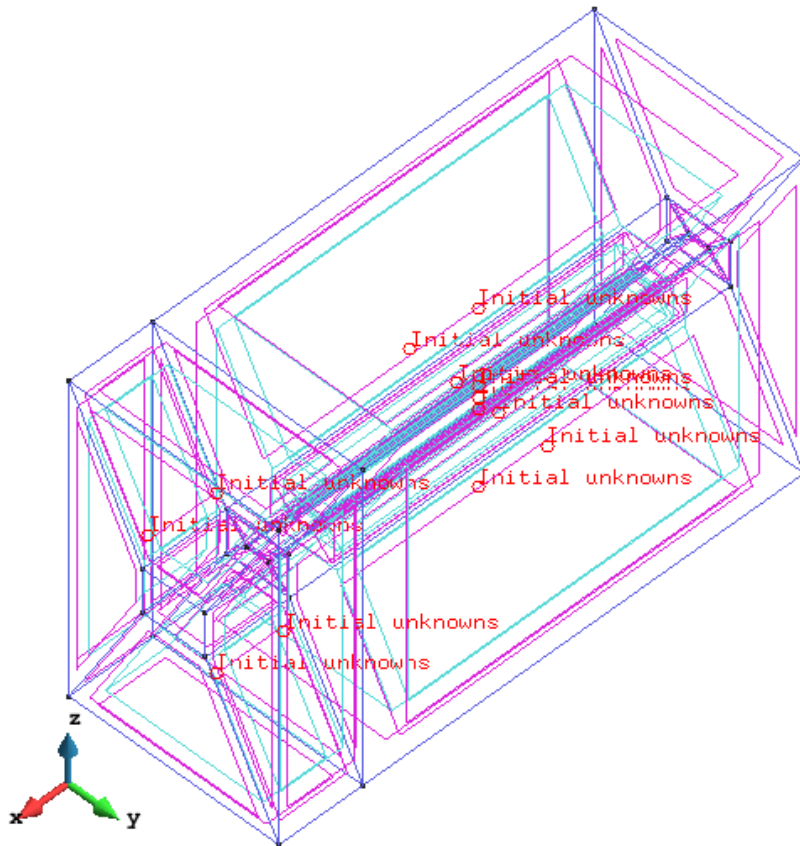



Figura 31.

Nota: en la práctica asignar 0 no es necesario.

Porosidad Inicial:

1. Haga clic en el icono de “**volumen**” , localizado en la parte superior izquierda de la ventana de condiciones.
2. Elegimos la opción “**Initialporosity**” en el menú desplegable de la parte superior de la ventana de condiciones.
3. Escriba “**0.3**” en las casillas de “**Porosidad**”. (figura 32).

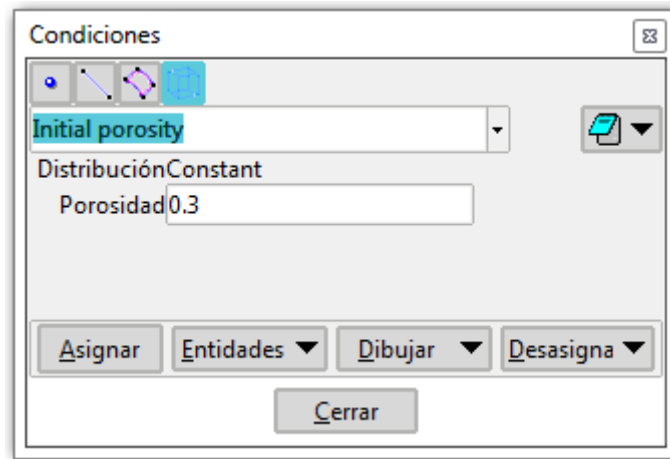


Figura 32.

4. Haga clic en el botón “Asignar”.
5. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo**, haga “clic” en todos los volúmenes, una vez seleccionada la figura los volúmenes pasan a ser rojos, (significa que está seleccionado). en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “agregado 8 nuevos superficies a la selección. Entrar más superficies. (Escape para terminar).
6. Pulse **Esc**.
7. en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Asignadas 8 nuevas superficies a la condición: al material: Surface_Force/Disp_B.C.”
8. Seleccionamos en el menú desplegable en la ventana condiciones: **Dibujar /InitialPorosity**, nos aparecerá el siguiente dibujo: (Figura 33)
9. Pulse “Terminar”.

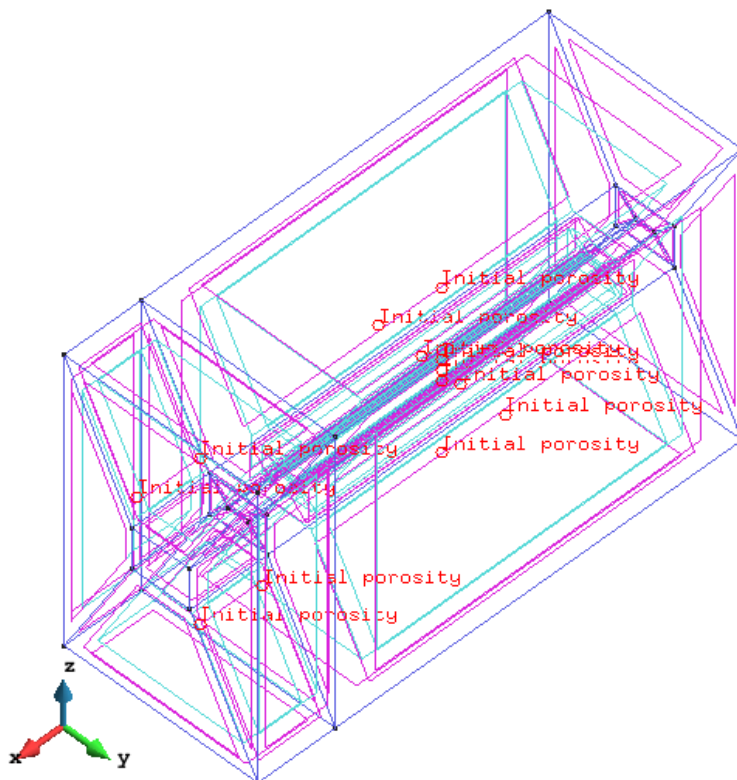


Figura 33.

Visualización de las condiciones

Para visualizar los materiales en nuestro volumen disponemos de la opción, dibujar en la ventana de condiciones.

1. Haciendo clic en *Dibujar/Fuerzas/Disp B.C*, te permite visualizar la condición aplicada representada en una flecha roja.
2. Esta condición se puede anular haciendo clic en el botón *Desasignary* seleccionando la línea en la que hay que desasignar.
3. En la ventana de “Condiciones” haga clic en *Entidades/Force/DispB.C* . A continuación aparecerá un cuadro resumen con todas las condiciones asignadas del tipo Force/Disp B.C
4. Cierra el cuadro resumen “Force/Disp B.C” haciendo clic en *Cerrar*.
5. Cada línea del cuadro resumen “Force/Disp B.C” corresponde a una entidad. Cada entidad tiene la etiqueta “E” seguida por el número de la línea geométrica asignada.

2.1.2.3. DATOS DEL INTERVALO


2.1.2.3.1. INTRODUCCIÓN

Los intervalos son una manera de cambiar algunas condiciones asignadas y finalmente, las propiedades materiales.


Las propiedades de los materiales pueden variar en cada intervalo o permanecer constantes. Para un problema con varios intervalos, aparecerá una ventana con diferentes campos para cada ley constitutiva mencionados en el apartado de materiales, en el que aparecerá una línea diferente para cada intervalo. Por lo general, sólo debe llenarse la primera línea. Las siguientes líneas se pueden dejar en blanco si las propiedades del material no cambian.

	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1er intervalo											
2º intervalo											

Las condiciones de los límites pueden variar en cada intervalo o permanecer constantes.

Para condiciones, la manera correcta de proceder es definir primero todas las condiciones invariables (es decir, aquellas que permanecen sin cambios durante todos los intervalos). A continuación, se permite definir tantos intervalos como se desee con el comando “*Nuevo intervalo*” icono  en la ventana de datos del intervalo.

Es posible definir tantas condiciones como sea necesario en intervalos particulares. Las condiciones que no han sido duplicadas al crear nuevos intervalos, sólo se consideran para su intervalo.

