
Simulació dels efectes d'erosió a una dàrsena portuària per efecte de les embarcacions

Treball Final de Grau



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:
Jhonny Caballero Zenteno

Dirigit per:
Anna Mujal Colilles

Grau en Enginyeria de Sistemes i Tecnologies Navals

Barcelona, 10 de juliol de 2018



Agraïments

En primer lloc, vull agrair al professors que han estat involucrats per fer aquest treball possible. A l'Anna Mujal per estar pendent del meu treball tot i que ha sigut difícil, al Xavier Martínez per ajudar-me quan tenia problemes tècnics i confiar en mi amb el treball, i a Salvador de la Torre per estar sempre disponible per fer consultes de dubtes sobre la manipulació del programa i tenir paciència per explicar-me el conceptes que em faltaven per aprendre.

Agrair a la meva família, que tot i passar una situació complicada a casa han estat donant-me suport sempre. A la meva mare Cristina que estava pendent de com em trobava al llarg del curs, al meu padrastre Anders que sempre mostrava interès en el meu treball, al meu pare per confiar cegament en mi, a les meves germanes Ariana y Melissa que m'han donat ànims des de la distancia d'altres països, i la resta de familiars per no dubtar de les meves capacitats.

També agrair als companys de la universitat, Alex, Alejandro, Christian, Paula i Albert per acompanyar-me en aquesta ultima etapa del camí amb ànims quan em feien falta i somriures quan les necessitava. Als companys del institut que han ajudat amb tot el que han pogut. I la gent del meu grup de voley platja que m'han estat donant suport i consell amb les seves experiències i ànims.



Resum

El present treball consisteix en la realització d'un model numèric que pretén reproduir un model assajat en una piscina de proves hidrodinàmiques.

Per tal d'aconseguir-ho s'ha après a fer servir el programa GiD amb el tipus de problema corresponent per aquest cas concret. S'han seguit els manuals i tutorials que proporciona les pàgines del programa i a més s'han realitzat consultes a un expert del programa.

Per tal reproduir els resultats s'han realitzat dos tipus de models, un per comprovar el comportament de del fluid i altre pel efecte erosiu produïda pel flux resultant de les hèlixs propulsores.

Per dissenyar correctament els models es van establir simplificacions i idealitzacions dels models assajats. Es va crear tota la geometria, tractant sempre d'optimitzar-la per tenir un mallat més eficient.

Es va haver de dur a terme diverses correccions i proves del mateix model amb petites modificacions per aconseguir resultats acceptables.

La comprovació del resultats va ser possible gràcies als coneixements adquirits d'assignatures que han estat superades al llarg de la carrera.

Finalment, es va poder aconseguir resultats vàlids pel model hidrodinàmic. Però pel cas de l'efecte erosiu, on es fan servir partícules DEM al mallat, no ha estat possible la seva resolució amb resultats que es consideressin acceptables.

Tot i això es considera que existeix futur en la recerca d'aquest tipus de problemes mitjançant càlculs numèrics, ja que només cal implementar les millores que ja s'estan desenvolupant dels programes existents en el estudi de integració de fluids y partícules DEM.

Abstract

The following project consists on the creation of a model trying to simulate the behaviour of a tested model in a hydrodynamic tests pool.

In order to achieve this, it's learned to use the program GiD with the corresponding type of problem for the specific case. The manuals and tutorials provided by the program pages have been followed and consultations were also carried out by a program expert.

In order to reproduce the results, two types of models have been created, one to check the behaviour of the fluid and another for the erosion effect produced by the flow of the propeller.

To correctly design the models, simplifications and idealizations of the tested models were established. The Geometry was created, always trying to optimize it to have a mesh more efficient.

Several corrections and tests of the same model had to be carried out with small modifications to achieve acceptable results.

The verification of the results was possible thanks to the acquired knowledge of subjects that have been overcome throughout the race.

Finally, valid results were obtained for the hydrodynamic model. But for the erosion effect, where DEM particles are used in the mesh, their resolution hasn't been possible with acceptable results.

However, it's considered there is a future in the search for this type of problem by means of numerical calculations, since just the improvements that are already being developed for the existing programs in the study of integration of fluids and particles DEM have to be implemented.

