



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

MASTER EN METODOS NUMERICOS PARA CALCULO Y

DISEÑO EN INGENIERIA

“ESTUDIO DEL EFECTO DEL ARMADO EN ANCLAJES”

Tesis de Master

Presentada por: José M^a de Ortuzar

Dirigida por: D. Francisco Zárate

Barcelona, Junio de 2015

**CENTRO INTERNACIONAL DE METODOS
NUMERICOS EN INGENIERIA (CIMNE)
UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA
(UPC)**

**CURSO DE MASTER (a distancia)
METODOS NUMERICOS PARA CALCULO Y DISEÑO
EN INGENIERIA**

**TESIS DE MASTER:
ESTUDIO DEL EFECTO DEL ARMADO EN ANCLAJES**

**ALUMNO: JOSE MARIA DE ORTUZAR GARATE
JUNIO 2015**

INDICE:

- 1. OBJETO DEL TRABAJO**
- 2. DESCRIPCION DEL TRABAJO**
- 3. INFORMACION TECNICA GENERAL SOBRE SISTEMAS DE ANCLAJE**
 - a. Introducción
 - b. Sistemas usuales de anclaje
 - c. Anclajes de expansión de par controlado
 - d. Anclajes de fijación química
 - e. Formas de rotura de los sistemas de fijación
 - f. Normativa y documentación técnica de aplicación
- 4. DESCRIPCION DEL PROBLEMA ESTRUCTURAL A CALCULAR**
 - a. Problema objeto del trabajo
 - b. Descripción geométrica del problema
- 5. HIPOTESIS Y DATOS DE PARTIDA DEL CALCULO ESTRUCTURAL**
 - a. Material de los elementos estructurales y características mecánicas
 - b. Material del cemento
 - c. Casos de carga considerados para el anclaje químico
 - d. Casos de carga considerados para el anclaje mecánico expansivo
 - e. Combinación de cargas
 - f. Hipótesis simplificativas adoptadas
- 6. DESCRIPCION DEL TRABAJO DE CALCULO POR ELEMENTOS FINITOS DE LA ESTRUCTURA**
 - a. Descripción general del cálculo por elementos finitos
 - b. Alternativas de mallado que se van a estudiar
 - c. Recursos informáticos utilizados para el presente trabajo
- 7. PREPROCESO**
 - a. Modelización de la estructura
 - i. Tipo de elemento
 - ii. Modelización de los pernos
 - iii. Condiciones de borde: Apoyo de la estructura y plano de simetría
 - b. Mallado

- i. Relación de mallados adoptados
- ii. Mallado CASO 1: ANCLAJE QUIMICO SIN ARMADURA
- iii. Mallado CASO 2: ANCLAJE QUIMICO CON ARMADURA
- iv. Mallado CASO 3: ANCLAJE MECANICO EXPANSIVO SIN ARMADURA
- v. Mallado CASO 4: ANCLAJE MECANICO EXPANSIVO CON ARMADURA
- vi. Tabla Resumen
- vii. Otras opciones posibles no analizadas

8. ANÁLISIS

9. POSTPROCESO

a. Introducción

b. CASO 1: ANCLAJE QUIMICO SIN ACERO DE ARMAR

- i. Desplazamiento en Z (Imagen CONTOUR)
- ii. Desplazamientos en Z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH)
- iii. Tensiones verticales S_z (Imagen CONTOUR)
- iv. Tensiones verticales S_z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH)

c. CASO 2: ANCLAJE QUIMICO CON ACERO DE ARMAR

- i. Desplazamiento en Z (Imagen CONTOUR)
- ii. Desplazamientos en Z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH)
- iii. Tensiones verticales S_z (Imagen CONTOUR)
- iv. Tensiones verticales S_z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH)
- v. Tensiones principales S_i (Imagen CONTOUR) en la armadura

d. CASO 3: ANCLAJE MECANICO EXPANSIVO SIN ACERO DE ARMAR

- i. Desplazamiento en Z (Imagen CONTOUR)
- ii. Desplazamientos en Z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH)
- iii. Tensiones verticales S_z (Imagen CONTOUR)
- iv. Tensiones verticales S_z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH)

e. CASO 4: ANCLAJE MECANICO EXPANSIVO CON ACERO DE ARMAR

- i. Desplazamiento en Z (Imagen CONTOUR)
- ii. Desplazamientos en Z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH)
- iii. Tensiones verticales S_z (Imagen CONTOUR)
- iv. Tensiones verticales S_z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH)
- v. Tensiones principales S_i (Imagen CONTOUR) en la armadura

10. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

a. Anclajes químicos

b. Anclajes mecánicos expansivos

11. COMENTARIOS FINALES

12. BIBLIOGRAFIA

13. ANEXOS:

a. Ficha Anclaje para altas cargas W-HAZ de WURTH

b. Ficha Anclaje de unión W-VAD

1. OBJETO DEL TRABAJO

El objeto de la presente Tesis de Master es realizar el estudio de un problema estructural haciendo uso de los conocimientos adquiridos en el Curso de Master de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, (a distancia) de CIMNE (UPC). Dicho trabajo incluye el planteamiento, resolución e interpretación de resultados de un problema estructural haciendo uso del Método de los Elementos Finitos.

En los siguientes apartados se procede a describir el trabajo y exponer sus resultados. El problema estructural elegido consiste en el estudio del efecto que tiene el armado del hormigón, sobre la acción de los anclajes implantados en el hormigón: es decir, en qué medida influye el armado del hormigón sobre los movimientos, las tensiones, y otros efectos del anclaje en el hormigón que lo soporta. Con ello se persigue conocer, por ejemplo, si el anclaje podría admitir más carga exterior, al contar con la colaboración del armado para resistir la carga externa, y en qué medida.

Se ha estudiado el problema sobre dos tipos de anclaje muy habituales en construcción, tanto en edificación como en obra civil: los anclajes denominados químicos (bonded anchors) y los mecánicos por expansión (expansion anchors).

Este tipo de sistemas de anclaje son muy habituales en edificación y obra civil, pues son muy sencillos de utilizar, y permiten fijar a soportes rígidos elementos pesados, de manera muy eficaz y rápida. Son una herramienta muy extendida: hay en el mercado un número importante de fabricantes de estos elementos, tanto del propio elemento de fijación (tornillo o barra de acero para expansión), como de los productos a ellos asociados (productos químicos, etc).

Se ha realizado el cálculo por elementos finitos del problema tanteando diferentes tipos de mallado hasta elegir el definitivo. Finalmente se ha estudiado el problema a la luz de los resultados mediante las herramientas de postproceso.

El autor de la presente Tesis de Master trabaja actualmente en una unidad de Obras Hidráulicas de la Administración, y su trabajo consiste en la dirección y supervisión de proyectos y dirección de obras en el mencionado campo. En el curso del ejercicio de direcciones de obras, con frecuencia ha hecho uso de estos sistemas, teniendo interés en estudiar la influencia del armado en la efectividad de los anclajes, de cara, esencialmente, a tenerlo presente para posteriores aplicaciones.

2. DESCRIPCION DEL TRABAJO

El trabajo tiene los capítulos siguientes, a partir del presente apartado:

- a. Información técnica general sobre sistemas de anclaje: se presentan algunos ejemplos de fijación mediante estos anclajes, se relacionan sistemas usuales de anclaje y se presentan con más detalle los dos anclajes que se consideran en el presente trabajo: los de expansión por par controlado y los de fijación química. Se exponen someramente algunas formas de rotura de los anteriores anclajes y se mencionan varios documentos de referencia en esta materia.

- b. Descripción del problema estructural a calcular: se plantea el problema a estudiar y se da una descripción geométrica de la estructura que se calcula.
- c. Hipótesis y datos de partida del cálculo estructural: en este capítulo se recogen, entre otros, las características de los materiales de los elementos estructurales, y se considera el material del cemento. Además se expone el conjunto de casos de carga que se consideran en el caso el anclaje químico y en el del mecánico expansivo y su combinación. Se recogen algunas hipótesis simplificativas que se adoptan, con su motivación.
- d. Descripción del trabajo de cálculo por elementos finitos de la estructura: este capítulo incluye una descripción somera de los trabajos de pre y postproceso realizados (pues se desarrollan más a fondo en sus correspondientes apartados). Se cita que son 4 los casos de cálculo (mallado) que van a realizarse y se citan los programas de cálculo utilizados.
- e. Preproceso: se abordan en este punto las técnicas de preproceso aplicadas, a saber, entre otras: modelización de la estructura (tipo de elemento utilizado, condiciones de borde, etc.) tipo de mallado utilizado (estructurado o no), características geométricas del elemento usado (triángulo, cuadrilátero), etc.
- f. Análisis: este apartado recoge de forma sintética las características del cálculo estructural
- g. Postproceso: se expone aquí, esencialmente, el conjunto de salidas gráficas que se van a obtener, tanto de perspectivas de contorno para desplazamientos como para tensiones. También se obtendrá otro tipo de salida posibilitada por las herramientas de postproceso: curvas que muestran la distribución de movimientos y esfuerzos según líneas de la estructura.
- h. Análisis de los resultados: con los resultados de los casos de cálculo analizados, se comparan estos (los del anclaje químico entre sí, y los del anclaje mecánico expansivo entre sí), al objeto de obtener conclusiones respecto del problema planteado.
- i. Comentarios finales: síntesis de las anteriores conclusiones
- j. Bibliografía: relación de documentación citada en el presente trabajo
- k. Anexos: Fichas técnicas de dos anclajes comerciales

3. INFORMACION TECNICA GENERAL SOBRE SISTEMAS DE ANCLAJE

a. Introducción

En Edificación y Obra Civil, es muy usual la necesidad de fijar algún elemento a soportes fijos:

- Armarios eléctricos a paredes
- Conducciones a muros mediante abrazaderas
- Equipos a muros mediante perfiles angulares
- Máquinas a soleras de hormigón (bombas, muy típicamente)
- Etc.

Para ello, un sistema muy usual y que permite adaptarse en muchos casos a las sollicitaciones que va a generar el elemento a fijar, son las soluciones comerciales de anclajes. Se muestran seguidamente algunos casos tomados de (1)

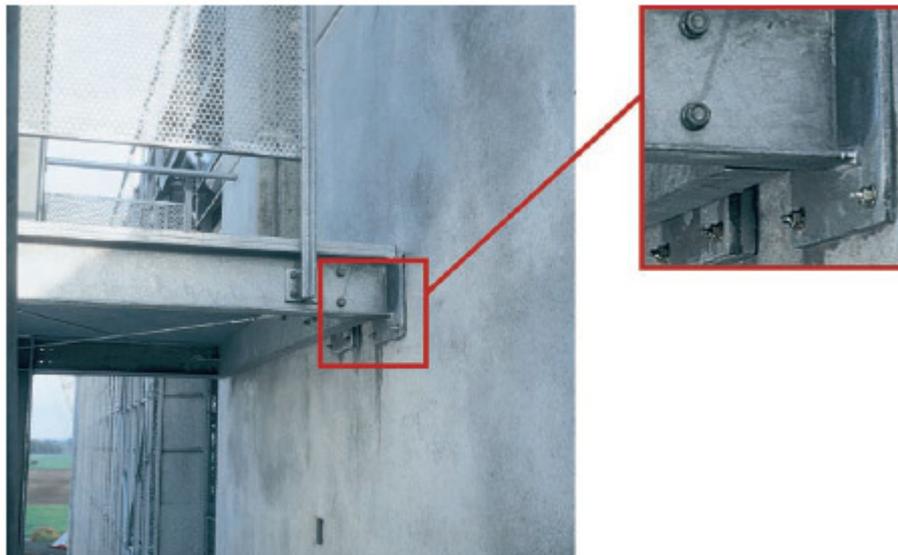


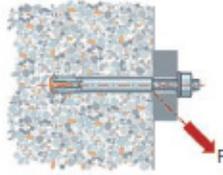
Figura 2.7: Fijación de un componente metálico con Würth W-VAD/A4, M1.



Figura 2.11: Fijación de equipamientos con Würth WFAZ/S, M12.

Como se puede apreciar, el uso de estos sistemas de anclaje o fijación permite de forma sencilla el sostenimiento de elementos pesados.

Sobre el sistema de fijación actúa la carga según se aprecia en la imagen siguiente, tomada, así mismo de (1):



Combinación de tracción y corte

b. Sistemas usuales de anclaje

Existen diversos sistemas de anclajes, que relacionamos seguidamente –incluimos entre paréntesis la Guía Técnica Europea de Aplicación correspondiente a cada sistema de anclaje-, según se puede ver en (2 y 3):

- Anclajes de expansión de par controlado (ETAG nº1 001 Parte 2)
- Anclajes por enclavamiento de forma (ETAG nº1 001 Parte 3)
- Anclajes de expansión por golpeo (ETAG nº1 001 Parte 4)
- Anclajes de fijación química (ETAG nº1 001 Parte 5)

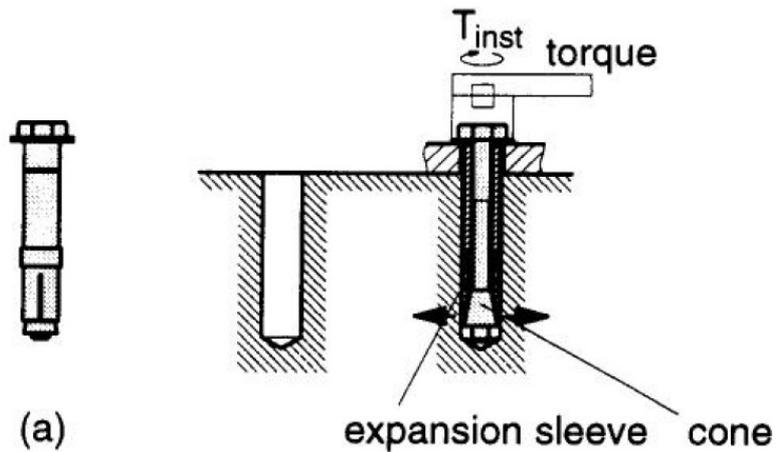
En la presente Tesis de Master únicamente analizaremos el primero y el último de ellos, por ser los que ha utilizado el autor del presente trabajo en su quehacer profesional, y por estimar que son bastante habituales, es decir,

- Anclajes de expansión de par controlado
- Anclajes de fijación química

Además, analizaremos únicamente el caso en que los anclajes están implantados en un soporte de hormigón.

c. Anclajes de expansión de par controlado

En la siguiente ilustración, tomada de (4) se presentan elementos característicos de este tipo de anclaje:



Así, en (a) se muestra un perno típico, con su tuerca superior, su fuste, y el segmento que se ha de expandir para generar la fuerza de anclaje, en la parte inferior. La imagen central es el taladro en que se alojará el perno. La imagen de la derecha representa el perno ya introducido. Se ha representado la llave dinamométrica (“ de carraca”, usualmente) aplicándole el par de apriete al perno, con lo que consigue que el segmento de expansión se abra, contacte con las paredes del taladro.

Las imágenes siguientes, tomadas de (1) dan así mismo, detalles de estos anclajes

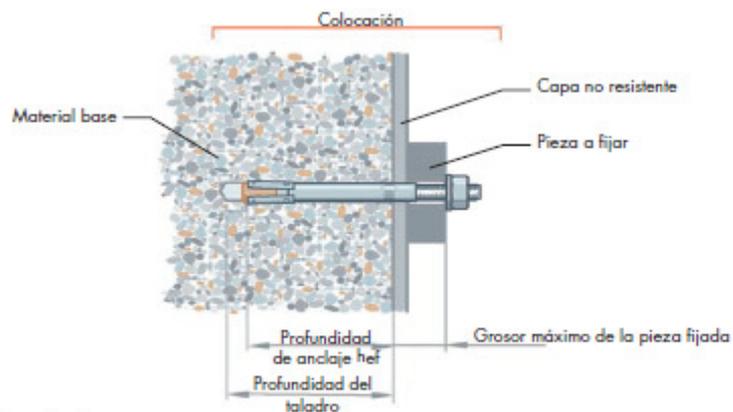


Figura 5.1: Anclaje colocado.

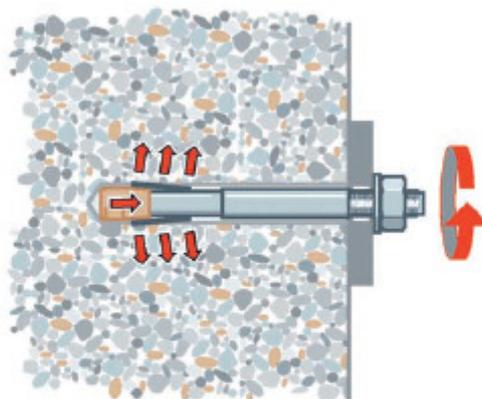
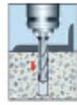


Figura 5.6: Principio de funcionamiento de un anclaje metálico de expansión por par de apriete (fricción entre la superficie del taco de los segmentos de expansión y los lados del agujero taladrado): para un anclaje de tipo perno.

En la anterior figura queda más claro el funcionamiento del anclaje: una vez expandido el segmento de expansión, y acortada la barra interior al apretarla desde fuera sobre la tuerca, se genera una fuerza que comprime al soporte (material base) la pieza a fijar, pudiendo así cumplir el anclaje su función.

A continuación se presentan algunos productos concretos de catálogo de este tipo de sistemas de anclaje, tomados de (5)



Taladrar el agujero mediante un taladro rotativo y con la broca indicada

Figura 5.6: Colocación pasante con el anclaje Wirth W-HAZ de tipo lazo.



Taladro rotativo y con la broca indicada

Figura 5.7: Colocación pasante con el anclaje Wirth W-FAZ de tipo perno.

03 Anclaje para altas cargas W-HAZ

W-HAZ-B
Con perno roscado, acero cincado galvanizado

W-HAZ-S
Con tornillo de cabeza hexagonal, acero cincado galvanizado

W-HAZ-SK
Con tornillo de cabeza avellanada y tornillo de cabeza cilíndrica, acero cincado galvanizado



d. Anclajes de fijación química

En la siguiente ilustración, tomada de (1), se representa un anclaje de este tipo, ya instalado, y su forma de trabajo, por adherencia con las paredes del taladro. Esta adherencia se ha conseguido mediante la aplicación, previa a la introducción del tornillo de un producto químico que, una vez fraguado, endurece y hace que el tornillo quede monolíticamente unido al soporte. El tiempo de fraguado lo determina el fabricante del producto: no es raro que pueda ser de 1 a 2 horas, pero en esta materia hay bastante variación, dependiendo del producto y de las condiciones ambientales

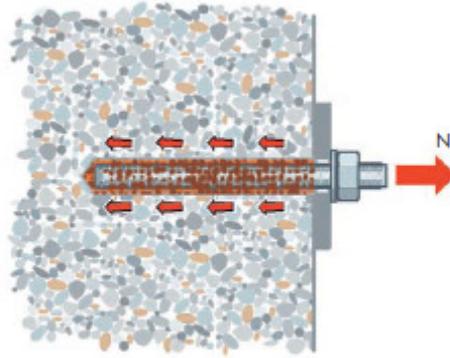


Figura 5.17: Transferencia de carga para anclajes por adhesión.