Los parámetros de los datos de intervalo, los límites temporales de la codificación y los pasos del tiempo para cada intervalo. Se pueden introducir con el comando *Nuevo intervalo*” icono  en la ventana de datos de intervalos. Si se ingresa en una ventana, los datos no se aceptan hasta que se pulse el botón Aceptar. Estos datos pueden ser introducidos antes o después del mallado.

Características de los datos que se introducen para los intervalos:

En la ventana de datos del intervalo podremos introducir los siguientes datos,

DATOS DE INTERVALO	
Unidades de discretización de tiempo	Unidades de tiempo para intervalo definido. Opciones: Segundos, Minutos, Horas, Días, Semanas, Meses, Años
Hora inicial (período de inicio) (TIMEI en root_gen.dat)	Tiempo inicial para el intervalo definido.
Paso de tiempo inicial (DTIME en root_gen.dat)	Paso de tiempo inicial para este intervalo de tiempo.
Tiempo final (período final) (TIMEF en root_gen.dat)	Tiempo final para el intervalo definido.
Tiempo Parcial (TIME1 en root_gen.dat)	Tiempo desde el cual el incremento de tiempo se mantiene constante.
Paso parcial de tiempo (DTIMEC en root_gen.dat)	Valor de paso de tiempo constante.
Ponga los desplazamientos a 0	Si no Esta opción pone el desplazamiento a cero al comienzo del siguiente paso de tiempo.

Definir datos del intervalo

El primer intervalo de tiempo comprende todos los datos introducidos hasta el momento, incluye: Datos del problema, el material y las condiciones. En las simulaciones se pueden producir problemas transitorios y/o cambios de condiciones de contorno que tienen lugar en el tiempo, por lo tanto es necesario definir varios intervalos de tiempo.

En los sucesivos intervalos de tiempo, si se definen, se pueden cambiar las condiciones de contorno y las propiedades de los materiales.

Es posible seleccionar la unidad de tiempo, como por ejemplo: segundos, minutos, horas, días, semanas, meses, años; por medio del campo “*Unidades de discretización de tiempo*”.

En esta simulación serán necesarios tres intervalos de tiempo.

El primer intervalo de carga se llevará a cabo con el fin de equilibrar las condiciones iniciales.

2.1.2.3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Para definir unos nuevos datos del intervalo, siga los siguientes pasos:

Definir intervalos

1. Seleccionamos en menú desplegable: *Datos / Datos del intervalo*
2. Aparecerá la ventana siguiente: (Figura 34).

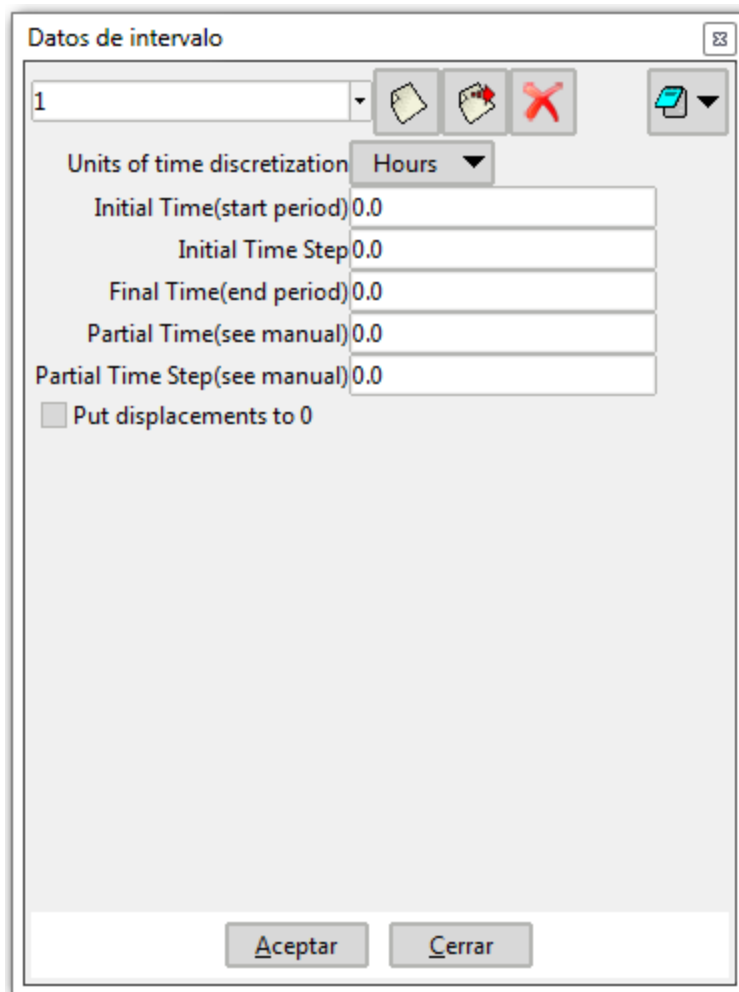




Figura 34.

1. Haga clic en el icono , de nuevo intervalo, en la ventana de datos del intervalo.
2. Aparecerá la ventana de “**Agregar nuevo intervalo**” Haga clic en “**Si**”, en el cuadro “¿Copiar las entidades de condiciones desde el intervalo 1?” en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “Creado intervalo número 2. Asignado como intervalo en uso, usando intervalo 2.”
3. Repetimos la operación para crear el intervalo número 3.
4. Haga clic en el icono , de nuevo intervalo, en la ventana de datos del intervalo.
5. Aparecerá la ventana de “**Agregar nuevo intervalo**” Haga clic en “**Si**”, en el cuadro “¿Copiar las entidades de condiciones desde el intervalo 2?” en el cuadro de

mensajes aparece el siguiente mensaje: “Creado intervalo número 3. Asignado como intervalo en uso, usando intervalo 3.

6. Seleccione el intervalo de tiempo “1” en el menú desplegable al lado del icono de “nuevo intervalo”, en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “usando intervalo 1”.
7. Seleccione “Hours”(Horas) en el menú desplegable de “Units of time discretization”
8. Escriba “0” en la casilla “Initial time (startperiod)”.
9. Escriba “0.0000001” en la casilla, “Initial Time Step”.
10. Escriba “3” en la casilla “Final Time (endperiod)”.
11. Escriba “0” en la casilla “Partial Time (see manual).”.
12. Escriba “0.01” en la casilla, “Partial Time Step”.
13. “Selecione” la casilla de poner desplazamientos a 0.
14. Las figura 35 muestran la entrada de datos para el intervalo 1.
15. Haga clic en “Aceptar”. El mensaje: “Intervalo de datos modificados”, aparece intermitente en la parte superior del botón Aceptar.

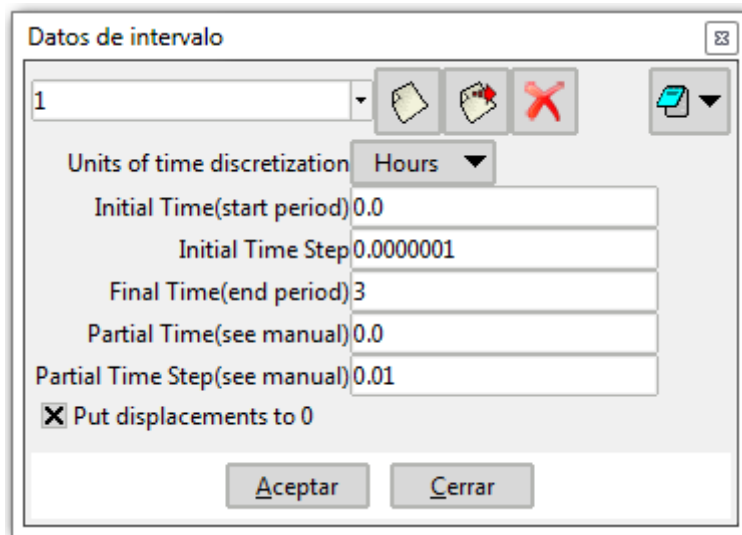


Figura 35.

16. Seleccione el intervalo de tiempo “2” en el menú desplegable al lado del icono de “nuevo intervalo”, en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “usando intervalo 2”.
17. Seleccione “Hours”(Horas) en el menú desplegable de “Units of time discretization”
18. Escriba “3” en las casilla “Initial time (startperiod)”.
19. Escriba “0.0000001” en la casilla, “Initial Time Step”.
20. Escriba “6” en la casilla “Final Time (endperiod)”.
21. Escriba “0” en la casilla “Partial Time (see manual).”.
22. Escriba “0.01” en la casilla, “Partial Time Step”.
23. “Selecione” la casilla de poner desplazamientos a 0.
24. Las figura 36 muestran la entrada de datos para el intervalo 2.
25. Haga clic en “Aceptar”. El mensaje: “Intervalo de datos modificados”, aparece intermitente en la parte superior del botón Aceptar.