Taula de continguts

AGRAÏMENTS	IV
RESUM	VI
ABSTRACT	VII
TAULA DE CONTINGUTS	VIII
CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ, OBJECTIUS I MOTIVACIONS.	1
1.1 INTRODUCCIÓ	1
1.2 OBJECTIUS	2
1.3 MOTIVACIONS	2
CAPÍTOL 2: ESTAT DEL ART.	3
2.1 ESTUDIS DELS EFECTES D'EROSIÓ ALS PORTS	3
2.2 PROGRAMES DE CÀLCUL	4
CAPÍTOL 3: PROGRAMA GID, PROBLEM TYPE F-DEMPACK I MÈTODE DE ELEMENTS DISCRETS (DEM)	6
3.1 PROGRAMA GID	6
3.2 PROBLEM TYPE: F-DEMPACK	7
3.3 MÈTODE D'ELEMENT DISCRET	7
3.3.1 LA FAMÍLIA DEM	8
3.3.2 APLICACIONS	9
3.3.3 ESQUEMA DEL MÈTODE	9
3.3.4 FORCES DE LLARG RECORREGUT	10
3.3.5 MÈTODE COMBINAT D'ELEMENTS DISCRETS FINITS	10
3.3.6 AVANTATGES I LIMITACIONS DEL DEM	10
CAPÍTOL 4: METODOLOGIA	12
4.1 EL CAS D'ESTUDI	12
4.2 MODEL HIDRODINÀMIC	13
4.2.1 ADEQUACIÓ DEL PROBLEMA	14
4.3 PRE-PROCÉS - DISSENY DEL PROBLEMA	15
4.3.1 GEOMETRIA	15
4.3.2 PROBLEM TYPE	24

4.3.3 MALLAT	25
CAPÍTOL 5: PRE-PROCÉS. RESULTATS	30
CAPÍTOL 6: CONCLUSIONS	36
BIBLIOGRAFIA	38
ANNEX 1.	41
A1.1 TUTORIAL INTRODUCTORI DEL GID	41
A1.1.1 GEOMETRIA	41
A1.1.2 ENTITATS GEOMÈTRIQUES	42
A1.1.3 MATERIALS	42
A1.1.4 CONDICIONS	43
A1.1.5 DADES GENERALS	43
A1.1.6 INTERVALS	43
A1.1.7 EIXOS LOCALS	44
A1.2 MODELACIÓ GEOMÈTRICA	44
A1.2.1 DESCRIPCIÓ DE LA FIGURA A CONSTRUIR	44
A1.2.2 DISPOSICIÓ DE COORDENADES	45
A1.2.3 COPY I MOVE	46
A1.2.4 CONSTRUCCIÓ DEL VOLUM	47
A1.2.5 SELECCIÓ DE SUPERFÍCIES PEL VOLUM	48
A1.2.5 ÚS DE CAPES	48
A1.2.6 TEST DEL MALLAT	48
A1.2.7 CREACIÓ DEL PONT COMPLET	49
A1.3 ASSIGNACIÓ DE MIDES A LA GENERACIÓ DE LA MALLA	50
A1.3.1 GENERACIÓ DE LA MALLA AMB ASSIGNACIÓ DE MIDES	51
A1.3.2 GENERACIÓ DE MALLA AMB OPCIONS PER DEFECTE	51
A1.3.3 ASSIGNACIÓ DE MIDES D'ELEMENTS AL VOLTANT DE PUNTS	52
A1.3.4 ASSIGNACIÓ DE MIDES D'ELEMENTS AL VOLTANT DE LÍNIES	53
A1.3.5 GENERACIÓ DE MALLA AMB ASSIGNACIÓ DE MIDES DELS ELEMENTS A LES SUPERFÍCIES	54
A1.3.6 GENERACIÓ DE MALLA UTILITZANT CORDAL ERROR	55
A1.4 POST-PROCESS D'UNA PEÇA MECÀNICA	56
A1.4.1 POST-PROCESS DE LA PEÇA	57
A1.4.2 VISUALITZACIÓ DELS RESULTATS	57
A1.4.3 MODES DE VISUALITZACIÓ	62
A1.4.4 VISUALITZACIÓ DE LA DEFORMADA	63