La siguiente ilustración, también de (1), muestra la forma de instalación usando como producto de adherencia una resina.

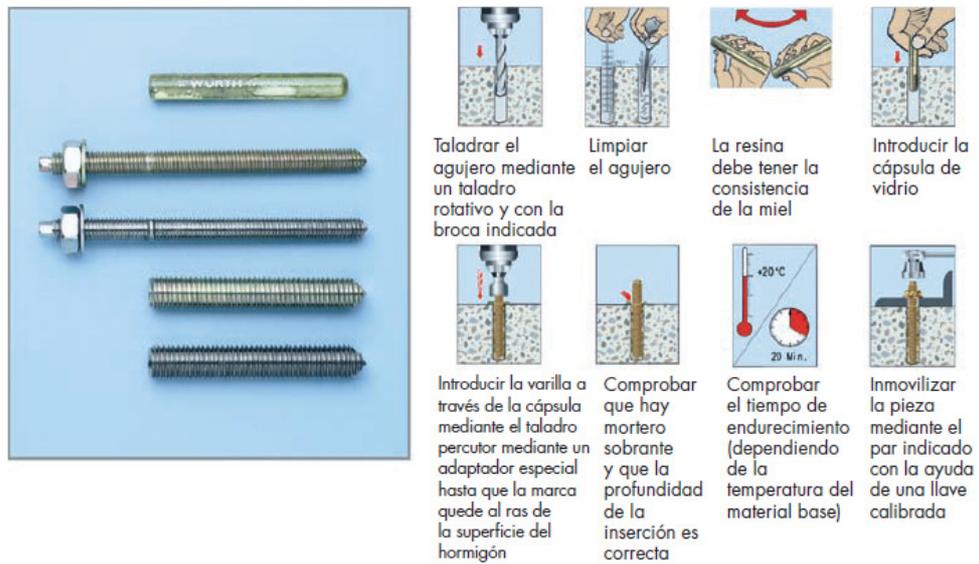
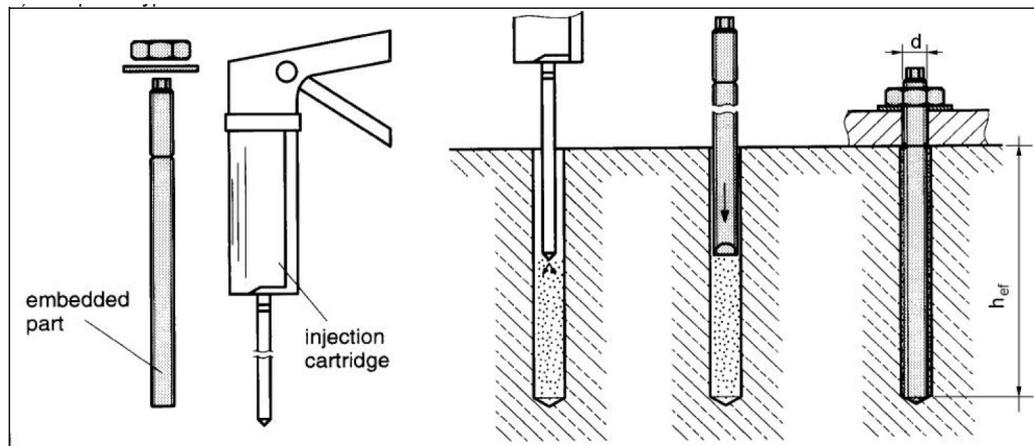


Figura 5.19: Instalación pre-colocada de un anclaje Würth W-VAD en un hormigón no fisurado.

La imagen siguiente, tomada de (6), muestra análogamente la inyección del producto adherente en el taladro.



b) injection type

Como en el caso anterior, a continuación se presentan algunos productos concretos de catálogo de este tipo de sistemas de anclaje, tomados de (5)



presente Tesis de Master únicamente analizaremos el primero y el último de ellos, por ser los que ha utilizado el autor del presente trabajo en su quehacer profesional, y por estimar que son bastante habituales, es decir

- Anclajes de expansión de par controlado
- Anclajes de fijación química

e. Formas de rotura de los sistemas de fijación

Existen diferentes formas de rotura, para cada sistema de anclaje, que dependen de muy diversas variables: se puede producir la rotura en el hormigón de base, o en el perno, o en el material de adherencia.

Una forma de rotura correspondiente a anclajes de expansión sería la de las figuras siguientes, tomadas de (1)

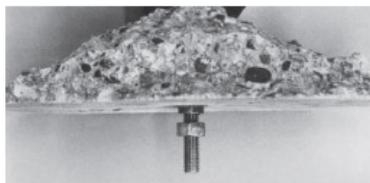
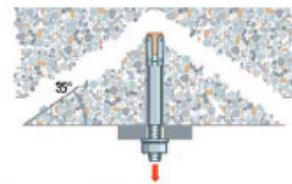
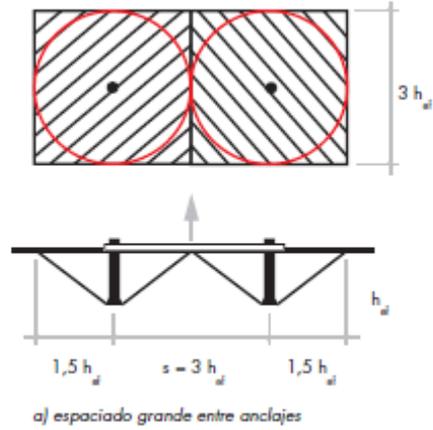


Figura 6.1: Rotura del cono de hormigón producido por un anclaje metálico trabajando a tracción. [30]

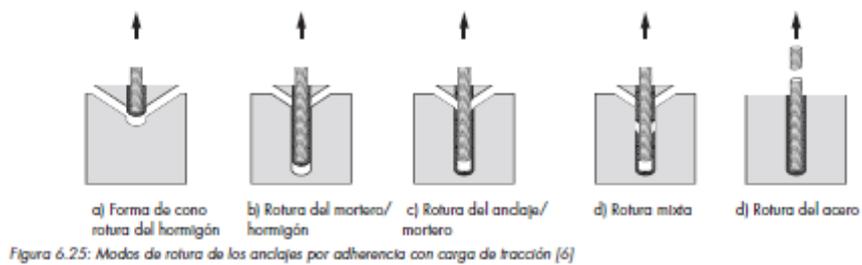


Rotura por cono de hormigón

O si hay anclajes ubicados cerca de otros, lo cual es lo habitual en placas de anclajes



Para anclajes químicos, se pueden mencionar las siguientes formas de rotura (1):



f. Normativa y documentación técnica de aplicación.

Sin querer ser exhaustivos, mencionaríamos como documentación de partida los documentos 2, 4 y 6, mencionados en la Bibliografía (ETAG 001) que realmente son Guías, y luego los ETA, o European Technical Approval de los elementos (pernos, tornillo y productos químicos), correspondientes a cada producto comercial.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ESTRUCTURAL A ESTUDIAR

a. Problema objeto del trabajo

En algún catálogo de anclajes de marcas comerciales, se presentan los productos, y las capacidades estimadas de carga, para diferentes hipótesis (por ejemplo la referencia 5). La siguiente figura es un ejemplo de ello:

Datos de capacidad		M6	M8	M10	M12	M16	
Fuerza de tracción	Zona de tracción (horm. con fisura C20/25 ²) $s \geq 3h_{ef}$, $c \geq 1,5 h_{ef}$	N [kN] = C20/25 ²)	2,4	5,7	7,6	11,9	16,7
	Zona de compresión (horm. sin fisura C20/25 ²) dist. mín. entre eje y al borde $c \geq 3h_{ef}$, $c_{comp} \geq 1,5 h_{ef}$		5,7	7,6	11,9	14,3	19,1
	Zona de compresión (horm. sin fisura C20/25 ²) capacidad portante max. $c \geq 3h_{ef}$, $c_{comp} \geq 2,5 h_{ef}$		7,6	9,5	14,3	16,7	23,8
Fuerza cortante	Zona de tracción (horm. con fisura C20/25 ²) $c \geq 10 h_{ef}$	V [kN] =	6,9	11,4	17,1	22,9	34,3
	Zona de compresión (horm. sin fisura C20/25 ²) $c \geq 10 h_{ef}$		6,9	11,4	17,1	22,9	40,0
Momento flector	M [Nm]	6,9	17,1	34,3	60	152	
	F30 [kN]	1,8	2,6	7,0	10,0	16,0	
	F60 [kN]	0,85	1,4	2,9	4,1	6,9	
Resistencia al fuego	F90 [kN]	0,55	0,95	1,75	2,5	4,25	
	F120 [kN]	0,4	0,75	1,2	1,7	3,0	

En anexo se reproduce la ficha técnica completa.

También se incluyen estas tablas de prestaciones en los documentos ETA (European Technical Approval) de cada producto comercial.

Pues bien, por ejemplo, en la ficha técnica que se incluye en el anejo a, obsérvese en el primer renglón –también en la figura anterior-, que, si tomamos el anclaje de Métrica 12 (M12), se puede ver que la capacidad del anclaje en Fuerza de tracción, en zona traccionada (hormigón con fisura C20/25²) $s \geq 3h_{ef}$, $c \geq 1,5 h_{ef}$ es de 11,9 kN. Si se va a la nota 2 que hay en la ficha (ver anejo a), la nota 2 dice: “El hormigón tiene una armadura normal. Puede haber valores más elevados en hormigones más resistentes”. Los significados de las variables s , c y h_{ef} se pueden consultar en las referencias 2,4 y 6 y son distancias geométricas correspondientes a la implantación, que ahora no nos afectan.

En la ficha técnica del anclaje químico (anejo b) que hemos mencionado en el apartado 3d anterior no hay mención del armado del soporte.

Pues bien, el problema objeto del presente trabajo es el análisis de la influencia del armado en el sistema de fijación, tanto en el caso del anclaje por expansión, como en el químico.

b. Descripción geométrica del problema

Para analizar el problema, se va estudiar un anclaje implantado en una solera de hormigón. Se somete al sistema a varias cargas:

- i. Peso propio del anclaje y del hormigón
- ii. Una carga inicial sobre el anclaje que simularía el efecto de tracción debido al par de apriete aplicado inicialmente. Esta carga tracciona el anclaje y comprime el hormigón
- iii. Una carga de tracción según el eje del anclaje

El sistema así solicitado se calcula en los siguientes casos:

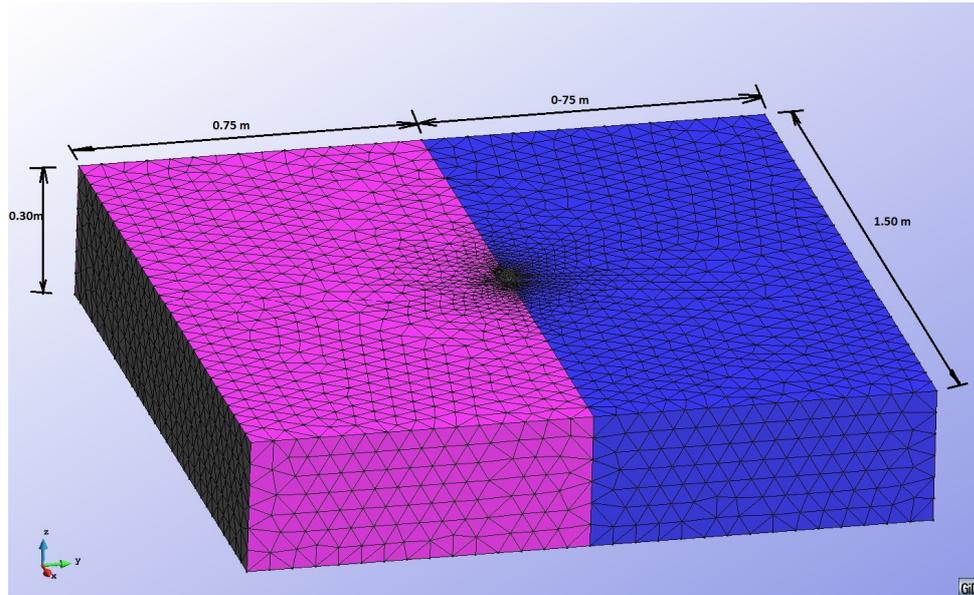
- i. Anclaje químico sin armado
- ii. Anclaje químico con armado
- iii. Anclaje mecánico por expansión sin armado

iv. Anclaje mecánico por expansión con armado

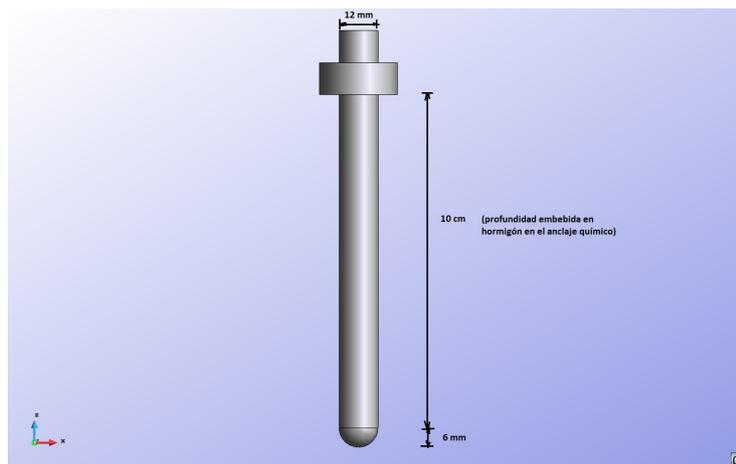
En las siguientes figuras se representa el esquema de cálculo sin armar, que consta de:

- i. Una solera cuadrada de 1.50 m x 1.50 m y 0.30 m de espesor
- ii. Un perno de una profundidad embebida en el hormigón de unos 11 cm

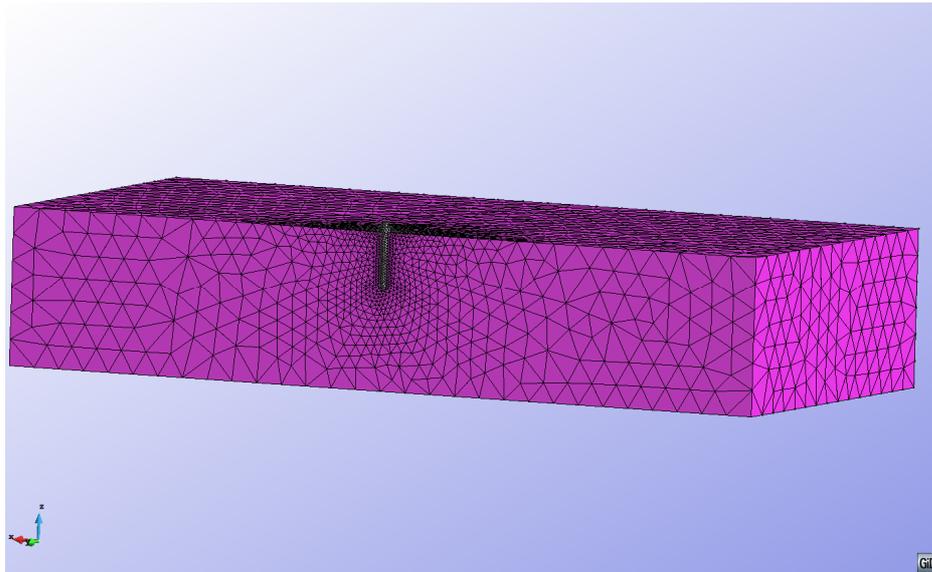
En las ilustraciones siguientes se puede ver las dimensiones del elemento que se va a calcular



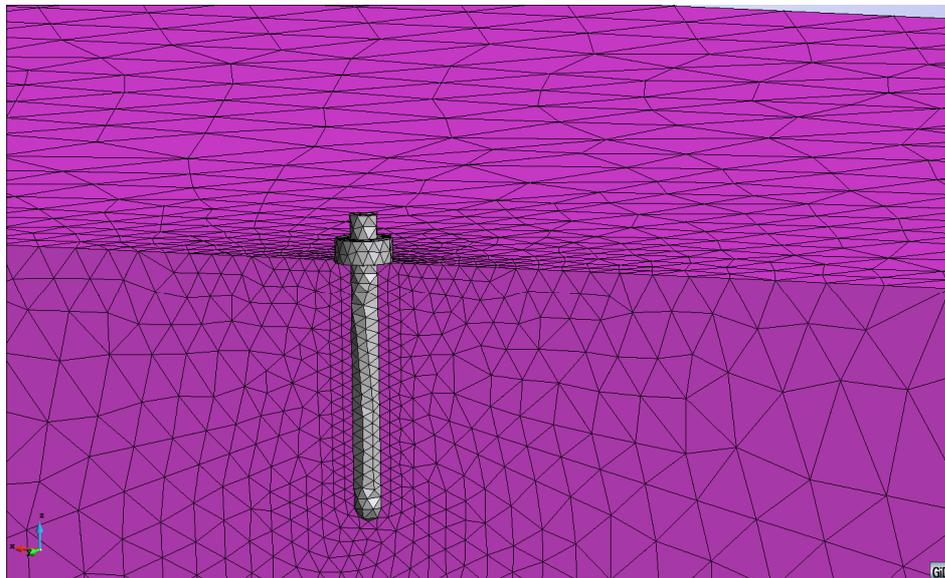
El perno, tal y como inicialmente se ha definido para el anclaje químico es el siguiente (el anclaje mecánico es algo diferente pues hay que modelizar la zona que correspondería al ensanche de expansión):



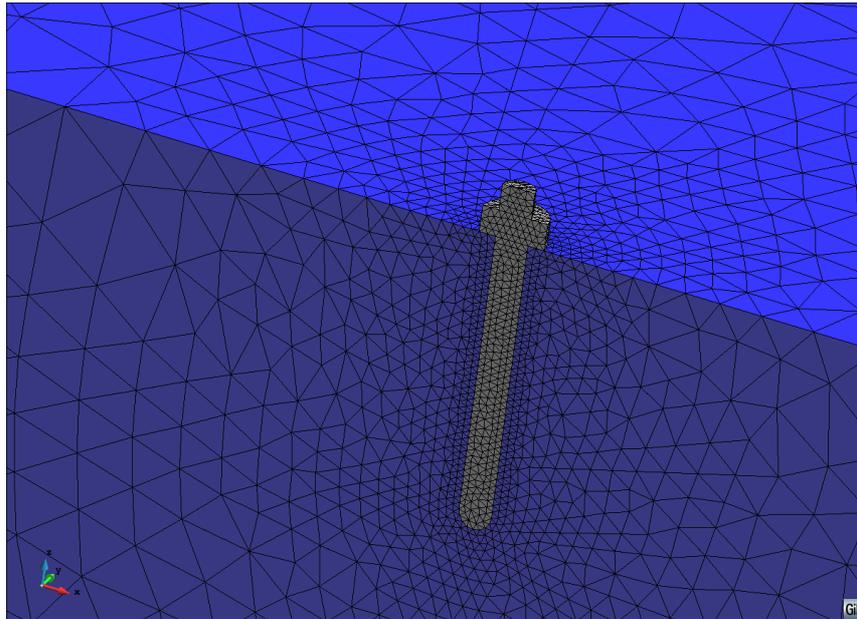
Como se verá más adelante, sólo se va a modelizar una mitad, pues si no, el modelo se sobrecarga.