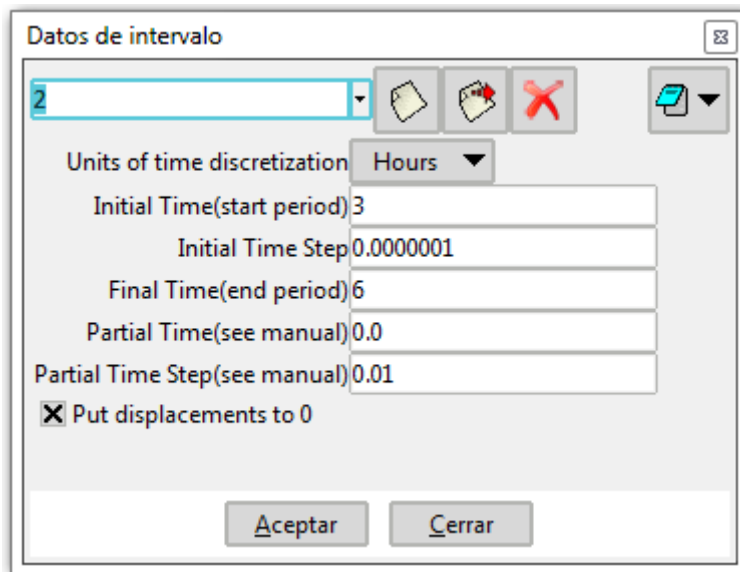


Figura 36.

26. Seleccione el intervalo de tiempo “3” en el menú desplegable al lado del icono de “nuevo intervalo”, en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “usando intervalo 2”.
27. Selecciona “Hours”(Horas) en el menú desplegable de “Units of time discretization”
28. Escriba “6” en las casilla “Initial time (startperiod)”.
29. Escriba “0.0000001” en la casilla, “Initial Time Step”.
30. Escriba “8” en la casilla “Final Time (endperiod)”.
31. Escriba “0” en la casilla “Partial Time (see manual)”.
32. Escriba “0.01” en la casilla, “Partial Time Step”.
33. “No seleccione” la casilla de poner desplazamientos a 0.
34. Las figura 37 muestran la entrada de datos para el intervalo 3.
35. Haga clic en “Aceptar”. El mensaje: “Intervalo de datos modificados”, aparece intermitente en la parte superior del botón Aceptar.

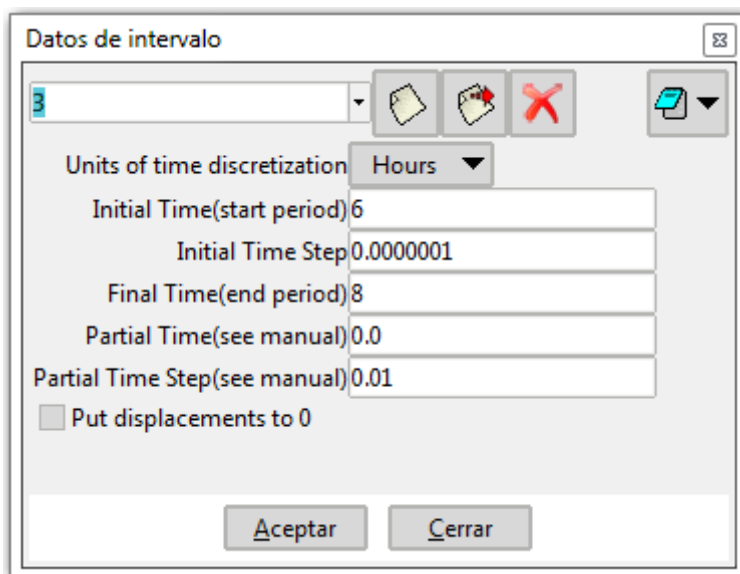


Figura 37.

36. Seleccione el intervalo de tiempo “1” en el menú desplegable al lado del icono de “nuevo intervalo”, en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “usando intervalo 1”.

37. Haga clic en el icono “*Abra otras opciones de los datos*” , ubicada en la parte superior derecha de la ventana “*Datos del intervalo*”.

38. Seleccione la opción de “*Condiciones*” del menú desplegable.

39. Haga clic en el icono de superficie , en la ventana de “*Condiciones*”.

40. Elija la opción “*Force/Disp B.C*” del menú desplegable.

41. Haga clic en la pestaña de “*entidades*” y seleccione en la ventana la opción “*Force/Disp B.C*” del menú desplegable.

42. Verifique que las entidades “E” aparecen en el resumen de entidades. Figura 37.

43. Haga clic en “*Cerrar*” en la ventana “*Force/Disp B.C*”. Mantenga la ventana de “*Condiciones*” abierta.

Modificar datos intervalo 2

44. Haga clic en el icono “*Abra otras opciones de los datos*” , ubicada en la parte superior derecha de la ventana “*Condiciones*”.

45. Seleccione la opción de “*Datos del intervalo*” del menú desplegable.

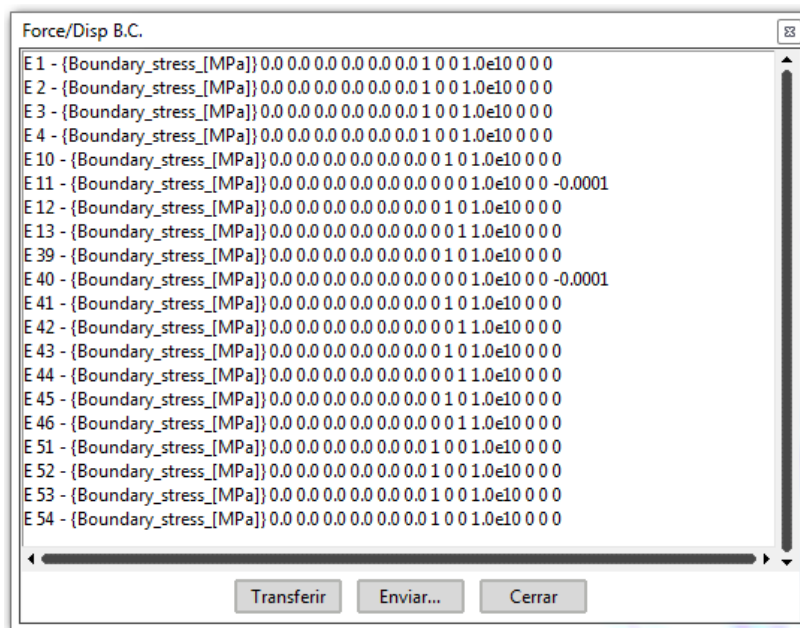


Figura 38.

46. Seleccione el intervalo de tiempo “2” en el menú desplegable al lado del icono de “nuevo intervalo”, en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “usando intervalo 2”.

47. Haga clic en el icono “*Abra otras opciones de los datos*” , ubicada en la parte superior derecha de la ventana “*Datos del intervalo*”.




48. Seleccione la opción de “*Condiciones*” del menú desplegable.

49. Haga clic en el icono de superficie , en la ventana de “*Condiciones*”.


50. Elija la opción “*Force/Disp B.C*” del menú desplegable.

51. Haga clic en la pestaña de “*entidades*” y seleccione en la ventana la opción “*Force/Disp B.C*” del menú desplegable.
52. Verifique que las entidades “E” aparecen en el resumen de entidades. Figura 38.
53. Haga clic en la línea E11 que se volverá de color azul y haga clic en la pestaña “*Transferir*” en la ventana “*Force/Disp B.C*”, los datos se han transferido a la ventana “*Condiciones*” y nos disponemos a modificarlos.
54. Escriba “-0.05” en la casilla “*Dfz(ramploading)*” (Carga en rampa durante el intervalo actual). Este valor corresponde a una carga uniforme ‘p’ de 1Mpa. El signo negativo indica la dirección de la carga. En este caso, la carga es vertical (dirección Z) y orientada hacia abajo (signo negativo “-“ si la dirección de la carga va hacia abajo).
55. Deje el valor que aparece por defecto en la casilla “*Multiplier (see manual)*”
56. Los valores típicos para el parámetro “*Multiplier*”, están entre 1e6 y 1e10.
57. Haga clic en el botón “*Asignar*”.
58. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo**, haga “**click**” en las superficies ortogonales a la dirección del eje Z de las paredes superiores del volumen como se muestra en la figura 24, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada).
59. Pulse **Esc**.
60. Haga clic en la pestaña de “*entidades*” y seleccione en la ventana la opción “*Force/Disp B.C*” del menú desplegable, compruebe que las fuerzas “E11” y “E40” han cambiado de valor.
61. Haga clic en “*Cerrar*” en la ventana “*Force/Disp B.C*”. Mantenga la ventana de “*Condiciones*” abierta.