Llistat de Figures	12
Il·lustració 1. Disposició de les hèlixs al pla ZY. Mujal-Colilles et al (2017).	12
Il·lustració 2. Piscina de proves. Mides entre les parets. Mujal-Colilles et al (2017)	13
Il·lustració 3. Gràfic de velocitat al eix de simetria per: a) $Y = 0$ i b) $Y = ap/2$. Mujal-Colilles et al (2017).	13
Il·lustració 4. Finestra de paràmetres generals.	15
Il·lustració 5. Valors de mòdul i sentit de gravetat.	16
Il·lustració 6. Contorns exteriors del model.	16
Il·lustració 7. Punts d'unió de les circumferències per hèlixs.	17
Il·lustració 8. Superfície circular de les hèlixs.	17
Il·lustració 9. Model amb contorns exteriors i interiors.	17
Il·lustració 10. Superfícies inicials.	18
Il·lustració 11. Finestra d'opció copiar/transformar.	18
Il·lustració 12. Selecció de superfície. Resultat d'extrusió.	19
Il·lustració 13. Comanda de intersecció per dos Superfícies.	19
Il·lustració 14. Selecció de superfície. Resultat de la divisió de superfícies per la intersecció.	19
Il·lustració 15. Selecció de superfície. Resultat del eliminació d'entitats.	20
Il·lustració 16. Model amb superfícies finals.	20
Il·lustració 17. Model amb volum.	20
Il·lustració 18. Vista del perfil del model.	21
Il·lustració 19. Vista de la planta del model.	21
Il·lustració 20. Vista del alçat del model.	21
Il·lustració 21. Vista isomètrica del model.	22
Il·lustració 22. Finestra de Capes i grups.	22
Il·lustració 23. Creació de grups.	22
Il·lustració 24. Representació gràfica d'entitats Inlet i Outlet.	23
Il·lustració 25. Representació gràfica d'entitat Fluid.	23
Il·lustració 26. Representació gràfica d'entitat Walls.	23
Il·lustració 27. Problem Type F-DEMpack.	24
Il·lustració 28. Selecció de propietats.	24
Il·lustració 29. Assignació d'entitats i propietats.	24
Il·lustració 30. Selecció d'entitats per Boundary Conditions, Outlet Pressure i No-Slip.	25
Il·lustració 31. Assignació de la mida dels elements. Generació de malla.	25

Il·lustració 32. Malla resultant de les parets.	26
Il·lustració 33. Malla resultant del fluid.....	26
Il·lustració 34. Vista del perfil de la malla.	26
Il·lustració 35. Vista de la planta de la malla.	27
Il·lustració 36. Vista del alçat de la malla.	27
Il·lustració 37. Barra de les opcions generals.	27
Il·lustració 38. Finestra d'informació del càlcul de la simulació.	28
Il·lustració 39. Visualització de la velocitat axial per a plans paral·lels al pla que conté els propulsors: a) $X = 2,5Dp$, b) $X = 5Dp$, c) $X = 7,5Dp$ i d) $X = 15Dp$. Mujal-Colilles et al (2017).	30
Il·lustració 40. Finestra de opcions de visualització de resultats policromàtic o vectors.	31
Il·lustració 41. Comanda de tall de plans. Procés de tall dels nodes.....	31
Il·lustració 42. Model amb els plans de resultats.	31
Il·lustració 43. Finestra dels grups dels plans creats.	32
Il·lustració 44. Resultat gràfic de la evolució de la velocitat del fluid en intervals de 22 segons.	32
Il·lustració 45. Resultats de velocitat del flux Pla ZX.	33
Il·lustració 46. Resultats de velocitat del flux Pla ZX.	33
Il·lustració 47. Resultats de velocitat del flux Pla YZ.	33
Il·lustració 48. Resultats de velocitat del flux Pla YZ.	34
Il·lustració 49. Resultats de velocitat del flux Pla YZ.	34
Il·lustració 50. Resultats de reaccions del model al pla XY.....	34
Il·lustració 51. Exemple de corba, superfície i superfície retallada.....	42
Il·lustració 52. Eixos locals de la corba. Eixos locals transferits als elements de la malla.	44
Il·lustració 53. Pont, model de disseny.	45
Il·lustració 54. Esquema de mides del model.....	45
Il·lustració 55. Coordenades dels punts. Línies creades.....	45
Il·lustració 56. Creació de punts. Línies resultants.....	46
Il·lustració 57. Coordenades de creació de superfícies. Superfícies resultants.	47
Il·lustració 58. Mallat de la estructura.	48
Il·lustració 59. Mallat del model.....	50
Il·lustració 60. Model de ToMesh.gid.....	51
Il·lustració 61. Mallat per defecte.	51
Il·lustració 62. Selecció del punt de concentració de la malla.	52

Il·lustració 63. Malla resultant de la concentració en un punt.....	52
Il·lustració 64. Mallat amb elements concentrats i velocitat de transició de 0,8.	53
Il·lustració 65. Concentració de malla a les línies de base del rectangle.	54
Il·lustració 66. Mallat amb la concentració al tall del prisma.....	54
Il·lustració 67. Mallat amb concentració d'elements a zones corbades.	55
Il·lustració 68. Peça mecànica a analitzar.....	56
Il·lustració 69. Peça amb punts A i B bloquejats.	56
Il·lustració 70. Finestra de visualització de resultats.....	57
Il·lustració 71. Resultats de VON MISES per Contour Fill.	57
Il·lustració 72. Resultats de VON MISES per Contour Fill. Pel component X.....	58
Il·lustració 73. Llegenda de valors per defecte. Llegenda amb els limitis imposats.....	58
Il·lustració 74. Finestra de Contour Limits.....	58
Il·lustració 75. Resultats amb la nova escala de colors.	59
Il·lustració 76. Resultats amb escala de colors modificada per valors mínims i màxims.	59
Il·lustració 77. Resultats per la visualització de valors específics.....	60
Il·lustració 78. Resultats de Iso Surfaces per defecte. Resultat de Iso Surfaces amb Automatic Windth..	60
Il·lustració 79. Resultats amb vectors.....	61
Il·lustració 80. Resultats ampliats de la visualització amb vectors.....	61
Il·lustració 81. Finestra d'estils de visualització.....	62
Il·lustració 82. Visualització amb Style de: Boundaries, All Lines i Hidden Lines.	62
Il·lustració 83. Visualització amb Style de: Body, Body Bound i Body Lines.....	62
Il·lustració 84. Meú Culling de Front Faces. Front Faces amb Massive. Culling None amb Transparent...	63
Il·lustració 85. Resultats de la deformada.	63