La siguiente imagen estaría pendiente de ajuste:



Quedaría finalmente así, dando lugar a medio perno:



5. HIPOTESIS Y DATOS DE PARTIDA DEL CALCULO ESTRUCTURAL

a. Material de los elementos estructurales y características mecánicas

i. Hormigón de la solera

El material de la solera será hormigón de resistencia característica 25 N/mm² (HA-25). Sus características mecánicas son, de acuerdo a la Instrucción EHE-08:

- a. Resistencia mecánica: $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$
- b. Resistencia media del hormigón a 28 días $f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2 = 33 \text{ N/mm}^2$
- c. Módulo elástico secante (*todas unidades en (N/mm²)*): $E_{cm} = 8500 (f_{cm})^{1/3} = 8500 (33)^{1/3} = 27264.04 \text{ N/mm}^2$. Por ello $E = 27264.04 \text{ N/mm}^2$
- d. Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.2$
- e. Peso específico del hormigón en masa $\gamma = 23.0 \text{ kN/m}^3$

ii. Material del perno de anclaje químico

Adoptaremos un material típico de estos pernos –usado por el autor-, en este caso tornillo de acero inoxidable –podría ser galvanizado- de calidad A4 –cumpliendo normas UNE 3506 y UNE EN 1088- Será un perno de características cercanas al que se presenta en el anejo b (anclaje parecido al W-VAD de Wurth) y métrica 12 (M12 diámetro 12 mm) :

- a. Resistencia mínima a tracción 700 Mpa
- b. Clase de calidad 70
- c. Módulo elástico a 20°C $E = 200 \text{ kN/mm}^2$

- d. Densidad $\rho=8 \text{ kg/dm}^3$, es decir, peso específico $\gamma = 78,4 \text{ kN/m}^3$
- e. Coeficiente de Poisson $\nu=0.3$

iii. Material del perno de anclaje mecánico expansivo

Adoptaremos las mismas características mecánicas que para el anclaje químico.

iv. Material del acero pasivo de las barras

El acero pasivo a utilizar estará formado por una malla de barras de diámetro 12 mm espaciadas 15 cm entre ejes, y las características del material son las siguientes:

- a. Módulo elástico a 20°C $E= 210 \text{ kN/mm}^2$
- b. Peso específico $\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$
- c. Coeficiente de Poisson $\nu=0.3$

Queremos indicar que el armado propuesto (barras de diámetro 12 mm espaciadas 15 cm entre ellas es un armado que estimamos denso para esta situación. El perno quedará posicionado en medio de una cuadrícula de 15 x 15, es decir, distante 7.5 cm respecto de las barras, esto es, una distancia inferior a su propia dimensión enterrada del perno (10 cm o más), por lo cual, estimamos que el acero implantado de armar pudiera tener a priori cierta influencia en el comportamiento del perno.

De las dos capas de acero pasivo, la más externa tiene un recubrimiento de 3,5 cm medido desde el c.d.g. de la armadura al paramento exterior de la solera; la más interna, tiene un recubrimiento de 5 cm medido de igual manera. El primer recubrimiento es bastante usual en construcción; el segundo quizás queda un poco dentro, pero se estima posible.

b. Material del cemento

Se adoptará un suelo indeformable, con lo que no es preciso definir coeficientes de balasto ni otros datos.

c. Casos de carga considerados para el anclaje químico

i. Peso propio

Peso propio de todos los elementos (hormigón, perno y, en el caso armado, el acero de armar)

ii. Carga generada por el par de apriete

Se asimilará esta carga a una deformación inicial equivalente al esfuerzo axial (N) generado en el perno por el par de apriete (M). En efecto, estas dos variables están aproximadamente relacionadas por la expresión siguiente:

$M=K \times d \times N$, donde

- d es el diámetro $d = 12 \text{ mm}$

- K es un coeficiente que, para un tornillo sin galvanizar está entre 0.2 y 0.3: tomamos 0.25
- M lo tomamos de la tabla del anejo b para el tornillo de M12 W-VAD = 40 Nm

Despejando N se tiene: $N = 1666.67 \text{ N} = 1.67 \text{ kN}$, comprobamos que es menor que el axil de trabajo en tracción en la tabla del anejo b, que vale 10 kN)

Esta precarga equivale a una deformación inicial que se calcula considerando: $\sigma = E \times \epsilon$, es decir: $\epsilon = \sigma/E = F/(E \times \text{sección transversal})$.

Simplificando, la sección transversal de un tornillo M12 vale:

$$\Omega = \pi/4 \times d^2 = \pi/4 \times 12^2 = 113,10 \text{ mm}^2$$

Entonces la deformación equivalente a la precarga es de :

$$\epsilon = \sigma/E = F/(E \times \text{sección transversal}) = 1,67/200/113,10 = 7.236 \times 10^{-5}$$

iii. Carga externa aplicada

Adoptamos la que viene en la ficha del anejo b: es decir, adoptamos 10kN, que en realidad, en nuestro modelo ha de ser la mitad, pues sólo modelizamos media estructura, es decir 5 kN a aplicar en cabeza de perno.

d. Casos de carga considerados para el anclaje mecánico expansivo

i. Peso propio

Peso propio de todos los elementos (hormigón, perno y, en el caso armado, el acero de armar)

ii. Carga generada por el par de apriete

Se asimilará esta carga a una deformación inicial equivalente al esfuerzo axil (N) generado en el perno por el par de apriete (M). En efecto, estas dos variables están aproximadamente relacionadas por la expresión siguiente:

$M = K \times d \times N$, donde

- d es el diámetro $d = 12 \text{ mm}$
- K es un coeficiente que, para un tornillo sin galvanizar está entre 0.2 y 0.3: tomamos 0.25
- M lo tomamos de la tabla del anejo a para el tornillo de M12 W-HAZ = 90 Nm (valor intermedio entre 80 y 100 Nm de la tabla)

Despejando N se tiene: $N = 30000 \text{ N} = 30.0 \text{ kN}$, vemos que es mayor que el axil de trabajo en tracción en la tabla del anejo a, que vale 16.7 como mucho kN)

Esta precarga equivale a una deformación inicial que se calcula considerando: $\sigma = E \times \varepsilon$, es decir: $\varepsilon = \sigma/E = F/(E \times \text{sección transversal})$.

Simplificando, la sección transversal de un tornillo M12 vale:

$$\Omega = \pi/4 d^2 = \pi/4 \times 12^2 = 113,10 \text{ mm}^2$$

Entonces la deformación equivalente a la precarga es de :

$$\varepsilon = \sigma/E = F/(E \times \text{sección transversal}) = 30.0/200/113,10 = 1.326 \cdot 10^{-3}$$

iii. Carga externa aplicada

Adoptamos la mayor de las que aparecen en la ficha del anejo a : es decir, adoptamos 16.7 kN, que en realidad, en nuestro modelo ha de ser la mitad, pues sólo modelizamos media estructura, es decir 8.35 kN a aplicar en cabeza de perno.

e. Combinación de cargas

Tanto en el anclaje químico como en el mecánico se van a combinar las tres cargas anteriores en Estado Límite de Servicio, es decir, ponderando con la unidad las cargas actuantes y minorando con la unidad las resistencias. En ocasiones este Estado Límite de Servicio (ELS) suele penalizar más que el Estado Límite Último (ELU). En cualquier caso, la mecánica de trabajo sería la misma, cambiando los coeficientes.

f. Hipótesis simplificativas adoptadas

En los cálculos se han hecho las siguientes hipótesis simplificativas:

- i. Se hace el cálculo estructural en régimen elástico lineal: a pesar de que razonablemente, el hormigón tendrá fisuraciones -si bien, los proyectos estructurales se hacen admitiendo anchos de fisura acotados-, es usual hacer esta hipótesis simplificativa.
- ii. No sólo los materiales si no también la geometría se admite lineal: es decir, el problema es material y geoméricamente lineal: esta última hipótesis parece lógica no habiendo elementos esbeltos en el problema.
- iii. Se ha limitado el cálculo el Estado Límite de Servicio (ELS). El cálculo en Estado Límite Último es análogo, pero en muchas ocasiones es el ELS el que condiciona el dimensionamiento.
- iv. Se ha considerado que el efecto del anclaje no es apreciable en los bordes de la estructura, es decir, que hemos elegido una dimensión desde el perno al borde (0.75 m) que es mucho mayor que el perno (0.10 m), y que el efecto del anclaje no llegará hasta ahí. Esto se apreciará mejor en el postproceso.
- v. En el caso del anclaje químico se va a modelizar el perno sin tuerca, pues ello conlleva una complejidad adicional de modelizar -contacto con la solera-, que estimamos que no aportaría mejora muy notable a los resultados que se buscan, pues de lo que se trata es de ver el

efecto del acero de armar cuando se aplica totalmente la fuerza de trabajo, -que es bastante superior a la de precompresión-, es decir, cuando la tuerca ya no estará presumiblemente en contacto. Se prescinde de modelizar la tuerca: sólo se modelizará el tornillo o perno sin tuerca. De esta forma no se capta totalmente la precompresión en la solera –sólo a través de la adherencia del perno-, pero estimamos que para analizar lo que se persigue –ver el efecto del armado- puede ser una razonable aproximación. Para conseguir resultados más cercanos a la realidad sería preciso modelizar este efecto de precompresión, en una segunda aproximación. Sin embargo, como en el anclaje mecánico ocurre al revés, el perno no se despegará, pues la precompresión es superior a la carga externa, que además es mucho mayor que la del anclaje químico. Aquí si se modeliza la tuerca, pues no se despega.

- vi. Simetría: solo se calculará la mitad de la estructura, para no generar un modelo muy pesado, especialmente con el acero de armar. Ello obligará a imponer como condición de contorno que no habrá movimientos perpendiculares al plano de simetría.

6. DESCRIPCION DEL TRABAJO DE CALCULO POR ELEMENTOS FINITOS DE LA ESTRUCTURA

a. Descripción general del cálculo por elementos finitos

El procedimiento de cálculo a seguir tanto con el anclaje químico como en el mecánico va a ser el usual en estos casos:

- i. Modelización de la estructura y entrada de datos geomecánicos: a partir de las características de la estructura se define el modelo a calcular, y se elige el tipo de elemento a usar. En este caso es una estructura espacial sin elementos lineales o superficiales, por lo que se elegirá elementos de tipo Sólido.
- ii. Mallado del modelo, donde se podrá elegirá mallas no estructurada con tetraedros, estimada más fácil de adaptarse a la geometría real. Las actividades de preproceso incluyen el mallado y la mayoría de las citadas en el punto anterior.
- iii. Cálculo matricial
- iv. Obtención de resultados y postproceso

b. Alternativas de mallado que se van a estudiar

Únicamente se va a utilizar el mallado no estructurado, por entender que se adapta mejor a la geometría. Se usarán tetraedros cuadráticos. Los casos de mallado a estudiar serán cuatro: los dos del anclaje químico (sin y con armadura) y los dos del mecánico expansivo (sin y con armadura).

c. Recursos informáticos utilizados para el presente trabajo

Para la realización del presente trabajo se va a hacer uso de los siguientes recursos informáticos, de los que disponemos de licencia temporal:

- GiD: pre y postprocesador
- RAM Series: entorno de elementos finitos para análisis estructural que hace uso de GiD para pre y postproceso.

7. PREPROCESO

a. Modelización de la estructura

i. Tipo de elemento

La solera de hormigón es un volumen de 0.75 m x 1.50 m x 0,30 m (la mitad del original), pues se aprovecha la simetría y sólo se calcula media estructura.

No es una estructura especialmente esbelta, ni lineal, por lo cual, no parece tener sentido usar elementos tipo SHELL o BEAM de RAM Series.

Con relación al perno, tanto en el caso de anclaje químico como en el mecánico expansivo, pasa lo mismo: no son elementos superficiales que justifiquen elementos SHELL, ni tampoco es una viga. Por ello, adoptamos el elemento SOLID.

Con respecto al acero de armar, usaremos también el elemento SOLID.

Utilizaremos el elemento tetraedro, típico para este análisis, en su variante cuadrática.

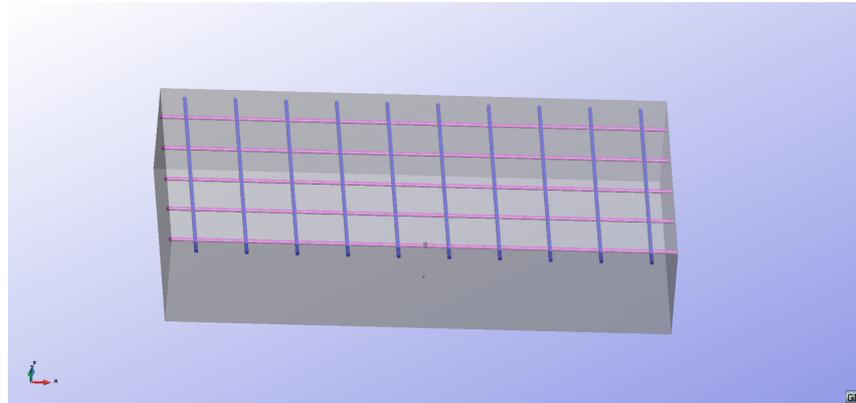
Con el anterior elemento, podemos obtener resultados en tensiones, que estimamos es de interés para comparar los resultados entre la opción sin armar y la opción con armadura en ambos tipos de anclajes.

El elemento que usaremos según la opción que nos da RAM SERIES es el ISOTROPIC SOLID, pues no hay diferencias en el material en ninguna dirección.

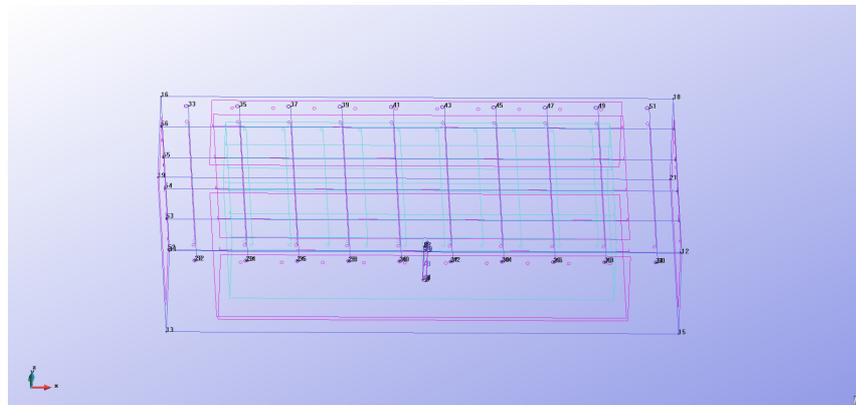
RAM Series pide que se aporten los datos de los elementos: creamos tres GRUPOS de elementos tipo SOLID para los dos tipos de anclaje:

- Uno para los pernos: E, ν y γ , son los indicados en el apartado 5 de este trabajo
- Otro para el hormigón de la solera: E, ν y γ , son los indicados en el apartado 5 de este trabajo
- Otro para el acero de armar: E, ν y γ , son los indicados en el apartado 5 de este trabajo

En la figura siguiente están representados los tres grupos (el perno se aprecia menos, al tener mismo color que la solera):



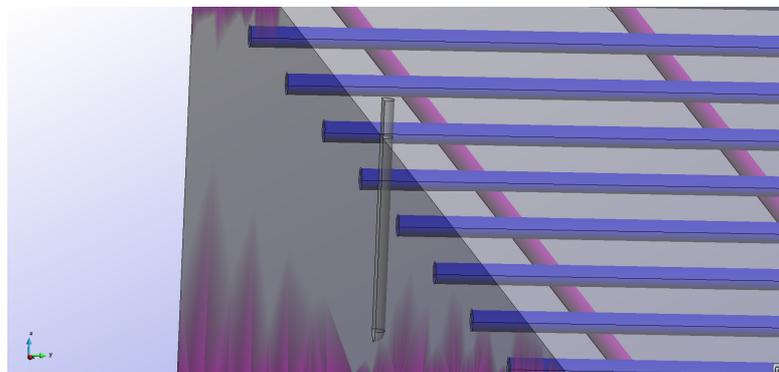
En la vista sólo geometría se aprecian tal vez mejor (esta imagen corresponde al anclaje químico con armadura):



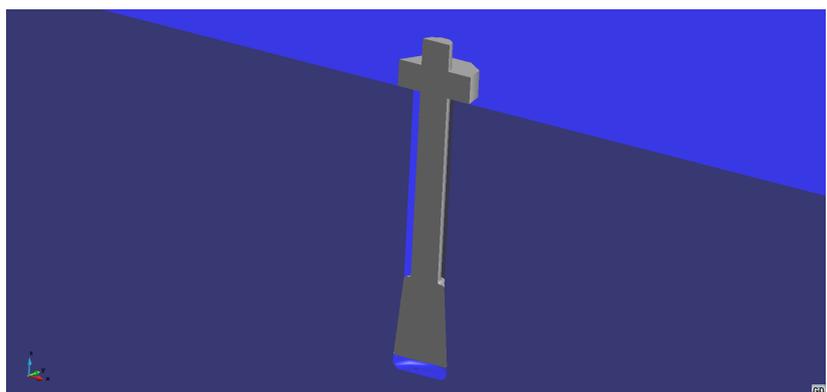
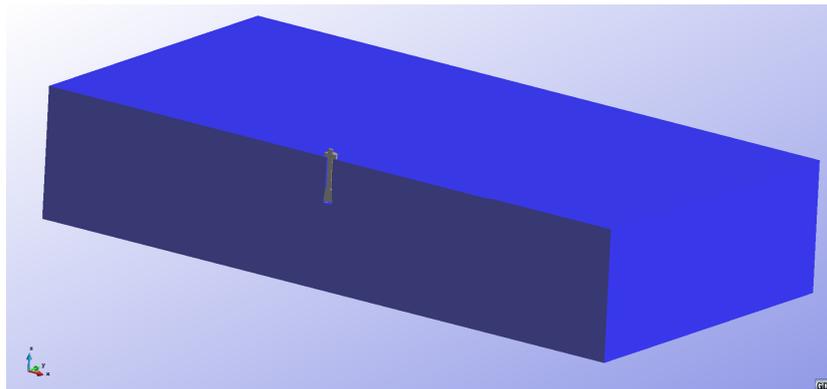
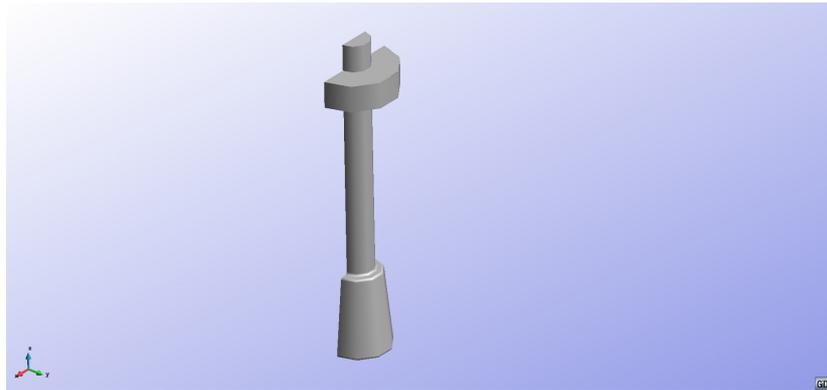
ii. Modelización de los pernos

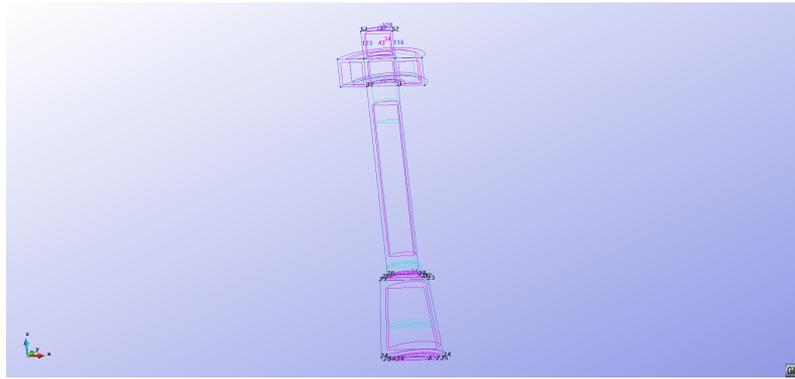
Se ha modelizado los pernos de diferente forma:

- a. Perno del anclaje químico: como este anclaje se adhiere al taladro en toda su superficie, se ha modelizado como en contacto con la solera de hormigón en todo punto en la zona embebida (10.6 cm)



- b. Perno del anclaje mecánico: está en contacto con el hormigón en la zona expandida inferior y bajo la tuerca. El perno tiene una longitud embebida de 10 cm, y el taladro es 5 mm más largo. El taladro tiene huelgo bajo el perno, igual que en las paredes verticales que no están en contacto: de esta forma hemos modelizado la zona de expansión, que viene a tener una longitud de 3 cm, respecto de los 10 de longitud embebida del perno. La tuerca es de 1 cm de alto, y el segmento de perno que sobresale es de 1 cm también.





iii. Condiciones de borde : Apoyo de la estructura y plano de simetría.