Modificar datos intervalo 3

1. Haga clic en el icono “*Abra otras opciones de los datos*” , ubicada en la parte superior derecha de la ventana “*Condiciones*”.
2. Seleccione la opción de “*Datos del intervalo*” del menú desplegable.
3. Seleccione el intervalo de tiempo “3” en el menú desplegable al lado del icono de “nuevo intervalo”, en el cuadro de mensajes aparece el siguiente mensaje: “usando intervalo 3”.
4. Haga clic en el icono “*Abra otras opciones de los datos*” , ubicada en la parte superior derecha de la ventana “*Datos del intervalo*”.
5. Seleccione la opción de “*Condiciones*” del menú desplegable.
6. Haga clic en el icono de superficie , en la ventana de “*Condiciones*”.
7. Elija la opción “*Force/Disp B.C*” del menú desplegable.
8. Haga clic en la pestaña de “*entidades*” y seleccione en la ventana la opción “*Force/Disp B.C*” del menú desplegable.
9. Verifique que las entidades “E” aparecen en el resumen de entidades. Figura 37.
10. Haga clic en la línea E11 que se volverá de color azul y haga clic en la pestaña “*Transferir*” en la ventana “*Force/Disp B.C*”, los datos se han transferido a la ventana “*Condiciones*” y nos disponemos a modificarlos.
11. Escriba “-0.05” en la casilla “*Dfz(ramploading)*” (Carga en rampa durante el intervalo actual). Este valor corresponde a una carga uniforme ‘p’ de 1Mpa. El signo negativo indica la dirección de la carga. En este caso, la carga es vertical

- (dirección Z) y orientada hacia abajo (signo negativo “-“ si la dirección de la carga va hacia abajo).
12. Deje el valor que aparece por defecto en la casilla “**Multiplier (see manual)**”
 13. Los valores típicos para el parámetro “**Multiplier**”, están entre $1e6$ y $1e10$.
 14. Haga clic en el botón “**Asignar**”.
 15. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo**, haga “**click**” en las superficies ortogonales a la dirección del eje Z de las paredes superiores del volumen como se muestra en la figura 24, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada).
 16. Pulse **Esc**.

1. Haga clic en el icono de superficie , en la ventana de “**Condiciones**”.
2. Elija la opción “**Force/Disp B.C**” del menú desplegable.
3. Haga clic en la pestaña de “**entidades**” y seleccione en la ventana la opción “**Force/Disp B.C**” del menú desplegable.
4. Seleccione “**Boundary stress**” en el menú desplegable “**Forces**”.
5. Escriba “**1**” en la casilla “**X-Direction prescribe (0-no, 1-yes)**”
6. Escriba “**2e-5**” en la casilla “**X-Displacementrate**”. demás parámetros dejamos igual, como se muestra en la figura 40.
7. Los pasos 5 y 6 son para forzar desplazamiento a una velocidad establecida.
8. Deje el valor que aparece por defecto en la casilla “**Multiplier (see manual)**”
9. Los valores típicos para el parámetro “**Multiplier**”, están entre $1e6$ y $1e10$.
10. Las demás casillas ponga “**0**”
11. Haga clic en el botón “**Asignar**”.
12. El cursor se convierte en un cuadrado, con el ratón y **apretando el botón izquierdo**, haga “**click**” en las superficie frontal del refuerzo ortogonal a la dirección del eje X del hueco frontal del volumen como se muestra en la figura 39, una vez seleccionada la figura las superficies pasan a ser rojas, (significa que está seleccionada).

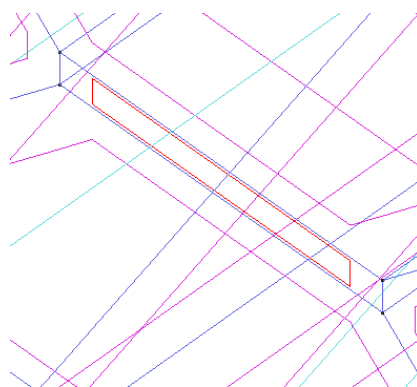


Figura 39.

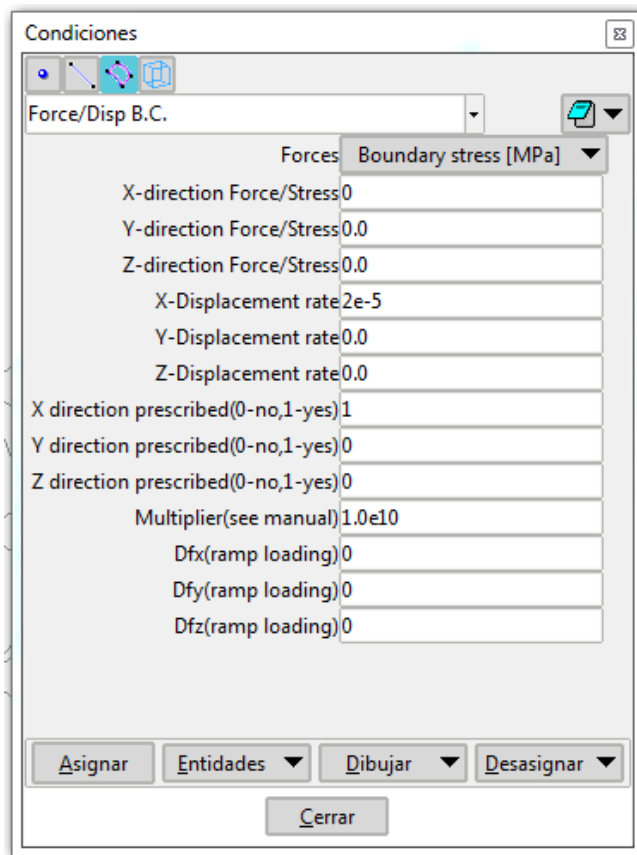



Figura 40.

13. Pulse **Esc**.
14. Haga clic en el icono de superficie , en la ventana de “**Condiciones**”.
15. Elija la opción “**Force/Disp B.C**” del menú desplegable.
16. Haga clic en la pestaña de “**entidades**” y seleccione en la ventana la opción “**Force/Disp B.C**” del menú desplegable.
17. Verifique que las entidades “E” aparecen en el resumen de entidades corresponden a las modificadas para el intervalo 3.

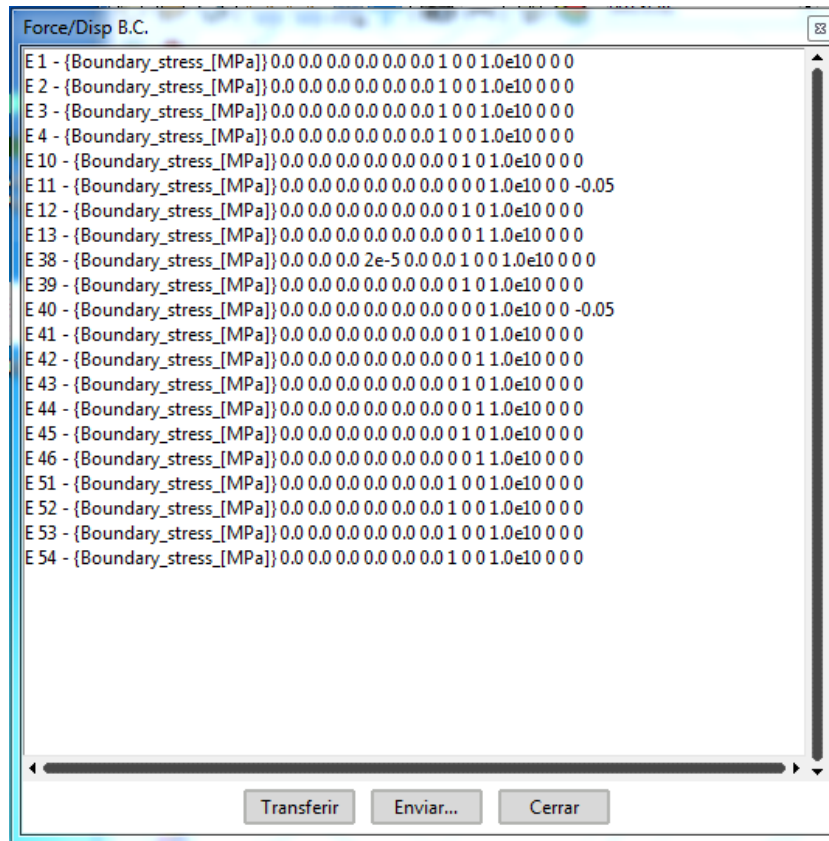


Figura 41.