Capítol 1: Introducció, objectius i motivacions.

1.1 Introducció

En l'actualitat el transport marítim representa la major part del comerç mundial. Per tant, existeix una immensa quantitat d'embarcacions de transport de mercaderies o passatge que realitzen maniobres d'entrada i sortida dels ports constantment. Degut a aquestes maniobres, amb les contínues repeticions al llarg del temps, que degut a les accions de les hèlix generen efectes d'erosió sobre la base de les dàrsenes portuàries.

El resultat del desgast produeix una sedimentació dels elements erosionats en la mateixa zona afectada o a proximitats. Això implica que la superfície ja no sigui homogènia i per tant es pugin produir problemes amb les operacions de port de futures embarcacions o de les que ja estan presents.

El problema esmentat ha estat creixent en els últims 20 anys amb l'augment del comerç, això porta a problemes econòmics i estructurals per als ports. Els ports han d'optar per prendre mesures com dragar els sediments resultants, omplir els forats generats o implementar mesures de protecció per prevenir el desgast. Aquestes mesures repercuteixen en la eficiència i operativitat dels ports ja que impliquen inversions o pèrdues econòmiques.

Aquest problema afecta a molts tipus de ports de tot el món, de diferents mides, morfologies o profunditats. Per tant, en aquests darrer anys s'han realitzat proves per analitzar l'efecte a diferents escales, a partir d'aquest assajos i els seus resultats ha sorgit la idea de comprovar si es poden extreure aquests mateixos resultats a partir de models creats per simuladors.

1.2 Objectius

Al començament del treball es van establir un objectiu general i específics que a mesura que s'ha avançant s'han vist modificats.

D'objectiu general es va proposar la reproducció del comportament de la popa d'un vaixell de doble hèlix mitjançant eines numèriques per mig d'un model hidrodinàmic i altre del efecte erosiu.

Com a objectius específics es tenen els presentats a continuació:

- Aprendre a fer servir el programa GiD des de zero. Per a aquesta tasca es van portar a terme diferents tutorials i proves de models diferents del que es realitzarà com a disseny final del treball, i així comprovar que s'ha adquirit els coneixements suficients sobre el funcionament del programa.
- Veure si es pot modelitzar l'assaig del canal de proves a dins del mateix programa i comprovar si és factible realitzar les proves de càlcul amb el tipus d'anàlisi escollit.
- Validar els resultats obtinguts del modelat amb els resultats que s'ha obtingut als assajos que es van fer prèviament a la realització d'aquest treball.

1.3 Motivacions

Les motivacions principals a nivell personal que van impulsar la creació del treball van ser:

- La meva motivació principal i personal ve a raó que al tercer any de carrera vaig treballar amb el programa GiD, centrat en l'anàlisi estructural mitjanant Mètode de Elements Finitos, i el tema seleccionat per aquest treball em dona l'oportunitat d'aprendre a operar amb una opció del programa que es centra en l'anàlisi de dinàmica de fluids i la interacció amb partícules.
- També la curiositat d'aprendre a manipular el DEMpack per modificar les característiques dels elements de partícules que s'utilitzaran en el treball i d'aquesta manera ampliar el meu coneixement en l'ús pràctic d'aquest programa de cara al futur.

Altra motivació important de cara a la recerca del treball va ser:

- La possibilitat que aquest treball pugui servir com a base o ajuda en futurs treballs que centren o investiguen el tema a tractar o altres molt diferents.
- L'ampliació de l'anàlisi sobre l'erosió produïda pels vaixells utilitzant eines pel càlcul numèriques.

Capítol 2: Estat del art.

2.1 Estudis del efectes d'erosió als ports

El problemes que es generen a partir les maniobres als port han obert la possibilitat de fer-ne estudis per aquest fenòmens d'erosió i sedimentació.

Com s'ha esmentat prèviament, durant els darrers 50 anys s'han portat a terme diferents tipus de treball relacionats amb aquests canvis en la morfologia del relleu dels fons de les dàrsenes portuàries, on s'ha desenvolupat expressions tant teòriques com practiques per a determinar i predir els efectes resultants del fregament per la força de la hèlix. La majoria d'aquestes expressions es basen en estudis experimentals.