Según se ha comentado, la solera está apoyada sobre un terreno indeformable: se trata de un apoyo fijo, con movimientos prescritos de valor cero. Así se le indica a RAM Series.

En el plano de simetría, se prescriben movimiento cero en dirección perpendicular al plano de simetría (es decir, movimientos nulos en dirección Y). Los elementos SOLID no permiten imponer movimiento prescritos más que en puntos, no en superficies

No se han prescrito movimientos en las paredes laterales, que se han dejado libres, al estimar que estaban bastante lejos del perno. Se podía haber optado por prescribir sus movimientos en x e y, pero al final se ha dejado libre. Estimamos que no debería haber gran error por ello.

b. Mallado

i. Relación de mallados adoptados

Se ha hecho un mallado no estructurado en los casos estudiados, y se ha utilizado un elemento tetraedro cuadrático. Se ha estimado que se trata de una solución habitual, y suficientemente robusta. Tal vez se podía haber usado un tetraedro normal, habida cuenta de que hay bastantes elementos. Seguramente ello habría acelerado los cálculos.

Se ha tanteado el tamaño de elemento con los siguientes criterios:

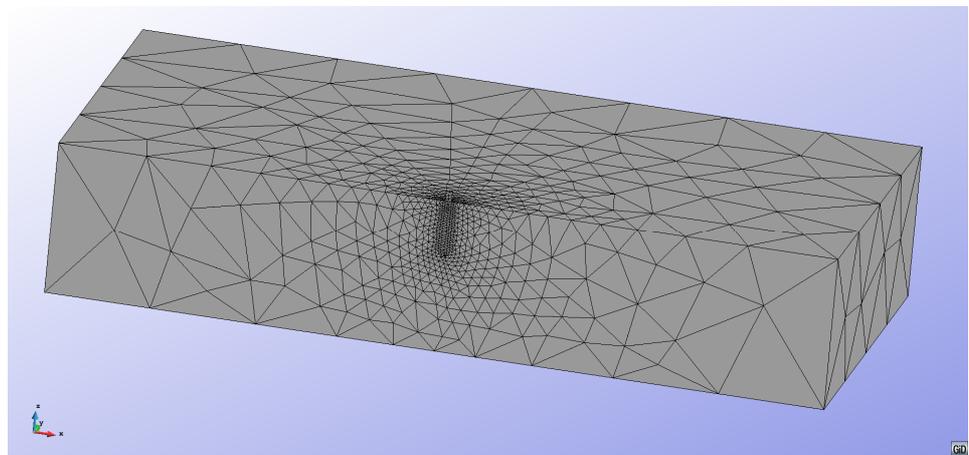
1. En la zona de la solera (su volumen y entidades asociados) se ha dado un tamaño de celda de 0.20 m (téngase en cuenta que el lado corto de la solera es de 0.30 m –su altura-), pero sólo nos hacen falta resultados “finos” en el entorno del perno.
2. En el entorno del perno se ha elegido tamaño de celda cercano a la dimensión pequeña del perno (su diámetro es 12 mm): se ha elegido tamaño máximo de celda en volúmenes, superficies y líneas, de 5 mm.
3. Para las barras de armar, de diámetro 12 mm, se ha elegido tamaño de malla de 8 mm.

4. Se indica ERROR CORDAL de 0.002
5. Se indica factor de graduación entre tamaños del entorno de 0.4 ó 0.5 en los casos armados, pues salen mallas muy densas.

ii. Mallado CASO 1: ANCLAJE QUIMICO SIN ARMADURA

En este caso el mallado tiene las siguientes características:

1. Tipo de elemento TETRAEDRO
2. Lado: 0.20 m en zona solera y 0.005 en entorno de perno, con factor de graduación 0.4 y error cordal 0.002
3. CUADRATICO: opción QUADRATIC de GiD
4. Número de elementos: 8396
5. Número de nodos: 12833

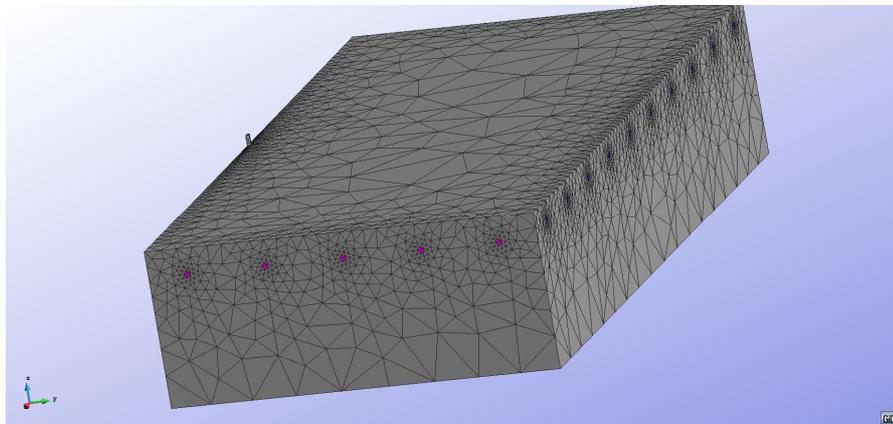
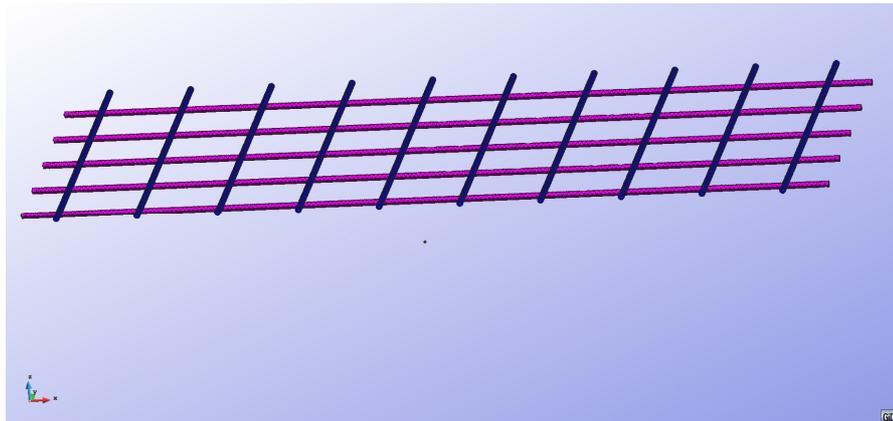
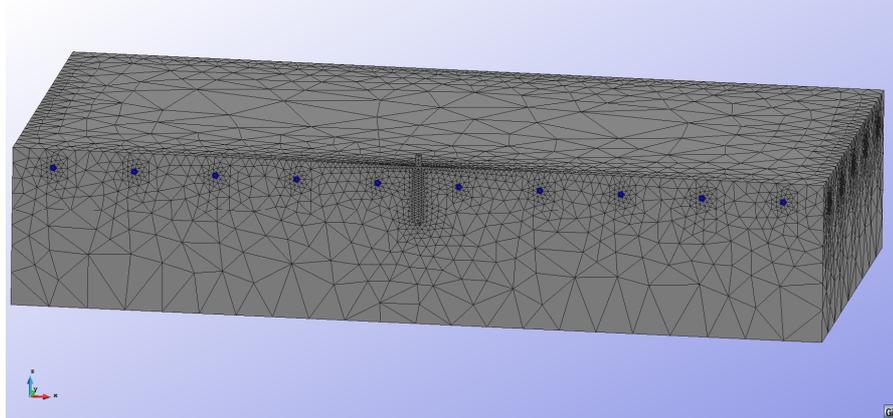


iii. Mallado CASO 2: ANCLAJE QUIMICO CON ARMADURA

En este caso el mallado tiene las siguientes características:

1. Tipo de elemento TETRAEDRO
2. Lado: 0.20 m en zona solera, 0.005 en entorno de perno y 0.008 en barras de acero de armar, con factor de graduación 0.5 y error cordal 0.005
3. CUADRATICO: opción QUADRATIC de GiD
4. Número de elementos: 102492
5. Número de nodos: 143596

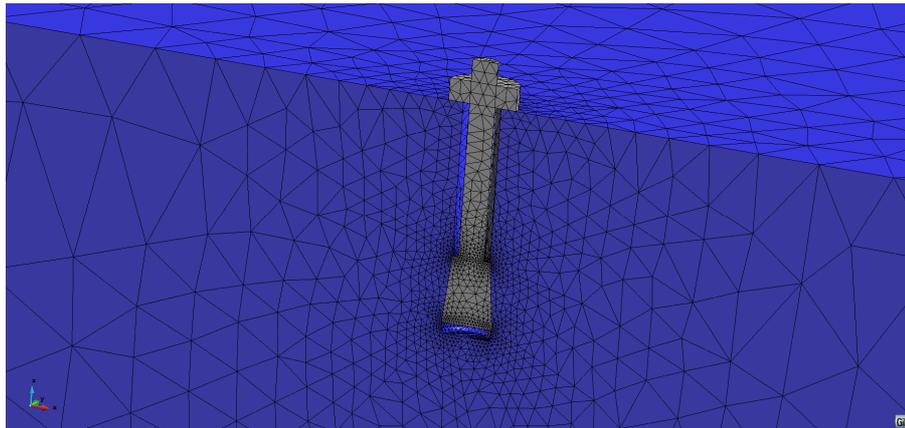
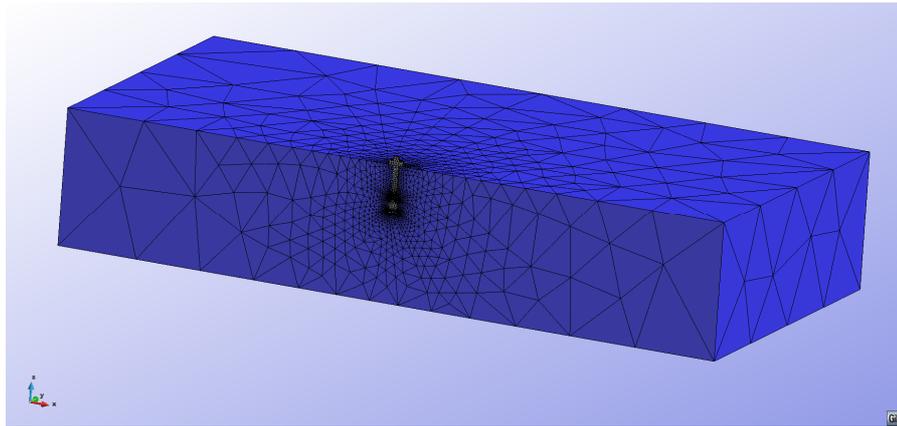
0.2 m en solera, 0.005 en entorno perno y 0.008 en barras de armar



iv. Mallado CASO 3: ANCLAJE MECANICO EXPANSIVO SIN ARMADURA

En este caso el mallado tiene las siguientes características:

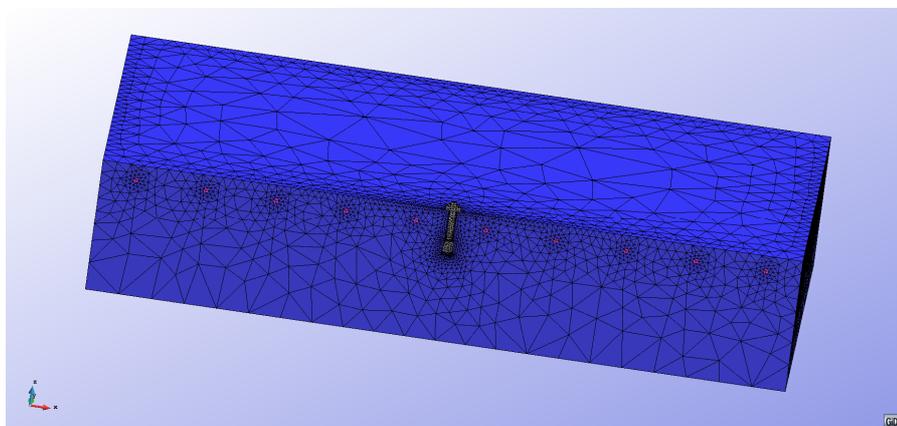
1. Tipo de elemento TETRAEDRO
2. Lado: 0.20 m en zona solera y 0.005 en entorno de perno, con factor de graduación 0.4 y error cordal 0.002
3. CUADRATICO: opción QUADRATIC de GiD
4. Número de elementos: 24722
5. Número de nodos: 37703

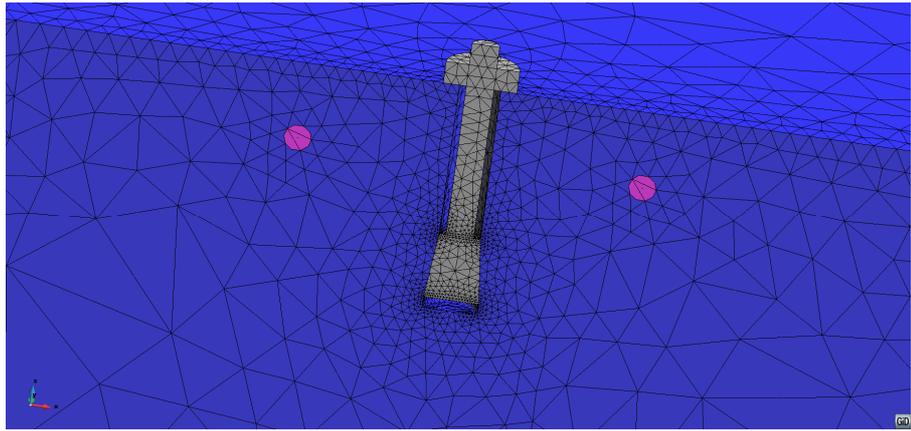


v. Mallado CASO 4: ANCLAJE MECANICO EXPANSIVO CON ARMADURA

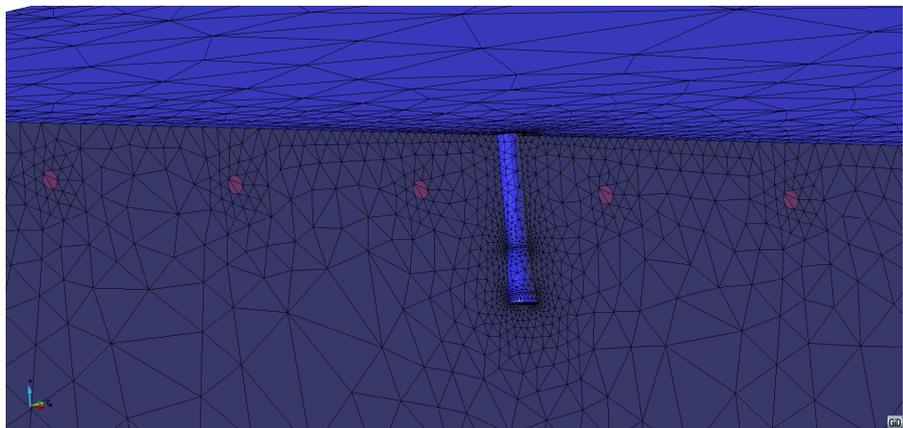
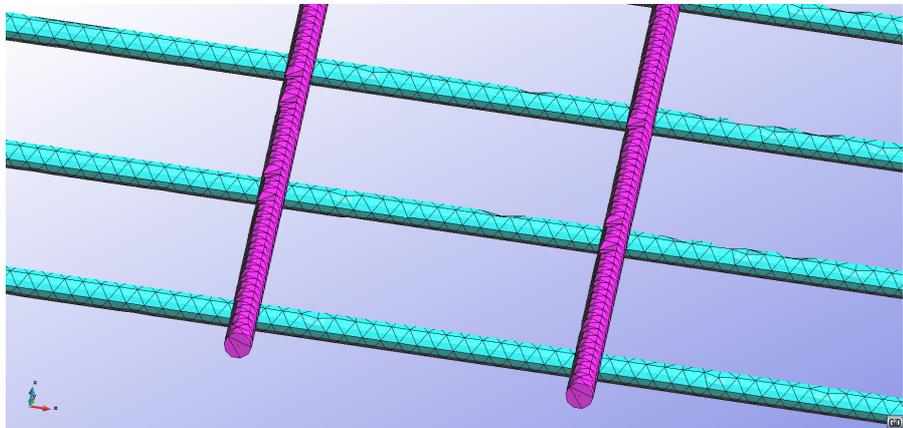
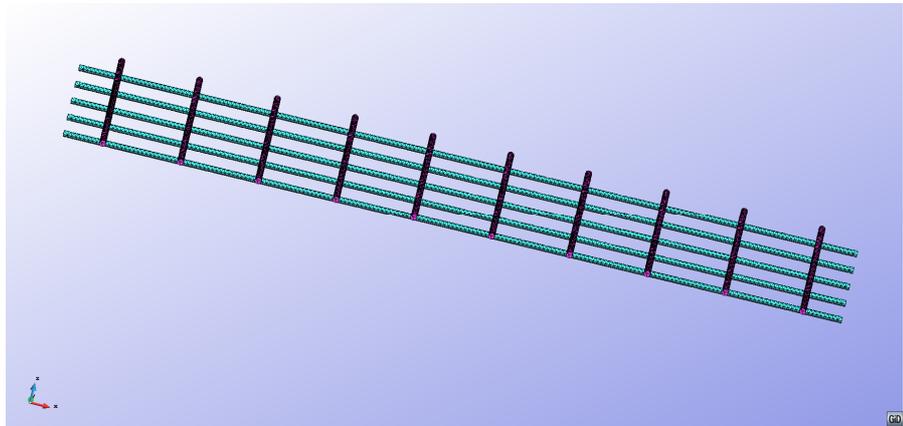
En este caso el mallado tiene las siguientes características:

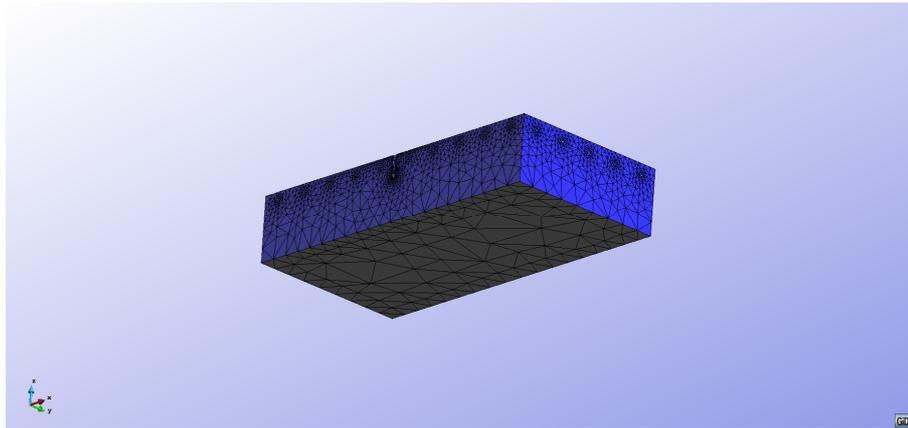
1. Tipo de elemento TETRAEDRO
2. Lado: 0.20 m en zona solera, 0.005 en entorno de perno y 0.008 en barras de acero de armar, con factor de graduación 0.5 y error cordal 0.005
3. CUADRATICO: opción QUADRATIC de GiD
4. Número de elementos: 102877
5. Número de nodos: 146027





Las armaduras:





vi. Tabla Resumen

En todos los casos la malla es NO ESTRUCTURADA y el elemento es TETRAEDRO CUADRATICO

CASO	LADO ELTO	Nº ELTOS	Nº NODOS
1	0.2 m en solera y 0.005 en entorno perno	8396	12833
2	0.2 m en solera, 0.005 en entorno perno y 0.008 en barras de armar	102492	143596
3	0.2 m en solera y 0.005 en entorno perno	24722	37703
4	0.2 m en solera, 0.005 en entorno perno y 0.008 en barras de armar	102877	146027

vii. Otras opciones posibles no analizadas

Otras opciones que no se han analizado, son las correspondientes a la adopción de elementos más simples o más complejos (opciones NORMAL o QUADRATIC9 respectivamente), con las cuales, en el caso NORMAL, quizás se llegaría a menos tiempo de mallado y cálculo, y con QUADRATIC 9, quizás con menos elementos, tal vez mejoraría la solución.

Por otra parte, GiD dispone de una utilidad para conocer la calidad de la malla con arreglo a varios criterios. Hemos revisado los resultados de dicha utilidad, si bien, por falta de tiempo, no incluimos aquí comentarios al respecto.

8. ANALISIS

Se ha llevado a cabo el análisis haciendo uso del programa RAM Series para los cuatro casos. Las opciones elegidas, son en síntesis:

- i. Cálculo estático en 3D
- ii. Cálculo elástico lineal, en materiales y en geometría
- iii. Elementos utilizados de tipo SOLID

- iv. SOLVER utilizado: HYBRID-SPARSE (opción por defecto). Es un Solver DIRECTO con almacenamiento SPARSE
- v. El proceso es el habitual; esencialmente: se construye la matriz de rigidez, el vector de cargas, se aplican las restricciones de movimientos, se resuelven las ecuaciones, se calculan esfuerzos y reacciones, y se suavizan resultados
- vi. El caso estudiado ha sido la combinación en ELS de las cargas siguientes:
 1. Peso propio de los elementos
 2. Precarga del perno con los valores elegidos más arriba
 3. Carga de tracción sobre el perno con los valores elegidos más arriba

9. POSTPROCESO

a. Introducción

Al objeto de poder analizar en el apartado siguiente los resultados del cálculo, se ha observado cuales han sido los resultados de dos variables, en los cuatro casos estudiados:

- DESPLAZAMIENTO EN LA DIRECCION Z de puntos próximos al entorno del perno central; se estima que este es el movimiento más importante que se puede producir, pues la dirección Z es la dirección de aplicación de las cargas.
- TENSION S_z en puntos del mismo entorno, por análogas razones.

Se ha elegido esa zona, pues es la zona que a priori va a estar más solicitada y deformada. Se han elegido como variables un desplazamiento y un esfuerzo, al ser dimensionalmente diferentes y de distinta naturaleza.

Además, en los casos con armadura se ha observado una tensión principal en las barras:

- TENSION PRINCIPAL S_i en varios puntos de las armaduras cerca del perno, de cara a apreciar si entran en tensión y en qué medida.

A continuación, se va a exponer para cada caso analizado, un conjunto de salidas gráficas de los cálculos realizados obtenidas en el Postproceso:

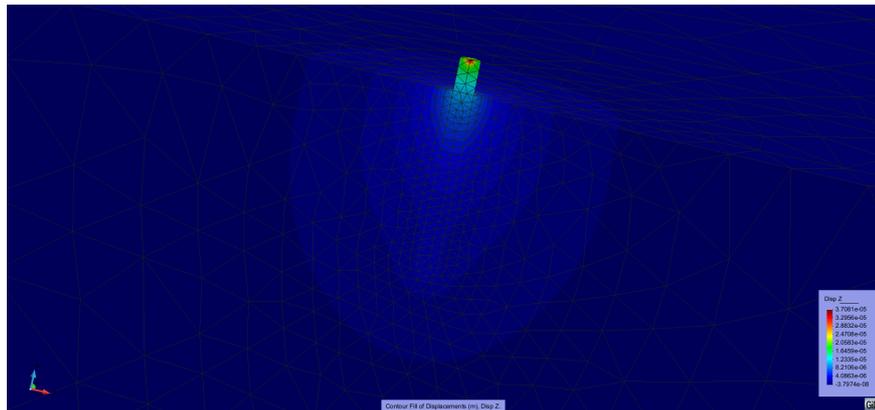
- Perspectivas en que se aprecian contornos de las variables
- Curvas que recogen los valores de las variables DESPLAZAMIENTO en Z y de la TENSION S_z según la línea vertical que sigue el eje del perno desde el punto más alto de éste hasta el fondo de la solera

En estas salidas, en varios casos, se ha hecho uso de la opción de GiD de representar la estructura sin deformar con la malla superpuesta.

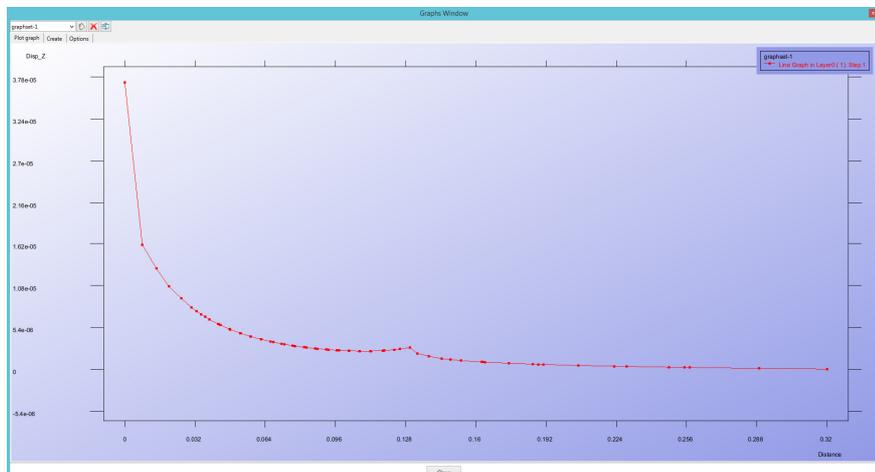
En otros casos, el Postproceso de GiD posibilita hacer gráficos (GRAPH) de tipo línea (LINE GRAPHS). En los puntos siguientes se incluyen estas curvas para las dos variables elegidas, citadas más arriba.

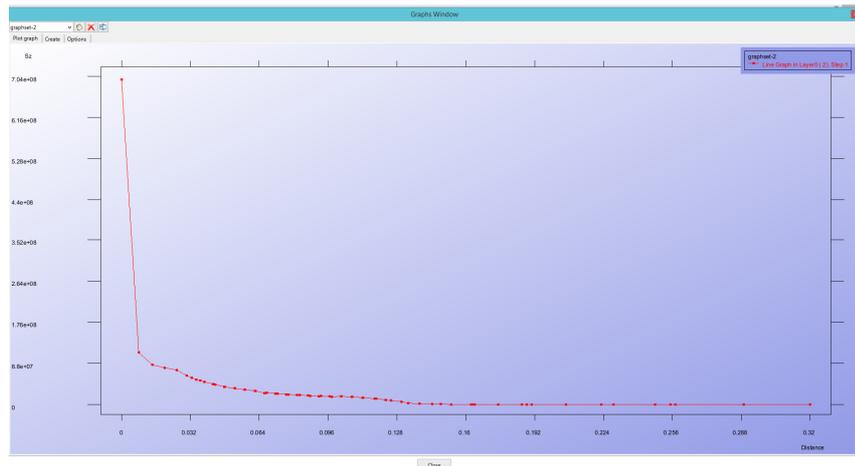
b. CASO 1: ANCLAJE QUIMICO SIN ACERO DE ARMAR

- i. Desplazamiento en Z (Imagen CONTOUR): se representa la salida gráfica mediante un zoom en la zona del perno, así como valores de dicho desplazamiento en puntos de la malla.

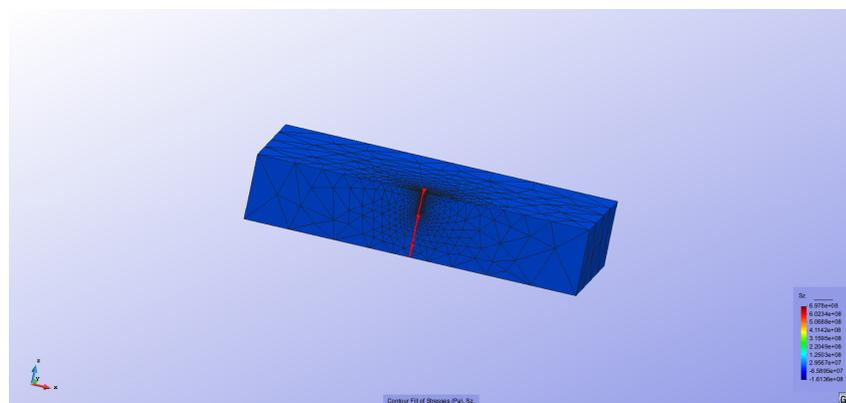


- ii. Desplazamiento en Z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH): se recogen los desplazamientos a lo largo de la vertical del perno (en la siguiente perspectiva en rojo)



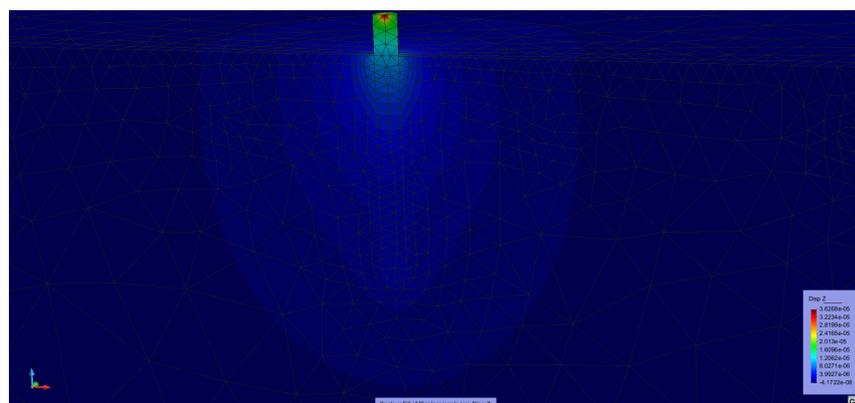


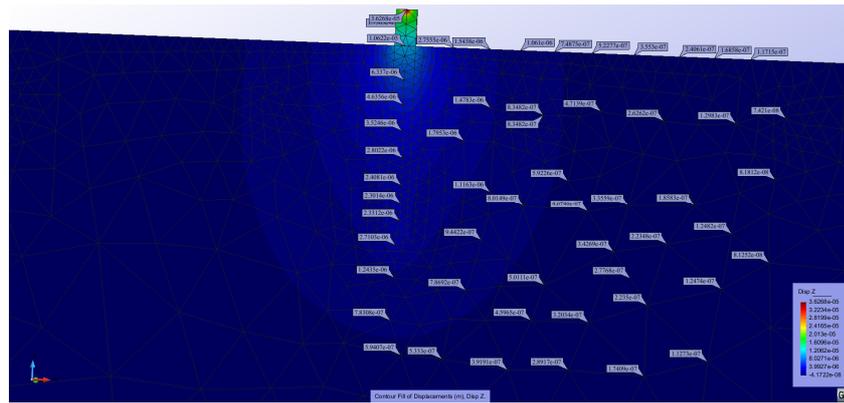
es decir, aquí:



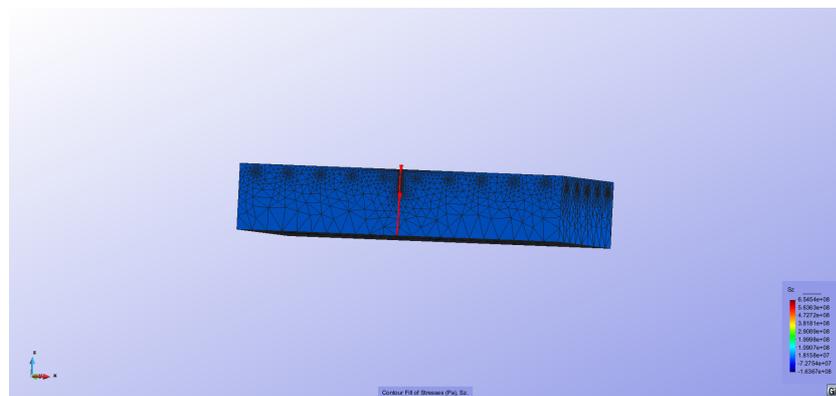
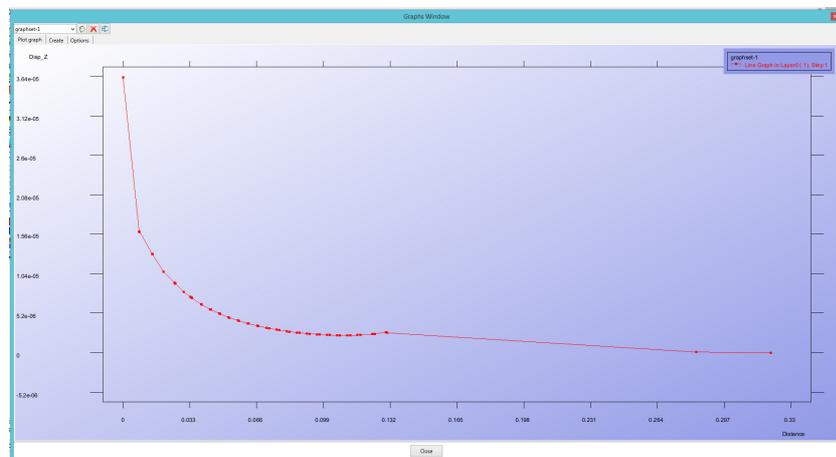
c. CASO 2: ANCLAJE QUIMICO CON ACERO DE ARMAR

- i. Desplazamiento en Z (Imagen CONTOUR): se representa la salida gráfica mediante un zoom en la zona del perno, así como valores de dicho desplazamiento en puntos de la malla.