18. Haga clic en “*Cerrar*” en la ventana “*Force/Disp B.C.*”.
19. Haga clic en “*Cerrar*” en la ventana “*Condiciones*”.

2.1.3. DATOS DEL PROBLEMA

2.1.3.1. INTRODUCCIÓN

Los datos del problema incluyen todos los datos generales del problema. Esto significa que no está relacionada con una entidad geométrica y no cambia en cada intervalo de tiempo.

Estos datos pueden ser introducidos antes o después del mallado.

Los datos del problema se dividen en 5 partes serán las siguientes:

- General data
- Equations solved
- Solution strategy
- Salida
- Select output

GENERAL DATA

En la pestaña de información general disponemos de opciones de información general sobre el guardado del problema, aximetría y acción de la gravedad sobre los ejes.

ECUACIONES RESUELTAS

Esta opción permite definir las ecuaciones a resolver (cualquier combinación entre el equilibrio de tensiones, el equilibrio de la masa de agua, el equilibrio de la masa de aire, el equilibrio de energía y el balance de un soluto conservativo). Esta simulación implica un problema de mecánica pura considerando pequeñas deformaciones.

Las incógnitas en cada nodo serán las componentes horizontal y vertical y longitudinal del vector desplazamiento. El resto de las opciones del cuadro de diálogo (es decir, el balance de masa y energía) no son aplicables a esta simulación, que tal como se ha dicho, solo considera el problema mecánico.

ESTRATEGIA DE RESOLUCION

La estrategia de resolución contiene los parámetros que define la estrategia a utilizar para lograr la resolución de la simulación.

SALIDA

La salida contiene información sobre los archivos que escribe el programa para el cálculo

1.1.3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Para introducir los datos generales del problema.

1. seleccionamos desde el menú desplegable: *Datos / datos del problema / datos del problema.*
2. Aparecerá la ventana siguiente: Figura 42

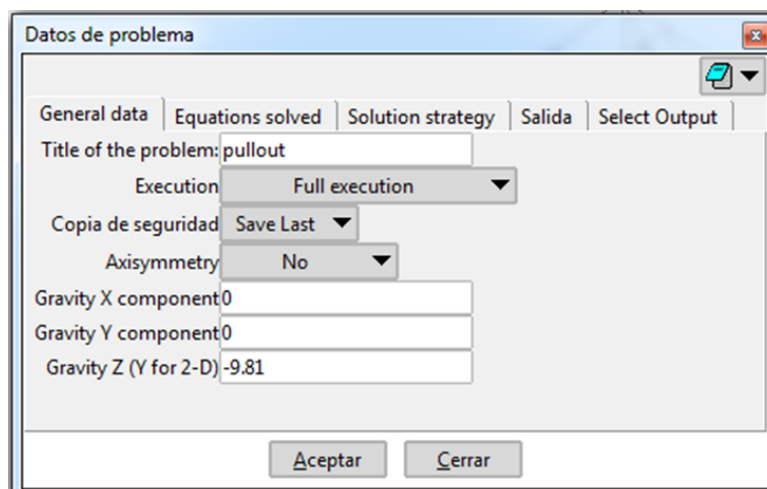


Figura 42.

Para introducir los datos generales del problema.

1. Seleccionamos la pestaña de “*datos generales*” en la ventana de “*datos del problema*”.
2. Escriba el texto adecuado en la casilla de “*Title of the problem*” (Titulo del problema). En nuestro caso escribimos “*PULLOUTTEST*”.
3. Elija “*Full execution*” (Plena ejecución) en el menu desplegable “*Execution*” (Ejecución).
4. Elija “*saveall*” en el menú desplegable “*copia de seguridad*”
5. Elija “*No*” (en torno al eje y) en el menú desplegable de “*Axysimmetry*”.
6. Escriba “*0*” en la casillas de “*Gravity X component*” (componente X de la gravedad) y “*Gravity Y component*” (componente Y de la gravedad)
7. Escriba “*-9.81*” en la casilla de “*Gravity Z (Y for 2D)*” (componente Z de la gravedad)
8. Haga clic en “*Aceptar*” para modificar los valores de los datos mencionados.
9. La figura 43 muestra como que da la ventana de “*general data*”

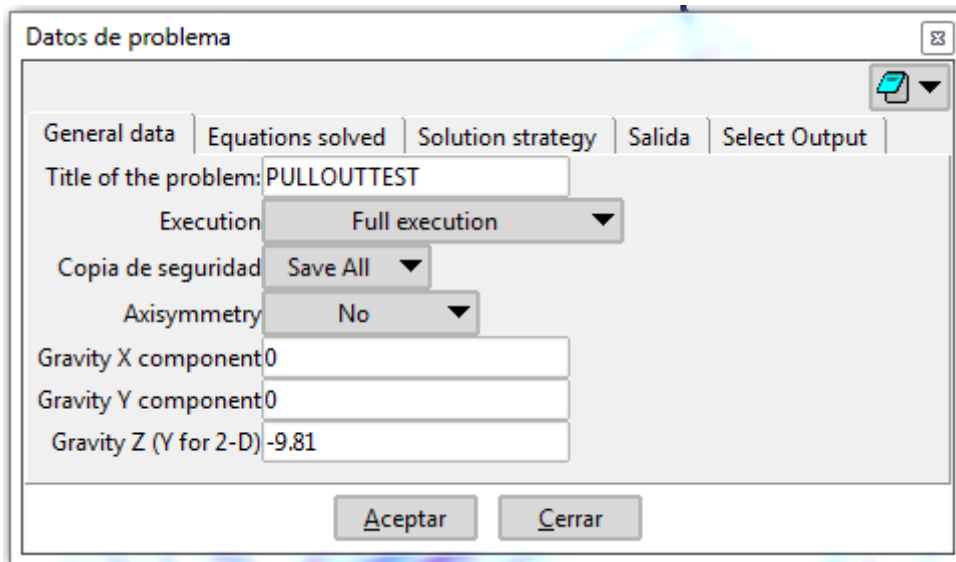


Figura 43.

Para introducir los datos de resolución de las ecuaciones.

1. Seleccionamos la pestaña de “*Equationssolved*” en la ventana de “*datos del problema*”.
2. Marque la casilla de “*Strees equilibrium (unknown displacement “u”)*” (Equilibrio de tensiones (desplazamiento desconocido “u”))
3. Seleccione “*No*” en el menú desplegable de “*Updated lagrangian method*” (Actualización de coordenadas mediante método llamado lagrangiano)
4. Es conveniente poner la variable “*Constant Pg (MPa)*” a valor “*0*” en lugar de 0.1, para así trabajar con presiones relativas a la presión atmosférica.
5. Las incógnitas en cada nodo serán las componentes horizontal, vertical y longitudinal del vector desplazamiento. El resto de las opciones del cuadro de diálogo (es decir, el balance de masa y energía) no son aplicables a esta simulación, que tal como se ha dicho, solo considera el problema mecánico.
6. Haga clic en “*Aceptar*” para modificar los valores de los datos mencionados.
7. La figura 44 muestra como que da la ventana de “*general data*”