En l'actualitat es continuen realitzant estudis experimentals per reproduir els efectes que es generen per determinats tipus de embarcacions, en concret a la UPC. Aquest treball es centra en un assaig realitzat recentment al Laboratori d'Enginyeria Marítima al Campus Nord de la UPC.

2.2 Programes de càlcul

Actualment existeixen una immensitat de programes de càlcul, tot i que cadascun té diferents funcions que varien segons el sector al que estiguin enfocats, tenint com a objectiu simplificar i facilitar el treball de càlcul i anàlisi de diferents tipus de problemes. D'aquesta forma s'abarateixen els costos d'estudis, es simplifica la dificultat de fer proves experimentals i, fonamentalment, s'estalvia temps en realitzar diferents experiments o assajos.

Dins d'aquest gran grup de programes, es troben el que s'enfoquen en analitzar fenòmens de fregament o de contacte entre diferents tipus de elements o grups amb el contacte de estructures i fluids. Un d'aquest es el programa GiD gràfic que està destinat a la definició i preparació de les dades per a realitzar una simulació numèrica.

El programa GiD serveix per a simular diferents tipus de anàlisis, en funció del "tipus de problema" o "Problem Type" que s'estableixi. En la actualitat aquests **Problem Types** poden realitzar treballs d'anàlisi estructurals, dinàmica de fluids, processos de formació industrial, electromagnetisme computacional o mètodes basats en partícules.

Un d'aquest es el DEMpack que fa servir una formulació bàsica d'elements discrets amb partícules esfèriques o cilíndriques, que va ser proposada per primera vegada per Peter Cundall i Otto Strack. Aquesta formulació es va adaptar i implementar en el codi d'elements dinàmic discret/Finit del DEMpack.

Aquesta formulació té diverses aplicacions de treball com la modelització del desgast de l'eina en el tall de roca, acoblament termomecànic i altres capacitats no present en altres codis d'elements discrets comercials.

En els darrer anys s'han estat realitzant treballs on s'analitzen les interaccions entre fluids i partícules esfèriques, obtenint resultats bastant satisfactoris. Tot i que encara s'està treballant per a continuar millorant i progressant en aquest tipus de anàlisis, els resultats del producte actual són adequats.

Capítol 3: Programa GiD, Problem Type F-DEMpack i Mètode de elements Discrets (DEM)

3.1 Programa GiD

GiD és un programa gràfic, que té com a principals objectius la definició i la preparació de les dades per tal de realitzar una simulació numèrica. Aquest correspon al entorn de pre i post-process de la definició i el tractament de problemes de simulació numèrica.

El pre-procès es centra en la creació de la geometria a estudiar, dels materials que la conformen, les condicions de contorn, les forces aplicades i altres paràmetres com l'estratègia de resolució. El programa s'encarrega de crear una malla i transferir-li les dades associades a la geometria. El post-procès consisteix en la visualització dels resultats de manera que siguin fàcilment interpretables.

Una característica substancial de GiD és que no està especialitzat en un tipus d'anàlisi, ja que el GiD no reconeix cap condició o material fins que se li executa un tipus de problema.

Actualment disposa d'aplicacions en camps d'anàlisi estructural, mecànic, dinàmica de fluids, electromagnetisme, transferència de calor, geomecànica, etc.

GiD s'ha estat reconegut com un dels programes de més èxit desenvolupats al CIMNE, sent capaç de donar una resposta excel·lent als requisits d'enginyers, científics, professionals i estudiants, institucions acadèmiques i empreses. Les prestacions tècniques que ofereix el programa es podrien resumir en les següents:

- Un conjunt d'eines senzilles per a la definició del problema a analitzar, que van des de la geometria fins als diversos materials que les componen i les condicions associades, com fonts d'energia i restriccions.
- Un potent generador de malles capaç d'adaptar-se a les diferents metodologies de càlcul, amb exemples com: mètode dels elements finits, volums finits, elements de contorn, mètode dels punts finits o mètode d'elements discrets.
- Un ampli ventall de capacitats de visualització, com la usual representació policromàtica de resultats o sofisticats algoritmes d'interpretació de fluxos de corrent o tractament de textures.

- Un entorn creat des de l'enfocament de l'usuari que uneix la facilitat d'aprenentatge amb la flexibilitat d'adaptació a múltiples problemes.
- La possibilitat de personalitzar completament el programa per a crear un paquet de software integrat amb el codi de simulació de l'usuari.