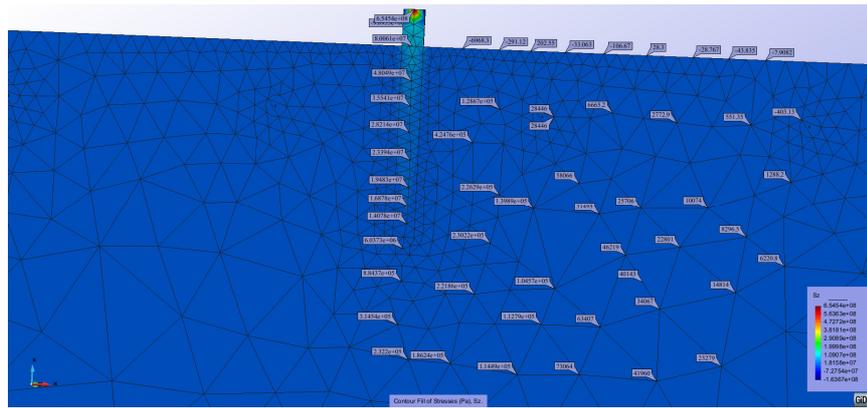
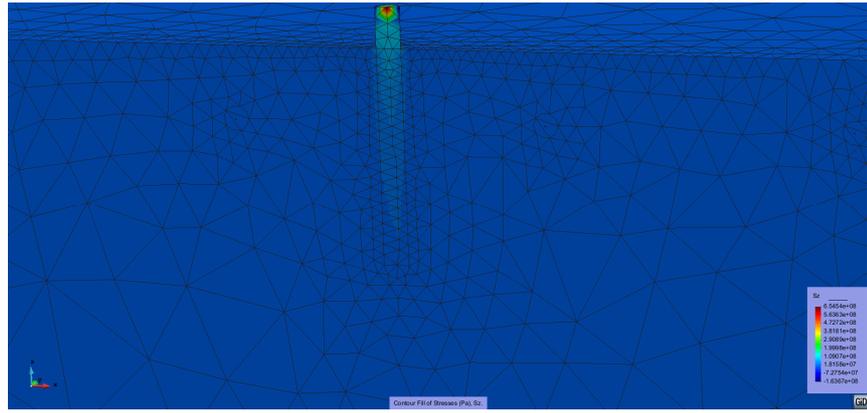




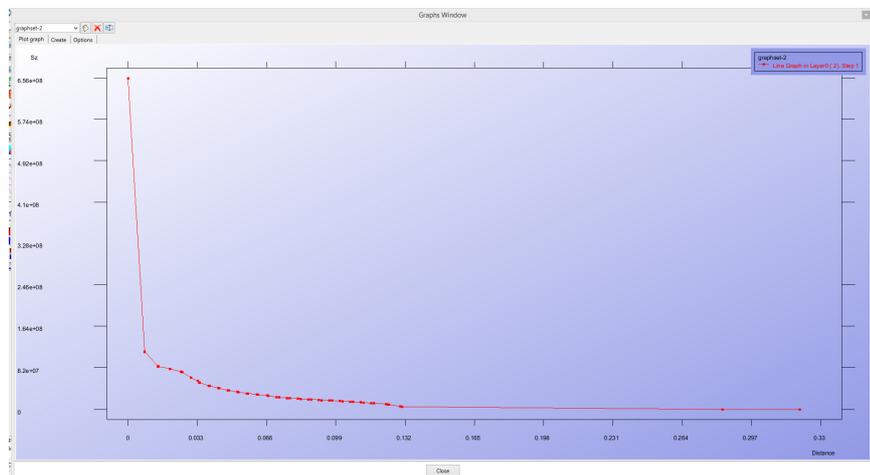
ii. Desplazamiento en Z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH): se recogen los desplazamientos a lo largo de la vertical del perno (en la siguiente perspectiva en rojo)

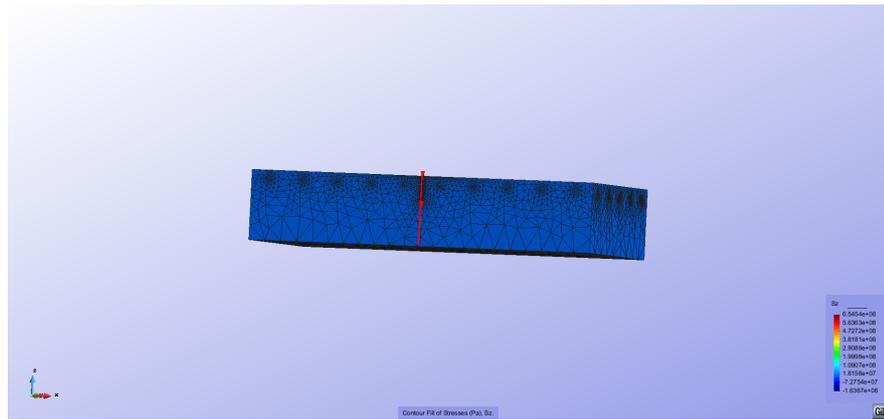


iii. Tensiones verticales S_z (Imagen CONTOUR): se presenta un zoom de la zona, y el mismo con etiquetas de sus valores en puntos de la malla.

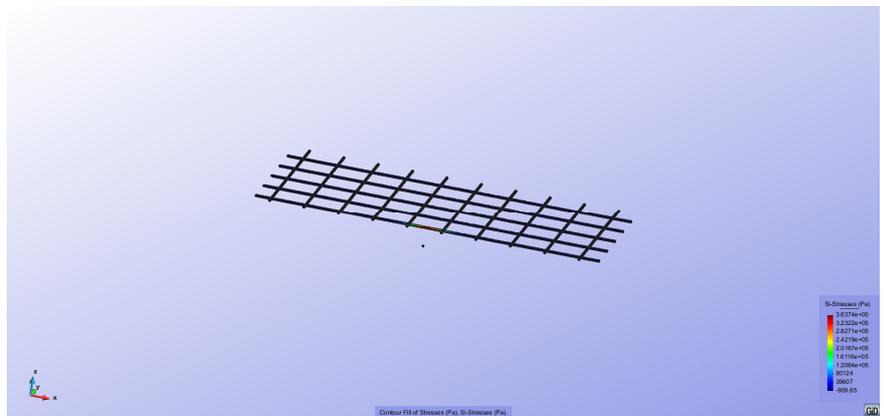


iv. Tensiones verticales S_z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH): se recogen las tensiones a lo largo de la vertical del perno (en la siguiente perspectiva en rojo)

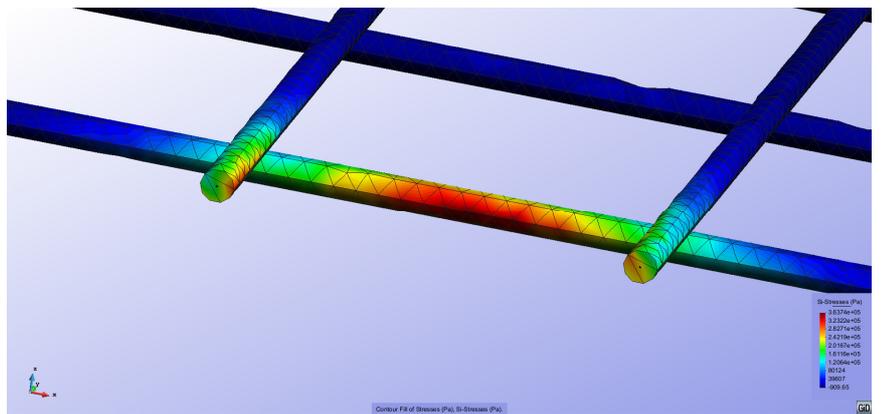


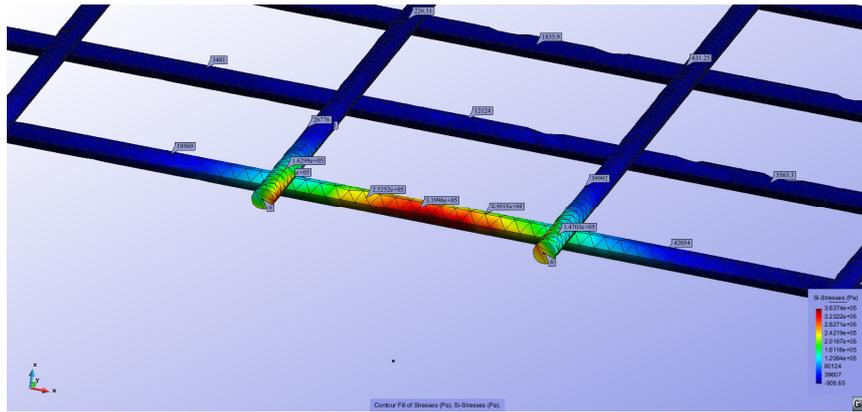


v. Tensiones principales S_i (Imagen CONTOUR) en la armadura: se presenta una imagen completa, así como un zoom de la zona, y el mismo con etiquetas de sus valores en puntos de la malla.



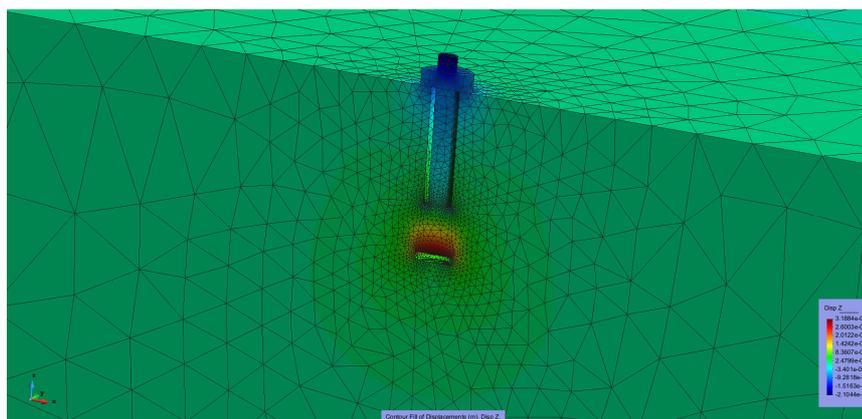
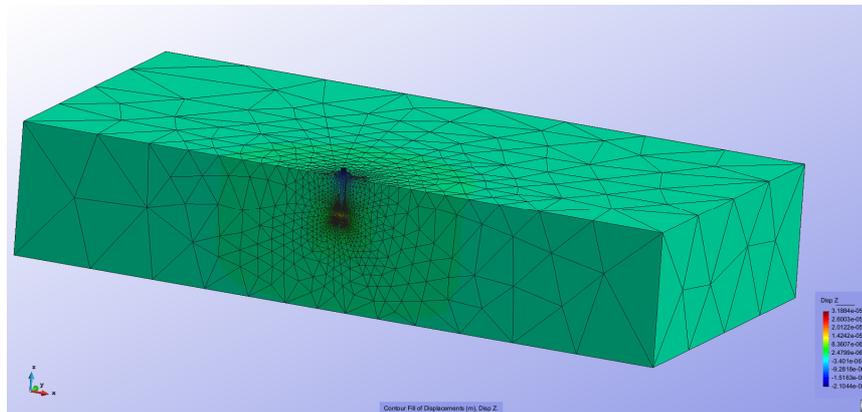
En el entorno del perno

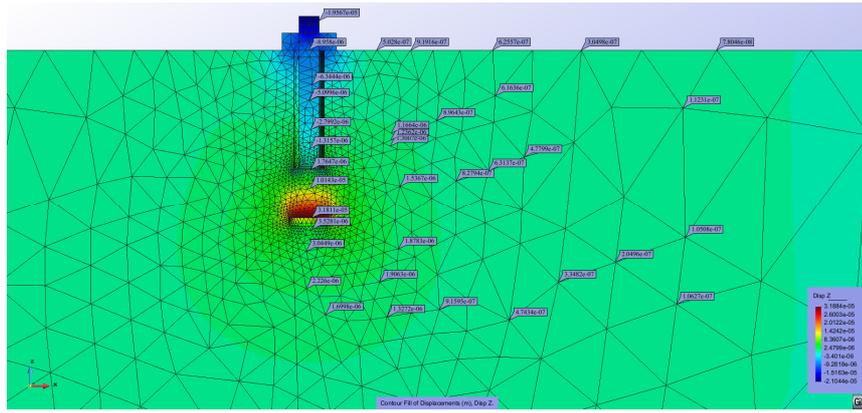




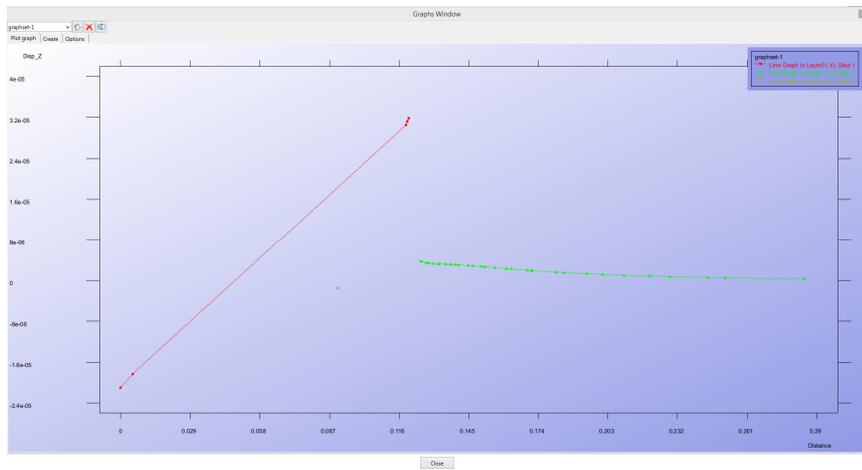
d. CASO 3: ANCLAJE MECANICO EXPANSIVO SIN ACERO DE ARMAR

- i. Desplazamiento en Z (Imagen CONTOUR): se representa la salida gráfica mediante una imagen global y zoom en la zona del perno, así como valores de dicho desplazamiento en puntos de la malla.

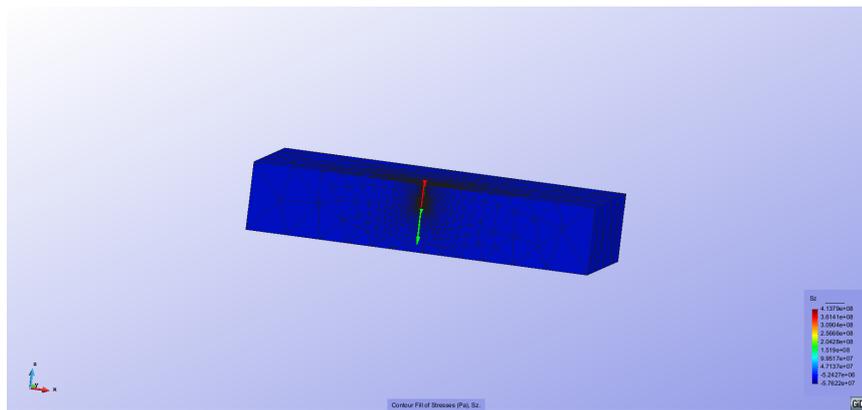




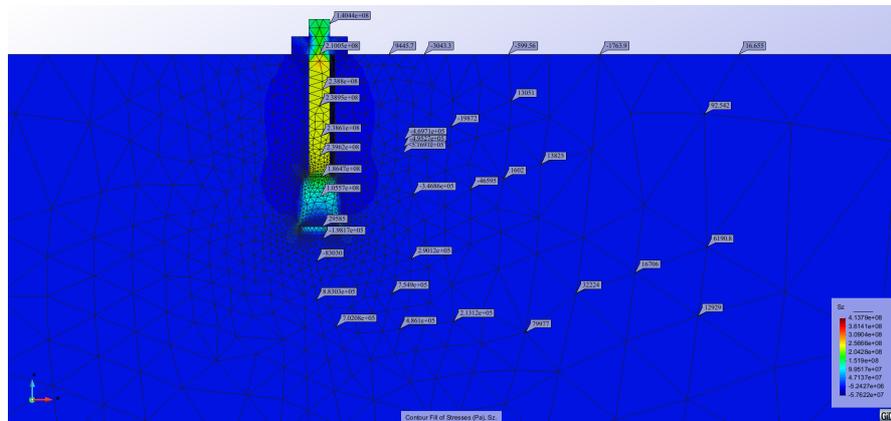
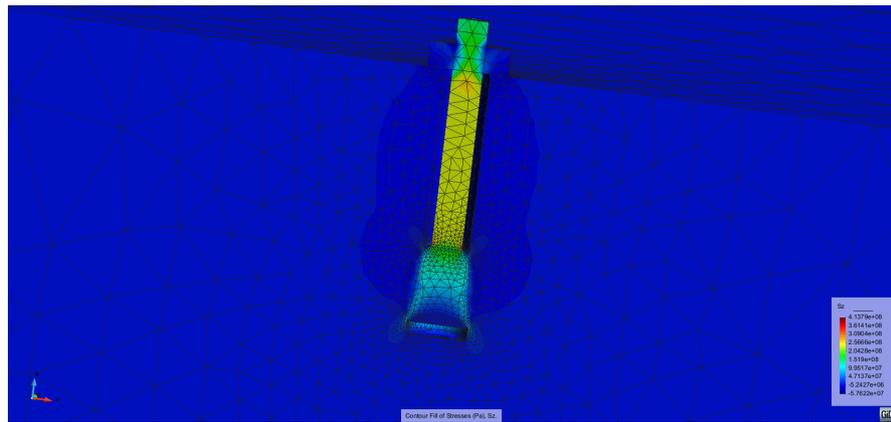
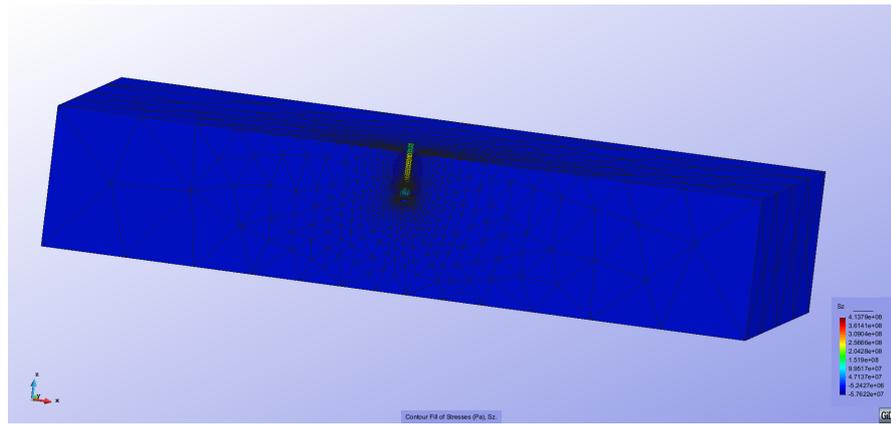
ii. Desplazamiento en Z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH): se recogen los desplazamientos a lo largo de la vertical del perno (en la siguiente perspectiva en rojo y verde)



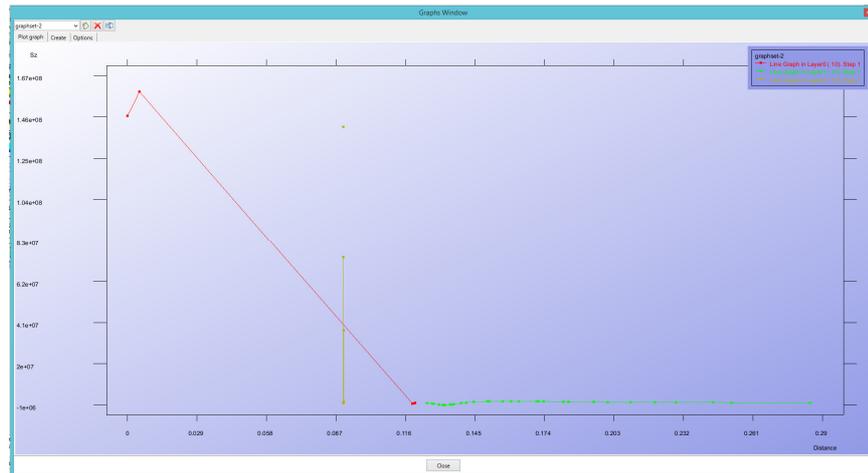
es decir, en esta línea:



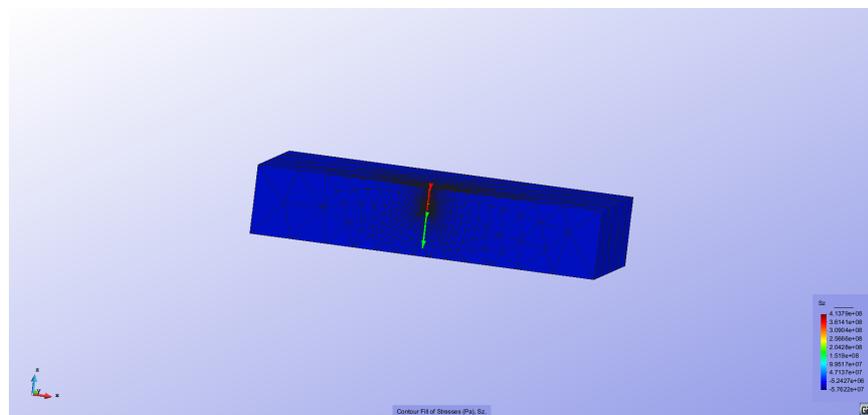
iii. Tensiones verticales S_z (Imagen CONTOUR): se presenta una imagen completa (frame), un zoom de la zona, y una imagen de la zona con etiquetas de sus valores en puntos de la malla.