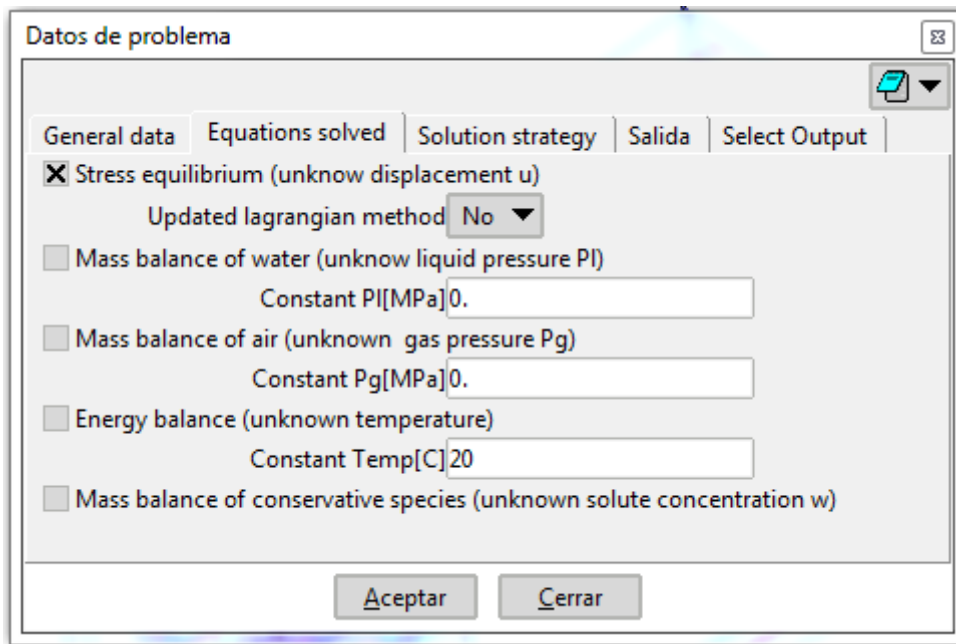


Figura 44.

Para introducir los datos de estrategia de resolución.

1. Seleccionamos la pestaña de “*Solution strategy*” en la ventana de “*datos del problema*”.
2. Escriba “1” en la casilla “*Epsilon (intermediate time for non linear functions)*” (tiempo intermedio para funciones no lineales), con el fin de tener un esquema totalmente implícito para el tiempo de integración.
3. Escriba “1” en la casilla “*Theta (intermediate time for implicit solution)*” (tiempo intermedio para la solución implícita)
4. Escriba “3” en la casilla “*Time step control*” (Control del paso del tiempo).
5. Escriba “10” en la casilla “*Max. number of iterations per time step*” (número máximo de iteraciones por escalón de tiempo).
6. Seleccione “*Iterativo Sparse + CGS*” en el menú desplegable “*SolverType*” (tipo de solución).
7. Escriba “1000” en la casilla “*Max number of solver iterations (CGS)*”
8. Escriba “1e-9” en la casilla “*Max absolver error variable (CGS)*”
9. Escriba “0” en la casilla “*Max absolver error residual (CGS)*”
10. Escriba “0” en la casilla “*Max re solver error residual (CGS)*”
11. La opción de “*Elemental relative permeability is computed from*” (La permeabilidad relativa elemental se calcula a partir) solo es relevante cuando los balances de masa de agua y gas están resueltos. Por lo tanto mantenga la opción por defecto “*Average nodal degrees of saturation*” (Grado medio de saturación).
12. Utilice los valores por defecto en las casillas de “*Max Absdisplacement [m]*” y “*Max. Nodal Forces [MN]*”, **1e-6** y **1e-10** respectivamente. Consulte el manual del usuario
13. Escriba “1e-1” en la casilla “*Displacements Iter Corr [m]*”.
14. Use la opción “*On nodal correction residual*” (en la corrección nodal o residual) que aparece por defecto en el menú desplegable “*Convergence criterion*” (Criterios de convergencia).
15. Haga clic en “*Aceptar*” para modificar los valores de los datos mencionados.
16. La figura 45 muestra como que da la ventana de “*Resolución de las ecuaciones*”

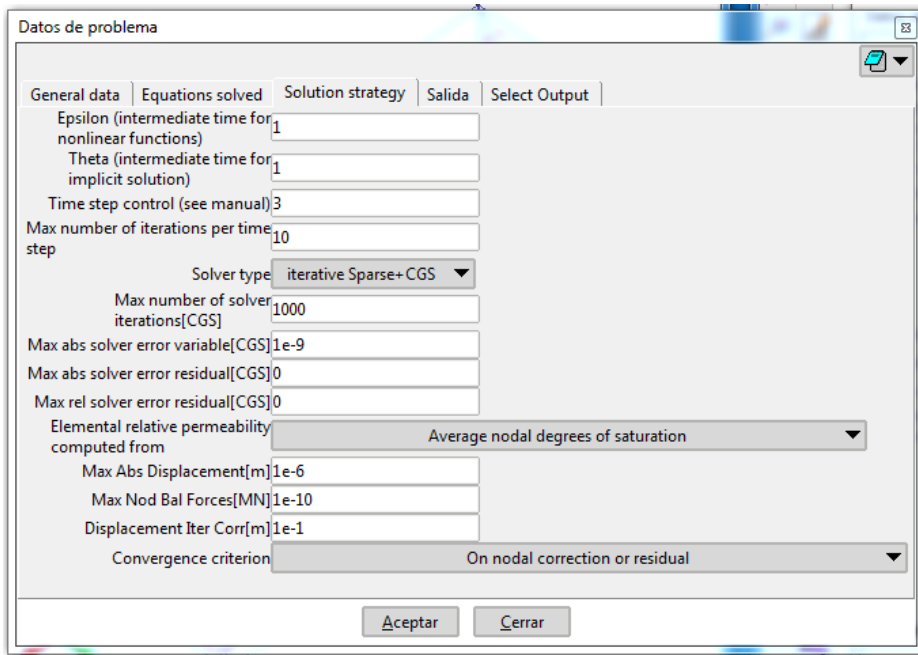


Figura 45.

Para introducir los datos de salida.

1. Seleccionamos la pestaña de “*Salida*” en la ventana de “*datos del problema*”.
2. Selecciona “*Todo*” toda la información de iteración está escrita en el menú desplegable de “*Write numerical process information*”
3. Escriba “*100*” en la casilla “*Writing frequency*” (frecuencia de escritura). Este valor indica la frecuencia con la que se escriben los resultados en el archivo de salida cada 100 incrementos de tiempo calculados.
4. En el menú desplegable “*Output points*” (puntos de salida) selecciona la opción “*Puntos de Gauss*”.
5. Marque la opción “*Write all information*” (Escriba toda la información).
6. Haga clic en “*Aceptar*” para modificar los valores de los datos mencionados.
7. La figura 46 muestra como que da la ventana de “*Salida*”

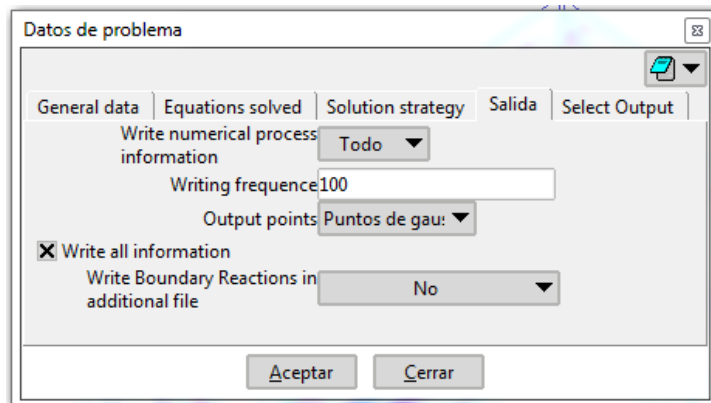


Figura 46.

2.1.4. GENERAR MALLA

2.1.4.1. INTRODUCCIÓN

Generar la malla consiste en discretizar la geometría en los nodos y elementos. Las condiciones y elementos asignados a las entidades geométricas se transfieren durante este proceso a los nodos y elementos.

En este ejemplo se utiliza una malla estructurada, que está compuesta por hexaedros.

2.1.4.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

1. Elija *Malla/estructurada/Líneas/asignar número de divisiones* en el menú principal. A continuación, introduzca en el cuadrado que aparece Figura 47 el número de divisiones para cada eje.

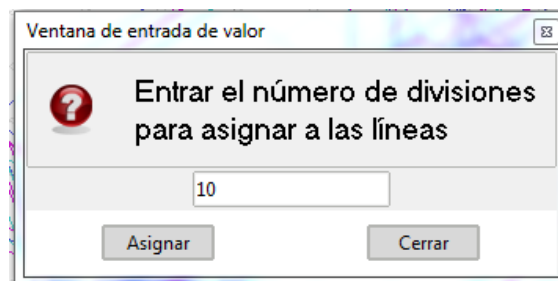


Figura 47.