3.2 Problem Type: F-DEMPack

Inicialment, degut a que el GiD no està acoblat a cap programa d'anàlisi, cal escriure una sèrie de fitxers per a descriure les propietats que té un material de cara a la simulació, les possibles condicions de contorn, el format del fitxer de dades d'entrada per al programa de càlcul (aquest programa és un executable independent de GiD, que pot estar escrit en qualsevol llenguatge).

Aquest conjunt de fitxers de personalització és el que s'anomena un "tipus de problema". Quan GiD càrrega aquest tipus de problema, reconeix el "llenguatge" apropiat per a la simulació en qüestió.

Per aquest cas el Problem type que es va fer servir va ser el del paquet de F-DEMPack, el qual està dissenyat principalment per a realitzar anàlisis de problemes d'interacció amb partícules – fluid.

El F-DEMPack forma part del Kratos que posseeix moltes més opcions d'anàlisi, com pot ser les internacions entre partícules de diferents sòlids, estructures amb partícules, etc. Per al cas plantejat el paquet F-DEMPack és suficient ja que fer servir el Kratos no millorarà el rendiment de càlcul i podria afegir més càrrega de temps de càlcul o requerir més capacitat de processament.

3.3 Mètode d'element discret

Es considera un mètode d'element discret (DEM) a qualsevol d'una família de mètodes numèrics per calcular el moviment i l'efecte d'un gran nombre de partícules petites. Tot i que DEM està molt relacionat amb la dinàmica molecular, el mètode es distingeix generalment per la seva inclusió dels graus de llibertat rotacionals, així com el contacte amb l'estat i, sovint, les geometries complicades.

Amb els avenços en la capacitat de càlcul informàtic i els algorismes numèrics, s'ha pogut simular numèricament milions de partícules en un sol processador. Avui, DEM està acceptat com un mètode eficaç d'abordar problemes d'enginyeria en materials granulars i discontinus, especialment en els fluxos granulars, la mecànica de pols i la mecànica de roques.

Els mètodes d'elements discrets són relativament intensius i limiten la longitud d'una simulació o el nombre de partícules. Diversos codis DEM, igual que els codis de dinàmica molecular, aprofiten les capacitats de processament paral·leles (sistemes compartits o distribuïts) per augmentar el nombre de partícules o la durada de la simulació. Una alternativa per tractar totes les partícules es tractar el material com un continu.

En el cas del comportament granular semblant a un sòlid, com en la mecànica del sòl, l'enfocament del continu es refereix normalment al material com elàstic o elasto-plàstic i el modelitza amb el mètode d'elements finits o amb un mètode lliure de malla. En el cas del flux granular semblant a líquid o de gas, l'enfocament de continuïtat pot tractar el material com a fluid i utilitzar dinàmiques de fluid computacional. Els inconvenients per a l'homogeneïtzació de la física d'escala granular, tanmateix, estan ben documentats i s'han de considerar acuradament abans d'intentar utilitzar un enfocament continu

3.3.1 La família DEM

Les diverses branques de la família DEM són el mètode proposat per Peter A. Cundall (1971), el mètode d'elements discrets generalitzat per Williams, Hocking i Mustoe (1985), l'anàlisi de deformació discontinua (DDA) de Shi (1992) i el mètode finit- Mètode d'elements discrets desenvolupat simultàniament per diversos grups de Munjiza i Owen.

El mètode general va ser desenvolupat originalment per Cundall en 1971 per problemes de mecànica amb roques. La base teòrica d'aquest mètode va ser establerta per Sir Isaac Newton en 1697. Més tard Williams, Hocking i Mustoe (1985) van demostrar que DEM es podia veure com un mètode d'element finit generalitzat. La seva aplicació als problemes de geomecànica es descriu en el llibre *Numerical Methods in Rock Mechanics* (Williams, Pande & Beer 1990).

Les 1a, 2a i 3a Conferència Internacional sobre Mètodes d'Element Discrets han estat un punt comú per als investigadors de publicar avenços en el mètode i les seves aplicacions. Els articles de revistes que revisen l'estat de l'art han estat publicats per Williams, Bicanic i Bobet. Un mètode integral del mètode combinat d'elements finits i elements discrets està inclòs en el llibre *The Combined Finite-Discrete Element Method*.

3.3.2 Aplicacions

L'assumció fonamental del mètode és que el material consta de partícules separades i discretes. Aquestes partícules poden tenir diferents formes i propietats. Alguns exemples són: líquids i solucions, materials a granel en sitges d'emmagatzematge, matèria granular, pols i masses de roca.

Les indústries típiques que utilitzen DEM són: Agricultura i manipulació d'aliments, Química, Enginyeria civil, Oli i gas, Mineria, Processament mineral, Farmacèutica i Pol·lúrica en pols.

3.3.3 Esquema del mètode

Es comença una simulació DEM generant primer un model, que fa orientacions espacials a totes les partícules i assigna una velocitat inicial. Les forces que actuen sobre cada partícula es calculen a partir de les dades inicials i les lleis físiques i els models de contacte pertinents.