- iv. Tensiones verticales S_z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH): se recogen las tensiones a lo largo de la vertical del perno (en la siguiente perspectiva en rojo y verde)

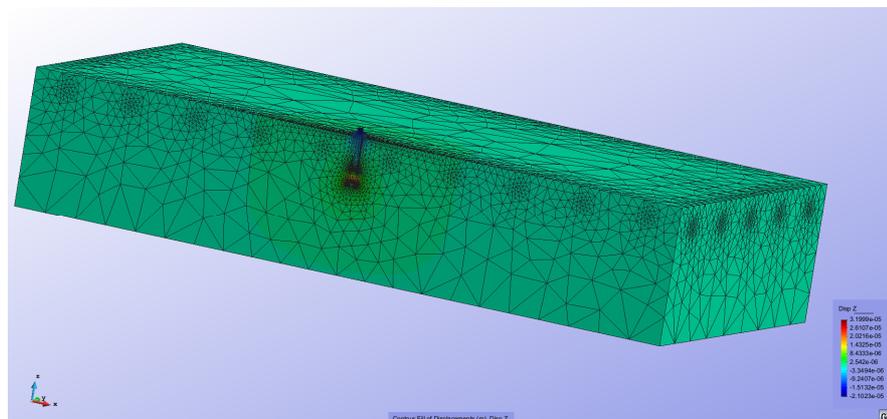


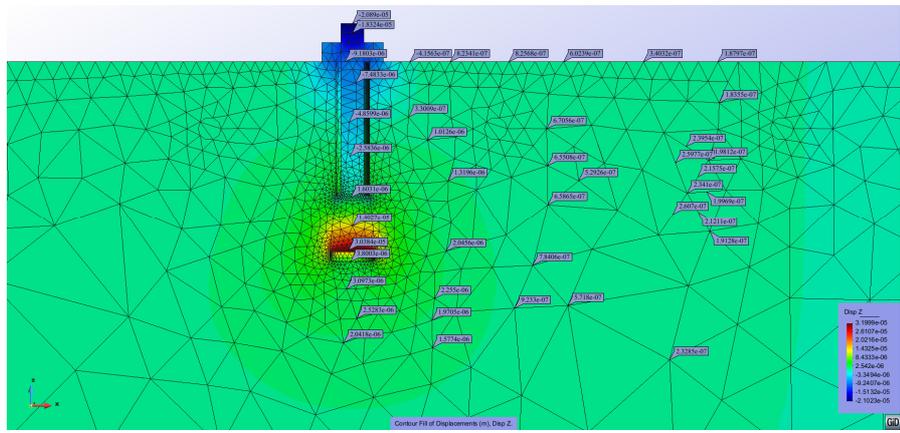
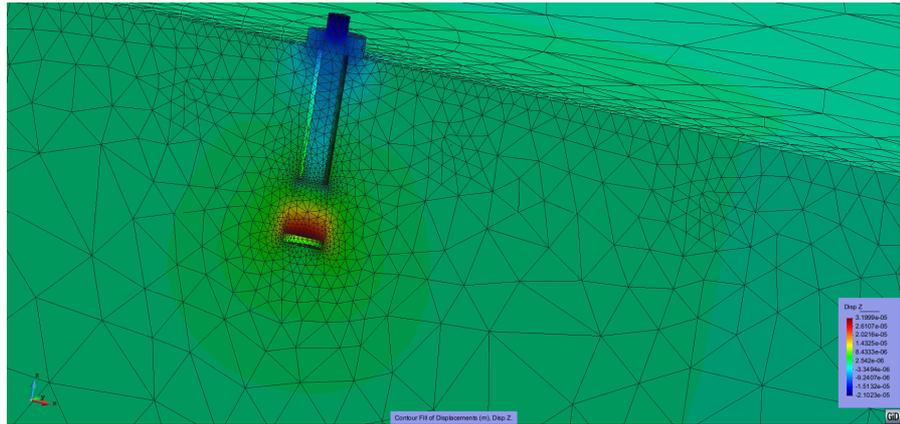
es decir, aquí:



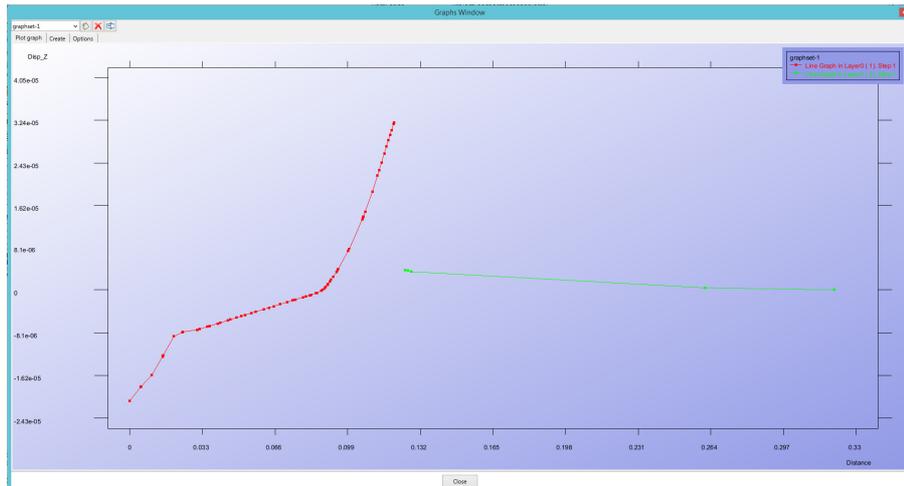
e. CASO 4: ANCLAJE MECANICO EXPANSIVO CON ACERO DE ARMAR

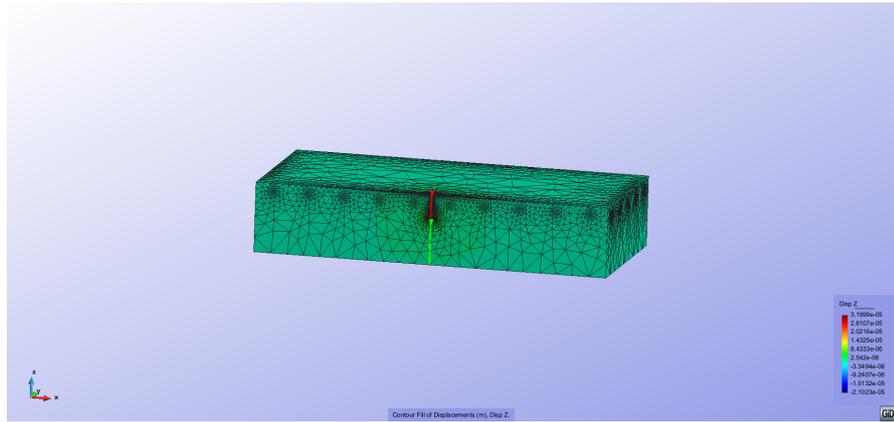
- i. Desplazamiento en Z (Imagen CONTOUR): se representa la salida gráfica mediante una imagen global y zoom en la zona del perno, así como valores de dicho desplazamiento en puntos de la malla.



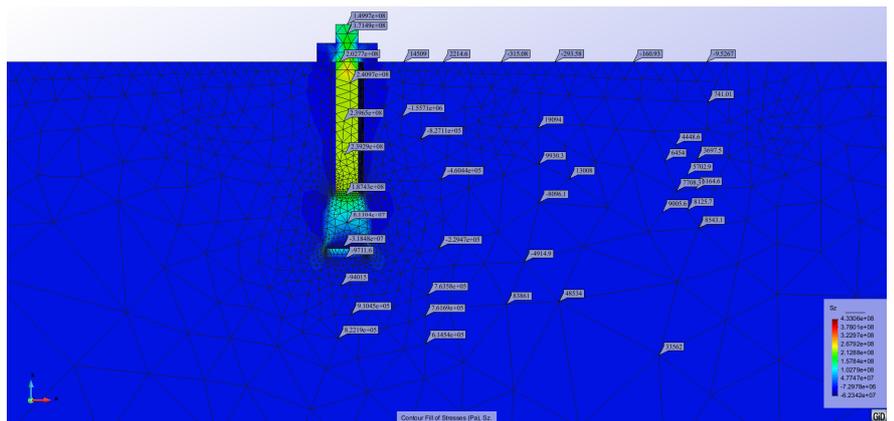
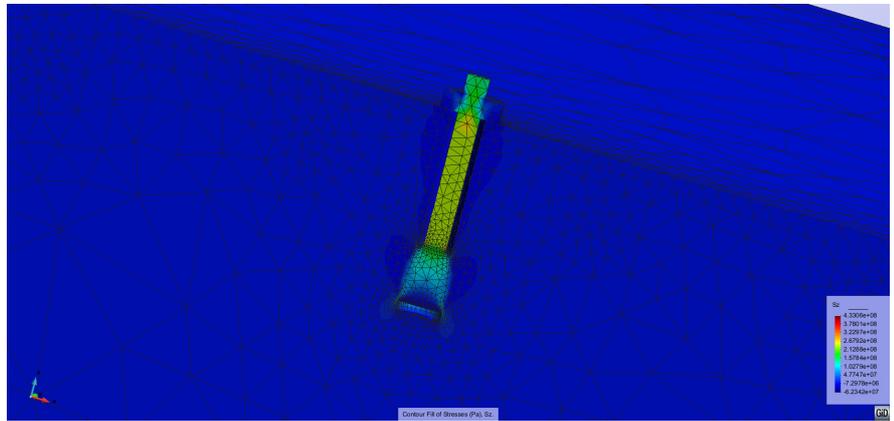


ii. Desplazamiento en Z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH): se recogen los desplazamientos a lo largo de la vertical del perno (en la siguiente perspectiva en rojo y verde)

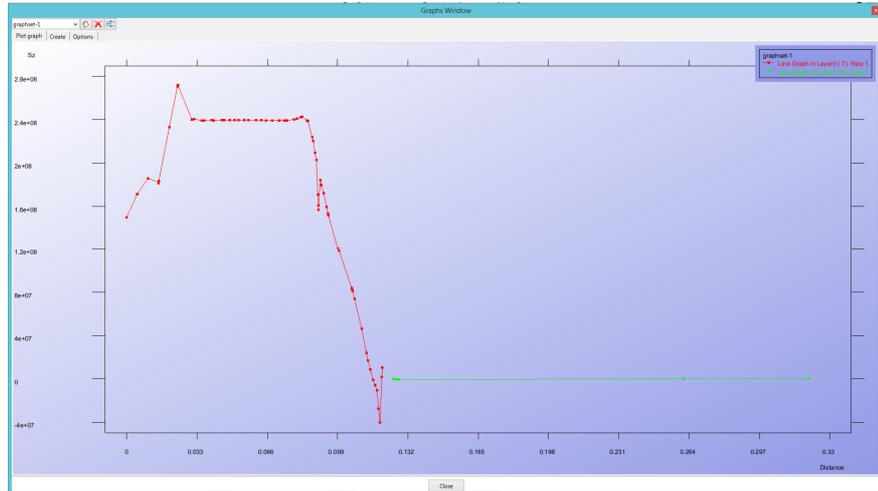




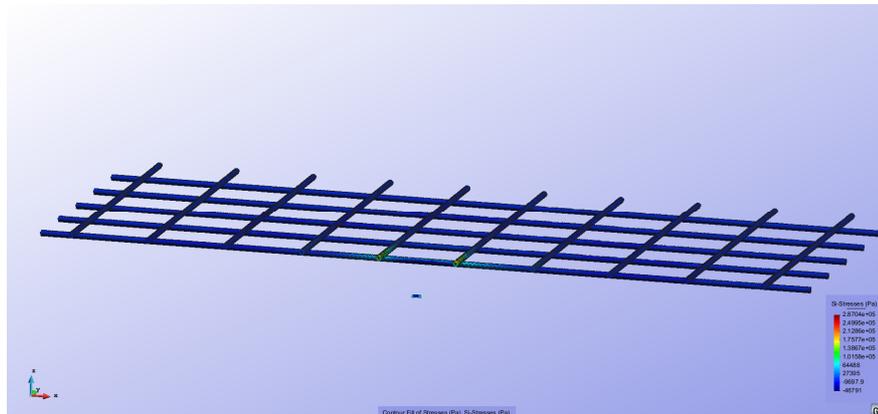
iii. Tensiones verticales S_z (Imagen CONTOUR): se presenta un zoom de la zona, y otra imagen de la zona con etiquetas de sus valores en puntos de la malla.



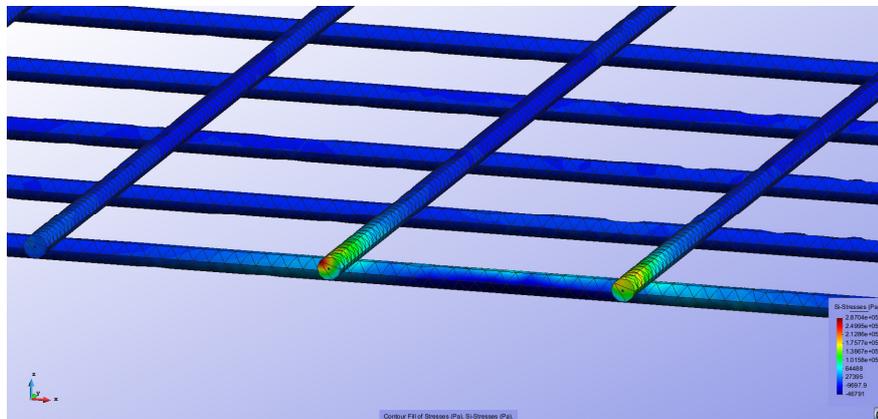
- iv. Tensiones verticales S_z (Imagen GRAPH: LINE GRAPH): se recogen las tensiones a lo largo de la vertical del perno (misma línea de la solera que en la gráfica de desplazamiento en Z)



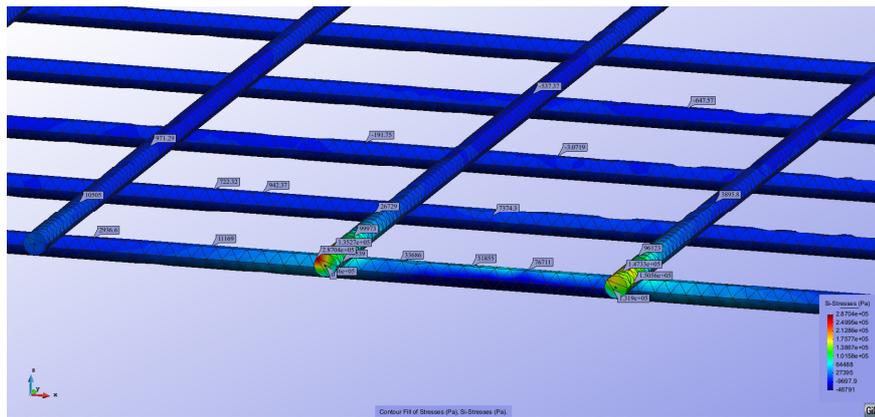
- v. Tensiones principales S_i (Imagen CONTOUR) en la armadura: se presenta una imagen completa, así como un zoom de la zona, y el mismo con etiquetas de sus valores en puntos de la malla.



En el entorno del perno



Y con etiquetas con los valores de la variable



10. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez realizado el cálculo de los 4 casos, se van a comparar dos a dos entre sí, es decir, por una parte los resultados del anclaje químico entre sí (sin y con armadura) y los del caso de anclaje mecánico de expansión entre sí (sin y con armadura).

En el caso de la comparación de los valores de CONTOUR, la comparación aquí presentada es bastante GROSERA, pues se hace por simple inspección visual de las salidas gráficas, y estimando de la misma manera la localización de puntos homólogos. Una comparación más rigurosa se debería hacer comparando puntos concretos definidos por sus coordenadas.

a. Anclajes químicos

Desplazamientos en Z

Fijándonos en las imágenes CONTOUR, se puede observar de las leyendas, que los valores máximos de los desplazamientos en Z son ligeramente mayores en el caso sin armado que en el caso armado, en efecto:

- Caso sin armar: $-3.7974 \times 10^{-8} < u_z < 3.7081 \times 10^{-5}$
- Caso armado: $-4.1722 \times 10^{-8} < u_z < 3.6268 \times 10^{-5}$

Pasa justo lo contrario con los valores en sentido contrario –movimiento hacia abajo–, pero comparados con los anteriores son muy pequeños (tres órdenes de magnitud inferiores).

Es difícil comparar los resultados de las etiquetas de las imágenes CONTOUR. Hay dos puntos del perno donde sí es claro que el caso sin armar tiene más desplazamientos (es menos rígido) que el armado:

PUNTO	CASO SIN ARMAR (m)	CASO ARMADO (m)
Punto de aplicación de la carga externa	3.7081×10^{-5}	3.6268×10^{-5}
Punto del eje del perno a nivel de la superficie de solera	1.0702×10^{-5}	1.0622×10^{-5}

Si observamos las curvas LINE GRAPH, tampoco hay mucha diferencia, pero sí parece que la curva correspondiente al caso armado quedará algo debajo de la del caso sin armar. Donde es clara esta diferencia es en los valores máximos (al inicio de las curvas).

Es decir, sí que parece que la estructura es algo más rígida en el caso armado que sin armar -como era de esperar pues tiene un refuerzo de acero- con lo cual, los desplazamientos también son menores en el caso armado, si bien la diferencia es pequeña.

Tensiones en Z

Aquí también fijándonos inicialmente en las imágenes CONTOUR, se puede observar de las leyendas, que los valores máximos de las tensiones en Z son ligeramente mayores en el caso sin armado que en el caso armado, en efecto:

- Caso sin armar: $-1.6136 \times 10^{+8} < S_z < 6.978 \times 10^{+8}$
- Caso armado: $-1.6367 \times 10^{+8} < S_z < 6.5454 \times 10^{+8}$

Pasa aquí también justo lo contrario con los valores en sentido contrario –tensión de compresión -, pero aquí el orden de magnitud es el mismo.

En este caso vamos a intentar comparar puntos sensiblemente “homólogos” en el perno entre los dos casos:

PUNTO	CASO SIN ARMAR (Pa)	CASO ARMADO (Pa)
Punto de aplicación de la carga externa	$6.978 \times 10^{+8}$	$6.5454 \times 10^{+8}$
Punto del eje del perno a nivel de la superficie de solera	$7.8732 \times 10^{+7}$	$8.0061 \times 10^{+7}$
Punto situado debajo del anterior en la imagen CONTOUR	$4.3728 \times 10^{+7}$	$4.8049 \times 10^{+7}$
Punto en el extremo inferior del perno	$6.4157 \times 10^{+6}$	$6.0373 \times 10^{+6}$

En este caso los valores externos dan mayores tensiones en el caso sin armar, pero los puntos situados en medio, dan valores mayores en el caso armado, lo cual tiene lógica, teniendo en cuenta que ahora es más rígido el material de la solera, pues va armada.