2. Escriba *10* en la casilla del cuadro, como se muestra en la Figura 47. Este valor se asignará a la línea indicada en la figura 48.

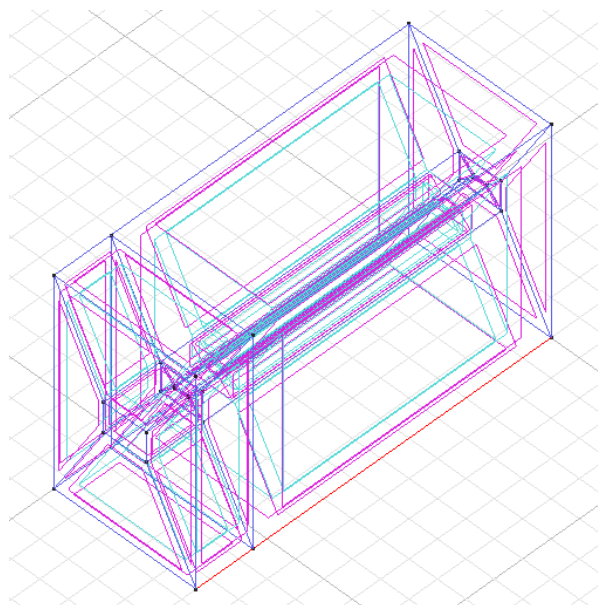


Figura 48.

3. Haga clic en *Asignar*. Ahora el cursor se pasa de ser una flecha a un cuadrado.
4. Haga clic en la línea. Verá cómo se convierte a color rojo.
5. Pulse **Esc**.
6. Escriba 4 en la casilla del cuadro, como se muestra en la Figura 47. Este valor se asignará a la línea indicada en la figura 49.

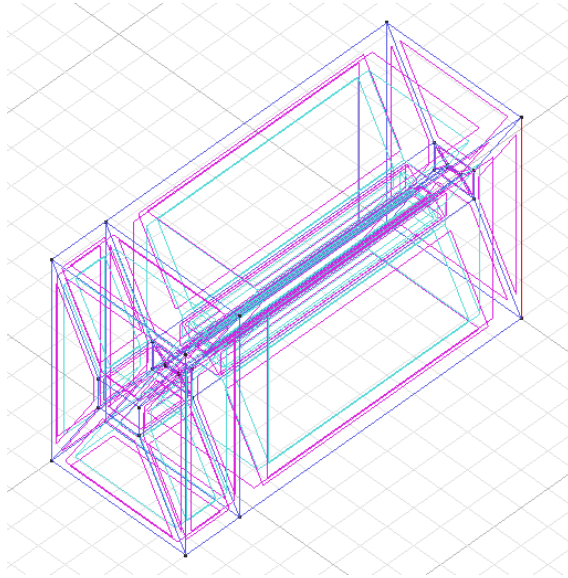


Figura 49.

1. Haga clic en *Asignar*. Ahora el cursor se pasa de ser una flecha a un cuadrado.
2. Haga clic en la línea. Verá cómo se convierte a color rojo.
3. Pulse **Esc**.
4. Escriba 4 en la casilla del cuadro, como se muestra en la Figura 47. Este valor se asignará a la línea indicada en la figura 50.

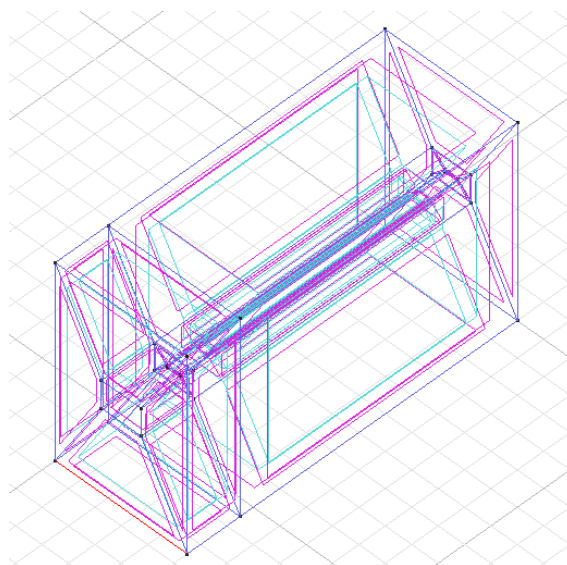


Figura 50.

5. Haga clic en Asignar. Ahora el cursor se pasa de ser una flecha a un cuadrado.
6. Haga clic en la línea. Verá cómo se convierte a color rojo.
7. Pulse **Esc**.
8. Elija **Malla/Generar malla** en el menú principal. A continuación, introduzca en el cuadrado que aparece Figura 51, **100** y presione **Aceptar**.

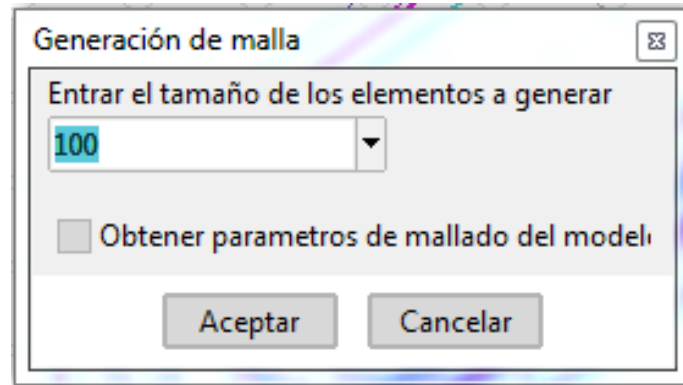


Figura 51.

9. Aparece una ventana con el progreso de mallado. Presione **Ver malla** Y se puede ver la malla generada figura 52.

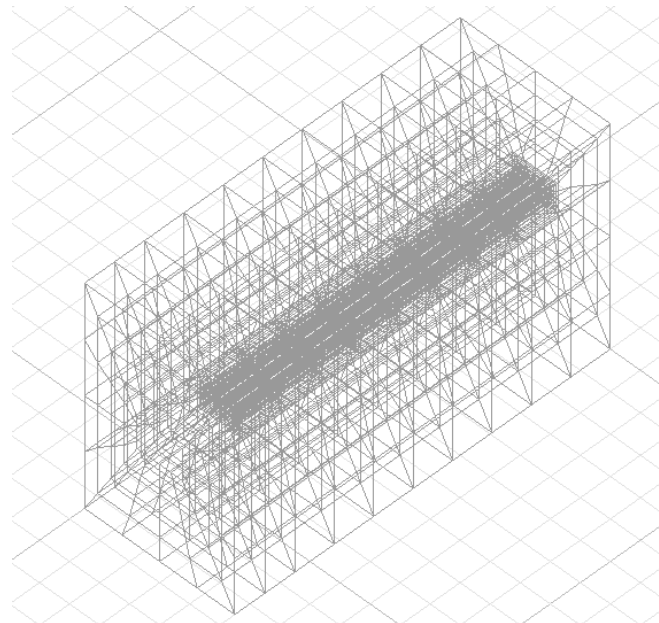


Figura 52.

2.1.5. CALCULAR

2.1.4.1. INTRODUCCIÓN

Esta parte trata de la etapa del proceso que resuelve el problema numérico. El sistema permitiría llamar al programa de elementos finitos sin necesidad de salir del entorno de trabajo. Al pulsar **Calcular**, el usuario puede ver una ventana de proceso y hacer clic en **Iniciar** el módulo de solver.

1. Elija **Calcular/Calcular** en el menú principal. Entonces se pondrá en marcha el proceso de cálculo de Code_Bright. Cuando haya terminado se abrirá la siguiente ventana informativa del proceso:

2.2. POST-PROCESO

Acceder al Post-proceso

Para poder acceder a la interfaz del post-proceso y ver los resultados correspondientes a este ejemplo, siga los siguientes pasos:

1. Seleccione **Archivo/Post proceso** en el menú principal, o haga clic en el icono de post-proceso localizado en la barra de herramientas superior. Ahora aparecerá la Figura 53:

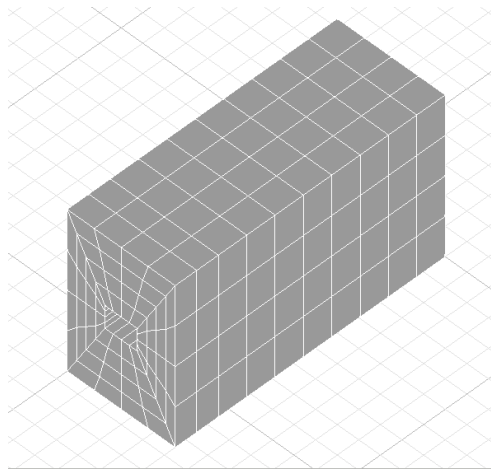


Figura 53.