En general, una simulació es compon de tres parts: la inicialització, el temps de pas explícit i el postprocessament. El pas del temps sol requerir un pas de selecció del veí més proper per reduir el nombre de possibles parells de contacte i disminuir els requisits computacionals; sovint només es realitza periòdicament.

Es poden considerar les següents forces en simulacions macroscòpiques:

- Fricció, quan dues partícules es toquen entre si.
- La plasticitat de contacte o el retrocés, quan dues partícules xoquen.
- Gravetat, força d'atracció entre partícules a causa de la seva massa, que només és rellevant en simulacions astronòmiques.
- Potencials atractius, com ara la cohesió, l'adhesió, el pont líquid, l'atracció electrostàtica.

A nivell molecular, podem considerar:

- La força de Coulomb, l'atracció electrostàtica o la repulsió de partícules amb càrrega elèctrica;
- Repulsió de Pauli, quan dos àtoms s'apropen estretament;
- Força de van der Waals.

Totes aquestes forces s'agreguen per trobar la força total que actua sobre cada partícula. S'utilitza un mètode d'integració per calcular el canvi en la posició i la velocitat de cada partícula durant un cert pas temporal a partir de les lleis de moviment de Newton. A continuació, les noves posicions s'utilitzen per calcular les forces durant el següent pas, i aquest repetit es repeteix fins que finalitza la simulació.

Els mètodes d'integració típics utilitzats en un mètode d'elements discrets són:

- l'algoritme Verlet,
- velocitat Verlet,
- integradors simplectics,
- el mètode leapfrog.

3.3.4 Forces de llarg recorregut

Quan es tenen en compte forces de llarg recorregut (normalment la gravetat o la força de Coulomb), cal calcular la interacció entre cada parell de partícules. Tant el nombre d'interaccions com el cost de la computació augmenten de manera quadràtica amb el nombre de partícules. Això no és acceptable per a simulacions amb gran quantitat de partícules.

Una possible forma d'evitar aquest problema és combinar algunes partícules, que estan lluny de la partícula considerada, en una pseudopartícula. Es considera com a exemple la interacció entre una estrella i una galàxia llunyana: l'error derivat de combinar totes les estrelles de la galàxia distant en una massa de punts és insignificant. Els anomenats algorismes d'arbres s'utilitzen per decidir quines partícules es poden combinar en una pseudopartícula. Aquests algorismes disposen de totes les partícules en un arbre, un quadre en el cas bidimensional i un octaedre en el cas tridimensional.

No obstant això, les simulacions en dinàmica molecular divideixen l'espai en el qual la simulació es produeix en cèl·lules. Les partícules que surten per un costat d'una cel·la només s'insereixen a l'altre costat (condicions periòdiques de la frontera); el mateix passa amb les forces. La força ja no es té en compte després de l'anomenada distància de tall (normalment la meitat de la longitud d'una cel·la), de manera que una partícula no està influïda per la imatge de mirall de la mateixa partícula a l'altre costat de la cel·la. Ara es pot augmentar el nombre de partícules simplement copiant les cel·les.

Algorismes per fer front a la força de llarg abast inclouen:

- Simulació Barnes-Hut,
- el mètode multipolar ràpid.

3.3.5 Mètode combinat d'elements discrets finits

Seguint el treball de Munjiza i Owen, el mètode combinat d'elements discrets finits s'ha desenvolupat encara més en diverses partícules irregulars i deformables en moltes aplicacions, incloent pastilles farmacèutiques, embalatge i simulacions de flux i anàlisi d'impacte.

3.3.6 Avantatges i limitacions del DEM

- Avantatges

DEM es pot utilitzar per simular una gran varietat de situacions de flux granular i mecànica de roca. Diversos grups de recerca han desenvolupat de forma independent un programari de simulació que està d'acord amb resultats experimentals en una àmplia gamma d'aplicacions d'enginyeria, incloent pols adhesiu, flux granular i masses de roques articulades.

DEM permet un estudi més detallat de la micro-dinàmica dels fluxos de pols del que sovint és possible mitjançant experiments físics. Per exemple, les xarxes de força formades en un mitjà granular es poden visualitzar utilitzant DEM. Aquestes mesures són gairebé impossibles en experiments amb petites i moltes partícules.

- **Desavantatges**

El nombre màxim de partícules i la durada d'una simulació virtual estan limitades per la potència computacional. Els fluxos típics contenen milers de milions de partícules, però les simulacions DEM contemporànies en recursos de computació de clústers grans només han estat capaços d'apropar-se recentment a aquesta escala durant un temps prou llarg (temps simulat, no temps d'execució real del programa).