Si se observa la arista superior de la solera, se aprecia que las tensiones, en general, son menores en el caso armado que en el no armado; esto casa con el párrafo anterior: la carga externa se transmite preferentemente al perno en el caso armado, al ser la estructura ahora más rígida.

En las las curvas LINE GRAPH, tampoco hay mucha diferencia en el cuerpo de la curva. Lo que sí es cierto es que el valor más alto en el caso sin armar es superior al del caso armado (correspondiente a la abscisa inicial).

Tensiones principales S_i en la armadura

Se puede observar que el efecto de la presencia del anclaje se circunscribe a las armaduras más próximas al perno, desapareciendo el efecto muy rápidamente. Los valores de la tensión en el acero son muy pequeños: el valor más alto es de 3.2×10^5 Pa, cuando el límite elástico ronda en los aceros de armadura valores de entre 400 y 500 MPa.

b. Anclajes mecánicos expansivos

Desplazamientos en Z

Si, como en el caso del anclaje químico, nos fijamos en las leyendas de las imágenes CONTOUR, se puede observar de éstas, que los valores máximos de los desplazamientos en Z son muy ligeramente mayores en el caso con armado que en el caso sin armado, en efecto:

- Caso sin armar: $-2.1044 \times 10^{-5} < u_z < 3.1884 \times 10^{-5}$
- Caso armado: $-2.1023 \times 10^{-5} < u_z < 3.1999 \times 10^{-5}$

Pasa lo contrario con los valores en sentido contrario –movimiento hacia abajo-, pero su diferencia es muy pequeña. Tanto en un caso como en otro no hay apenas diferencia.

En el caso del anclaje mecánico es más fácil encontrar puntos homólogos en las imágenes CONTOUR que en el químico, pues hay puntos que coinciden con aristas del perno. Hay tres puntos del perno donde sí es claro que el caso sin armar tiene más desplazamientos (es menos rígido) que el armado. El segundo valor de la tabla indica lo contrario, pero puede ser una imprecisión de la lectura:

PUNTO	CASO SIN ARMAR (m)	CASO ARMADO (m)
Punto de aplicación de la carga externa	-1.9567×10^{-5}	-1.832×10^{-5}
Punto del eje del perno a nivel de la superficie de solera	-8.958×10^{-6}	-9.1803×10^{-6}
Punto del eje del perno a nivel del comienzo del ensanche	1.7647×10^{-6}	1.603×10^{-6}
Punto del eje del perno a nivel de la base del ensanche	3.181×10^{-5}	3.0384×10^{-5}

En las curvas LINE GRAPH, en los valores extremos del perno (línea en rojo), los valores extremos son muy parecidos, no mostrando diferencias apreciables. La gráfica del caso sin armar no ha recogido valores intermedios, con lo que resulta complejo comparar más a fondo. Pero la gráfica del caso armado presenta dos quiebros interesantes: el inferior coincide con la zona inferior del perno, y el superior está a 1.5-2 cm del extremo superior, que es próximo a la rasante superior de la solera. Es decir, en materia de desplazamientos no parece haber muchas diferencias.

Es decir, sí que parece aquí también que la estructura es algo más rígida en el caso armado que sin armar -como era de esperar pues tiene un refuerzo de acero- con lo cual, los desplazamientos también son menores en el caso armado, si bien la diferencia es pequeña, como en el caso anterior.

Tensiones en Z

Aquí, observando las leyendas en las imágenes CONTOUR, se ve que los valores máximos de las tensiones en Z son ligeramente mayores en el caso armado que en el caso sin armar, en ambos límites, en efecto:

- Caso sin armar: $-5.7622 \times 10^{+7} < S_z < 4.1379 \times 10^{+8}$
- Caso armado: $-6.2342 \times 10^{+7} < S_z < 4.3306 \times 10^{+8}$

A pesar de que las diferencias son pequeñas, estos resultados son bastante lógicos, al haberse rigidizado la estructura. Las tensiones son mayores en el caso armado.

Comparando puntos sensiblemente homólogos en el perno entre los dos casos:

PUNTO	CASO SIN ARMAR (Pa)	CASO ARMADO (Pa)
Punto próximo al de aplicación de la carga externa	1.4044×10^8	1.7149×10^8
Punto del eje del perno a nivel de la superficie de solera	2.1005×10^8	2.0277×10^8
Punto del eje del perno a nivel del comienzo del ensanche	1.8647×10^8	1.8743×10^8
Punto del eje del perno a nivel de la base del ensanche	29585	-3.1848×10^7

Aquí, salvo en el segundo punto, las tensiones son mayores en el caso armado, lo cual es lógico, considerando la mayor rigidez de la solera, al ir armada.

También aquí, al igual que en el caso del anclaje químico, si se observa la arista superior de la solera, se aprecia que las tensiones, en general, son menores en el caso armado que en el no armado; esto casa con el párrafo anterior: la carga externa se transmite preferentemente al perno en el caso armado, al ser la estructura ahora más rígida.

En las las curvas LINE GRAPH de la tensión S_z , ocurre lo mismo que en el caso de los desplazamientos: la curva del caso armado detalla más. Lo único a reseñar sería que en el caso armado, los valores extremos son mayores que en el sin armar, lo que muestra que la estructura armada es más rígida.

Tensiones principales S_j en la armadura

Volvemos a observar lo mismo que en el caso del anclaje químico armado: la presencia del anclaje se circunscribe a las armaduras más próximas al perno, desapareciendo el efecto muy rápidamente. Los valores de la tensión en el acero

son aquí también muy pequeños: el valor más alto es de $2.87 \cdot 10^5$ Pa, cuando el límite elástico ronda en los aceros de armar valores de entre 400 y 500 MPa.

11. COMENTARIOS FINALES

Como conclusión, expondríamos las siguientes ideas:

- a. Efectivamente, en ambos tipos de anclajes, se puede comprobar que la estructura armada resulta más rígida que la sin armar
- b. No obstante, la diferencia en desplazamientos y tensiones verticales es muy pequeña de la solución armada a la sin armar en ambos tipos de anclajes
- c. Las tensiones alcanzadas por el acero de armar son muy reducidas, es decir, no trabaja de forma eficiente
- d. En los casos analizados el nivel de tensiones alcanzado en los materiales de acero son bajos, y en el hormigón tampoco son muy altos –como se puede observar por inspección de los diagramas CONTOUR de tensiones-, estando prácticamente siempre por debajo de 1 Mpa en el hormigón, salvo en la zona inmediatamente contigua al perno.
- e. El anclaje químico solicita menos al perno y al hormigón que el metálico expansivo que hemos analizado –las cargas que hemos usado eran menores-. Los diagramas CONTOUR intuitivamente lo reflejan, por la extensión de las zonas coloreadas. En el anclaje mecánico, por otra parte, al ser tan grande la precompresión, el hormigón no está muy solicitado. Quizás esta precompresión haga menos eficaz el armado, pues con la precompresión ya se resuelven problemas de posibles fisuraciones. Es decir, no parece muy claro que el armado mejore la capacidad de carga: quizás baste –para solicitaciones moderadas- con la precompresión. No, obstante esto habría que analizarlo en mayor profundidad.

En conjunto, se observa que en ambos anclajes, en el ejemplo analizado, la influencia del armado es baja tanto en desplazamientos como en tensiones, si bien, se aprecia la mayor rigidez de la estructura armada, pues los movimientos del caso armado son ligeramente menores que en el caso sin armar, y, sin embargo, las tensiones son mayores que en el caso sin armar, lo cual delata la presencia de elementos rigidizadores en el interior (la armadura).

Una posible profundización del presente trabajo podría ahondar en un análisis más pormenorizado de las zonas contiguas al perno, y analizar si ahí se aprecia más el efecto del armado, pues fuera de esa zona no lo parecería. Podría ser de interés hacer un análisis en el que se apreciase la influencia de variación de diversos otros parámetros (cuantía de armadura, nivel de precompresión, distancia de punto a estudiar respecto del perno, consideración de la fisuración, efecto del recubrimiento de la armadura, etc.)

12. BIBLIOGRAFIA

1. Manual WURTH de técnicas de anclajes. Tomo I. Principios básicos. Aplicaciones. Práctica. Adolf Würth GmbH &Co KG, 2007
2. ETAG 001 Guía de Aplicación Técnica Europea. Anclajes en general.
3. Guía Técnica de Fijaciones Edición 2010-2011 SPIT
4. ETAG 001 Guideline for European Technical Approval of METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE. Part two: TORQUE CONTROLLED EXPANSION ANCHORS. Edition 1997, 1st amended November 2006, 2nd amended April 2013
5. Manual WURTH de técnicas de anclajes. Tomo II. Datos Técnicos. Adolf Würth GmbH &Co KG, 2007
6. ETAG 001 Guideline for European Technical Approval of METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE. Part five: BONDED ANCHORS. Edition March 2002, 1st amended November 2006, 2nd amended February 2008, 3rd amended April 2013

13. ANEXOS

a. Ficha Anclaje para altas cargas W-HAZ de WURTH

12



LO MEJOR PARA LOS PROFESIONALES

03

Anclaje para altas cargas W-HAZ

W-HAZ-B

Con perno roscado, acero cincado galvanizado

W-HAZ-S

Con tornillo de cabeza hexagonal, acero cincado galvanizado

W-HAZ-SK

Con tornillo de cabeza avellanada y tornillo de cabeza cilíndrica, acero cincado galvanizado



Informe de ensayos y homologaciones

Aprobación Gen. de Obra	Ensayos	Certificación
Aprobación técnica europea Opción 1 Hormigón fisurado y no fisurado	Resistencia al fuego Bajo efecto directo de las llamas	Instalaciones de agua contra incendios

- EL W-HAZ-S puede utilizarse en locales interiores secos
- Apto para fijar construcciones metálicas, perfiles metálicos, consolas, placas de base, soportes, trazos de cables, tuberías, barandillas, máquinas, etc.

2. Ventajas

- Elevadas cargas, distancias cortas entre ejes y bordes
- Montaje pasante.
- Se puede someter a carga inmediatamente, sin períodos de espera.
- Amplia variedad de medidas para múltiples aplicaciones.
- Seguridad de montaje al aplicar el par requerido durante el proceso de anclaje

1. Aplicaciones

- Aplicable en el ámbito de cargas pesadas
- Se admite la utilización del taco, provisto de la homologación técnica europea, en hormigón de uso general reforzado o no reforzado de la clase de resistencia mínima C20/25 y máxima C50/60, según EN 206:2000-12
- Anclaje con homologación técnica europea en hormigón fisurado (zona traccionada) y no fisurado (zona comprimida)
- El taco se puede utilizar para anclajes sometidos a cargas mayoritariamente estáticas (p.e. peso propio, equipamientos, materiales de almacén) o cargas casi estáticas (p.e. fachadas, barandillas)
- Aplicable en hormigón < C20/25 y en piedra natural resistente a la compresión (sin homologación)

3. Propiedades

- Taco de expansión por par de apriete controlado, de acero galvanizado en los tamaños M6, M8, M10, M12 y M16
- Acero galvanizado: homologación técnica europea ATE-02/0031
- Dimensionado según la "Guía para la aprobación técnica europea (ETAG) referente a tacos metálicos para anclajes en hormigón", anexo C, método de concepto-cálculo A
- Resistencia al fuego: F30, F60, F90 y F120
- Esfuerzo calorífico según DIN 4102-02: 1977-09 (curva normalizada de temperatura-tiempo)

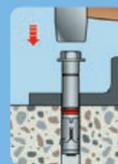
Instrucciones de colocación



Efectuar el taladro



Limpiar el agujero



Introducir el anclaje



Aplicar el par de apriete



21

Anclaje de unión W-VAD

Ampollas de resina de epoxi
para varillas roscadas

Anclaje de unión - Varilla roscada

Acero cincado, bicromatado amarillo

Acero Inoxidable A4

Anclaje de unión - Casquillo con rosca interior
(no es elemento primordial de la certificación para construcción)

Acero blanco cincado

Acero Inoxidable A4



Informe de ensayos y homologaciones

<p>Zona de compresión hormigón sin fisuras M6 - M20</p> 	<p>Zona de compresión Francia</p> 
--	--

1. Campo de aplicación

- Solución rentable para cargas elevadas en fijaciones próximas al borde y en fijaciones en soportes con poco espesor (pilares, balcones, etc.).
- Indicado en hormigón ñ H175.
- Adecuado en piedra natural resistente a la compresión (sin certificación).
- Adecuado para la fijación de construcciones metálicas, perfiles metálicos, pletinas, consolas, barandillas, rejillas, máquinas, construcciones de madera, balcones, pilares, etc. (véase ejemplos de aplicación).
- Versión A4 para el exterior, en ambientes húmedos, industriales y cerca del mar.
- Las versiones de acero cincado y A4, no son adecuados en ambientes con cloro (piscinas cubiertas, etc.).
- Para placas base con varios anclajes y mínimas separaciones entre ejes.

- 1,5 t - Para distancias al borde muy reducidas, la profundidad de colocación del anclaje será de 1,5 la longitud del anclaje, así como en superficies de hormigón < H150 (Estos valores no disponen de homologación).

2. Ventajas

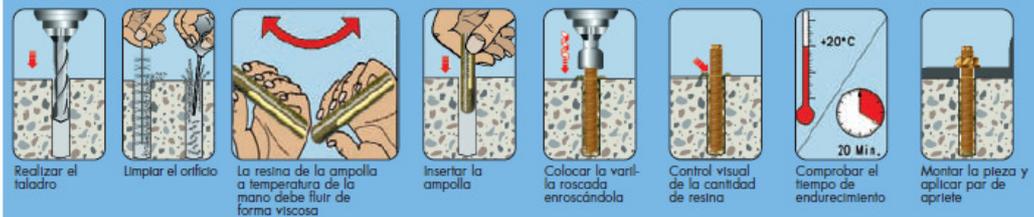
- Mínima separación respecto al borde y entre ejes.
- Utilizable sin necesidad de emplear herramientas de colocación especiales.
- Pequeño Ø de taladro y gran poder de sujeción.

3. Características

- Cumple con la Normativa Alemana de Construcción para zonas de compresión Z-21.3-1514 (hormigón sin fisuras), Socotec.
- Anclaje libre de presión de expansión.
- Indicado para cargas muy pesadas y pesadas.
- Para el anclaje en hormigón y en piedra natural.
- Reducidos tiempos de endurecimiento, incluso en ambientes húmedos.

Temperatura orificio	Tiempo de endurecimiento	
	min.	horas
> 20°C	10	-
+ 10°C a + 20°C	20	-
0°C a + 10°C	-	1
- 5°C a 0°C	-	5

Instrucciones de colocación




**Anclaje de unión
W-VAD 21**

Datos de capacidad									
Métrica del anclaje [mm]		M8	M10	M12	M14	M16	M20	M24	M30
Zona de compresión	F_{rec} [kN] \geq c20/25	4	7	10	12	15	27	37	60
	F_{rec} [kN] \geq c20/25	3	5	7	8	10	19	26	42
Momento recomendado	M_{rec} [Nm]	10,7	21,4	37,4	59,4	94,9	186	321	642
	M_{rec} [Nm]	12,1	24,1	42,1	66,9	107	209	201	402
Características									
Distancia entre ejes ¹⁾	$a \geq$ [cm]	20 (min 8)	22 (min 9)	27 (min 11)	30 (min 12)	31 (min 12,5)	42 (min 17)	52 (min 21)	70 (min 28)
Distancia al borde ¹⁾	$a_r \geq$ [cm]	10 (min 4)	11 (min 4,5)	13,5 (min 5,5)	15 (min 6)	15,5 (min 6,5)	21 (min 8,5)	26 (min 10,5)	35 (min 14)
Par de apriete	M_D [Nm]	10	20	40	60	80	150	200	400
Profundidad taladro	$h_1 \geq$ [mm]	80	90	110	120	125	170	210	280
Prof. de colocación	$h_S \geq$ [mm]	80	90	110	120	125	170	210	280
Espesor mín. soporte	$d \geq$ [cm]	13	14	16	17	17,5	22	26	33
Ø de la rosca	d_{rosca} [mm]	8	10	12	14	16	20	24	30
Ø de la broca**	d_{broca} [mm]	10	12	14	16	18	25	28	35
Ø taladro pieza a fijar	d_{pieza} [mm]	9	12	14	16	18	22	26	33
Dimensiones del anclaje									
Longitud total (para varillas roscadas)	l [mm]	18 110 18 150	26 130 26 175	34 160 84 220 174 300	50 170 35 235	45 190 155 300	70 260	65 300	
Altura máx. fijación (para varillas roscadas)	d_a [mm]	18 110 18 150	26 130 26 175	34 160 84 220 174 300	50 170 35 235	45 190 155 300	70 260	65 300	
Denominación		W-VAD M8 W-VAD M8 1,5t	W-VAD M10 W-VAD M10-1,5t	W-VAD M12 W-VAD M12 W-VAD M12 1,5t W-VAD M12 1,5t	W-VAD M14 W-VAD M14 1,5t	W-VAD M16 W-VAD M16 W-VAD M16 1,5t	W-VAD M20	W-VAD M24	
Art.-Nº. Anclaje de unión- Ampolla de resina para varilla roscada		905 408 905 408 15	905 410 905 410 15	905 412 905 412 905 412 15 905 412 1	905 414 905 414 15	905 416 905 416 905 416 15	905 420	905 424	Pedido especial bajo demanda
Art.-Nº. Anclaje de unión- Varilla roscada Ac. Zn. bicromado amarillo		905 410 08 905 410 08	905 410 10 905 410 10	905 410 12 905 410 12 905 410 12 905 410 123 905 410 124	905 410 14 905 410 14	905 410 16 905 410 16 905 410 162	905 410 20	905 410 24	Pedido especial bajo demanda
Art.-Nr. Anclaje de unión- Varilla roscada Acero inoxidable A4		905 411 08 905 411 081	905 411 10 905 411 101	905 411 12 905 411 12 905 411 123 905 411 124	905 411 14 905 411 141	905 411 16 905 411 162	905 411 20	905 411 24	Pedido especial bajo demanda
Art.-Nº. Anclaje de unión- Ampolla de resina para casquillos con rosca interior		905 412	905 414	905 416	-	905 422	-	-	
Art.-Nº. Anclaje de unión- Casquillos con rosca interior Acero blanco galv.		905 410 080	905 410 010	905 410 012	-	905 410 016	-	-	
Art.-Nº. Anclaje de unión- Casquillos con rosca interior Acero inoxidable A4		905 411 080	905 411 010	905 411 012	-	905 411 016	-	-	
Unidad de envasado	UE [Cantidad]	10	10	10	10	10	6	6	6

Componentes del sistema Würth


¹⁾ Para la reducción de cargas admisibles como consecuencia de la separación entre ejes o respecto al borde, véase Anexo 3.

**El informe de certificación determina la utilización de brocas de percusión de metal duro según la hoja informativa del IFT. Las brocas de percusión de Würth cumplen los datos de la hoja informativa de IFT sobre brocas de percusión de metal duro, y están controlados por el Instituto de Ensayos y Pruebas para Herramientas de Remscheid.