La interfaz del post-proceso contiene muchas características, pero aquí solo vamos a representar las más comunes utilizadas en la interfaz del post-procesamiento.

2. Seleccione **Ventana/Ver resultados** en el menú principal. Aparecerá el cuadro de “Visualizar resultados y Deformación” como se muestra en la Figura 54.

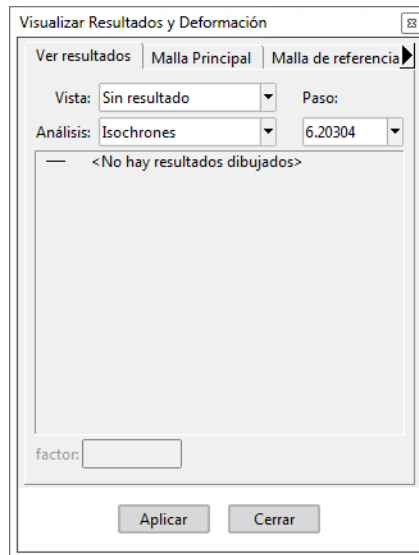


Figura 53.

3. Comprueba que en la pestaña “Ver resultados” de la ventana “Visualizar Resultados y Deformación” se pueden ver los resultados como se muestra en la Figura 54.
4. Selecciona *Áreas coloreadas* en el menú desplegable “Vista”. Ahora, en el cuadro de abajo aparecen varias opciones de resultados. Los más importantes son: *Displacements* (desplazamientos), *Porosity* (Porosidad) y *Stresses* (Tensiones).
5. Seleccione *X-Displacements* haciendo clic en el icono. Ahora se abrirá una lista con todas las direcciones posibles en las que puede ir la tensión. Este punto se muestra en la Figura 54.

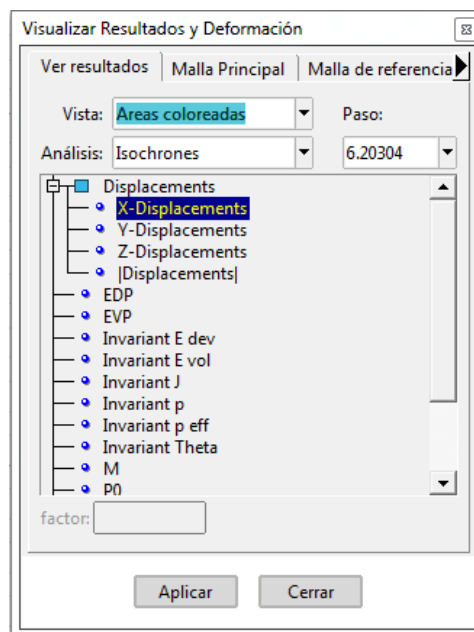


Figura 54.

6. Haga clic en el botón *Aplicar*. Ahora aparecerá la Figura 55 que se muestra a continuación:

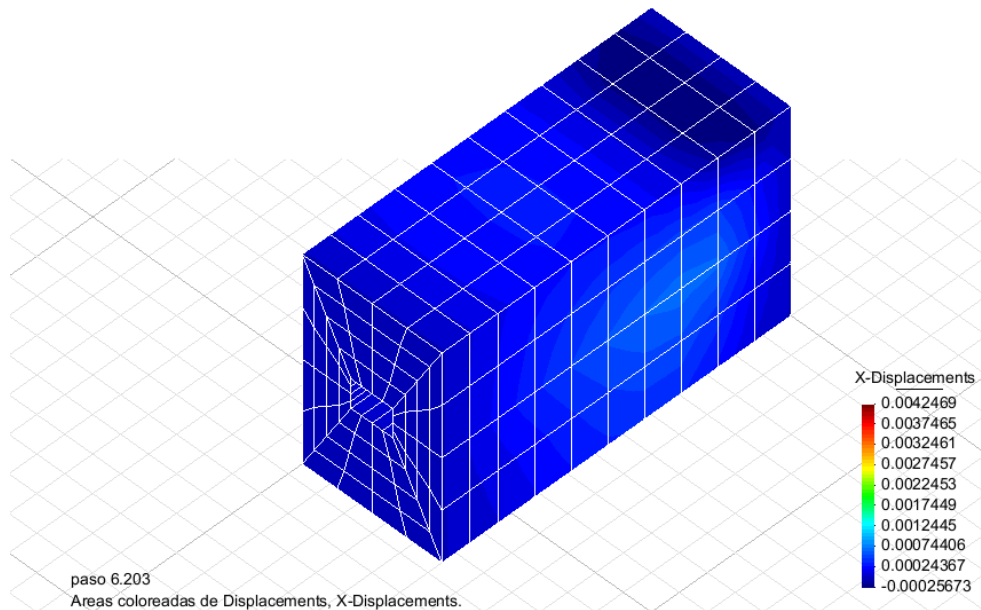



Figura 55.

Generar un gráfico linear

Este tipo de gráfico se utiliza para correlacionar gráficamente tensión y desplazamientos.

1. Haga clic en el icono *Varias graficas*  localizado en la barra de herramientas de la izquierda, a continuación, selecciona *el grafico en el que nos da la opción de introducir datos en el eje X y el eje Y* en el menú desplegable.
2. Seleccionamos *Fijar eje X/Displacements/ X-Displacements*.
3. Seleccionamos *Fijar eje Y/Stresses/ Sxx-Stresses*.
4. Seleccionamos *Seleccionar todos los pasos*.
5. Seleccionamos *Seleccionar Todos los pasos*.
6. El cursor se convierte en una cruz blanca pequeña.
7. Apretamos *control+A* y seleccionamos el punto medio de la cara delantera del refuerzo. Aparecerá la gráfica Tensión/Desplazamiento Figura 56.

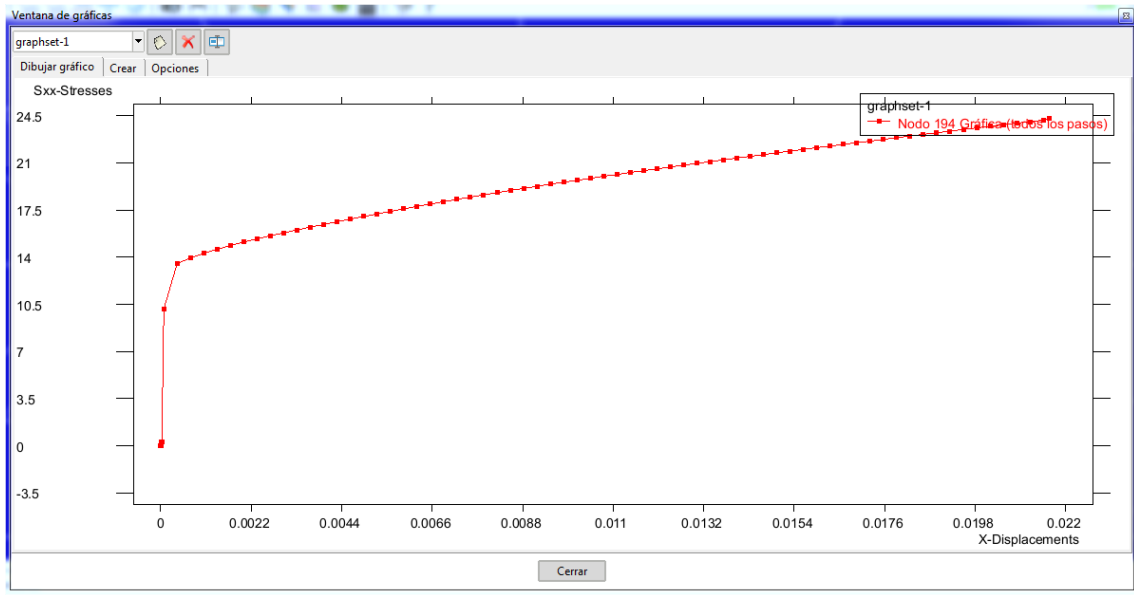


Figura 56.