DEM és computacionalment exigent, que és la raó per la qual no ha estat tan fàcil i àmpliament adoptada com enfocaments de continuïtat en ciències d'enginyeria computacional i la indústria. No obstant això, els temps d'execució del programa real es poden reduir significativament quan les unitats de processament gràfic (GPU) s'utilitzen per realitzar simulacions DEM [5] [6] a causa de la gran quantitat de nuclis informàtics en GPU típics. A més, les GPU tendeixen a ser significativament més eficients energèticament que els clústers convencionals de còmput quan es realitzen simulacions DEM, és a dir, una simulació de DEM resolta en GPU requereix menys energia que quan es resol en un clúster de còmput convencional.

Capítol 4: Metodologia

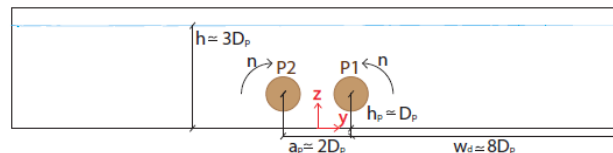
4.1 El cas d'estudi

Com ja s'ha dit en la part introductòria del treball, aquest projecte ve plantejat per simular els resultats del assajos d'un model escalat que representava una embarcació real.

En aquest experiment es va utilitzar una piscina que posseïa finestres laterals per poder observar l'efecte de les hèlix en tot moment. Dins de la piscina es tenia aigua i sorra al fons d'aquest per simular l'ambient dels ports.

Es van fer servir dues hèlix de quatre pales amb les següents característiques:

- Diàmetre $\rightarrow D_p \rightarrow 0,254$ m.
- Profunditat respecte el fons $\rightarrow H_p \rightarrow 0,26$ m. (valor similar a diàmetre de les hèlix)
- Separació entre elles $\rightarrow a_p \rightarrow 0.508$ m.
- Distància entre els propulsors i parets laterals $\rightarrow 2,032$ m aproximadament.



Il·lustració 1. Disposició de les hèlixs al pla ZY. Mujal-Colilles et al (2017).

La profunditat de l'aigua per aquest cas va ser de 0,7 m respecte el fons de sorra. El gruix de sorra que es va determinar a col·locar va ser de 0,5 m de gruix.

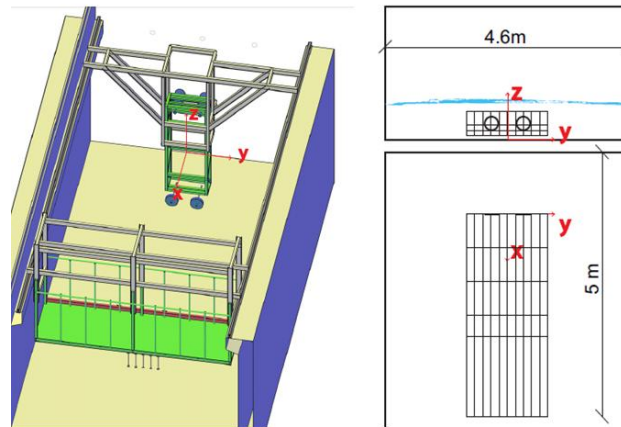
Es van emprar cinc aparells de mesura de velocitat puntual (Acoustic Doppler Velocimeter), ubicats en diferents posicions, que posseïen un sistema de referència de moviment electrònic. Tenien com a objectiu captar la cadència de la velocitat en els tres eixos de coordenades. En els assajos fets es van mesurar un total de 220 punts en les tres dimensions.

Es va tenir en compte que l'origen de coordenades es va situar en l'eix de simetria de la part inferior del fons a la distància de la posició de les hèlix. Es va trobar petites diferències de velocitats de rotació entre les dues hèlix, però per al resultat final no van produir grans efectes.

Les mesures del Canal on s'han realitzat les proves son les següents:

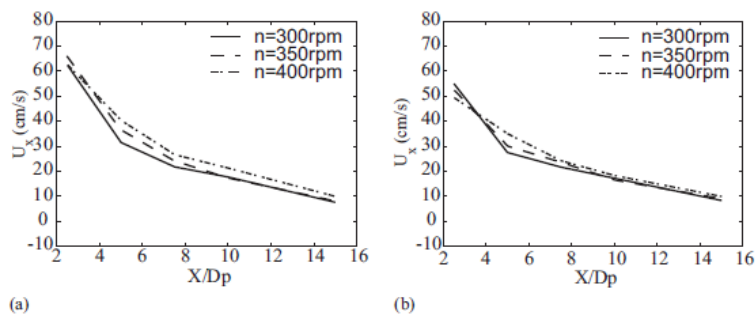
- Longitud → 12,5 m
- Amplada → 4,6 m
- Alçat → 2,5 m

Amb les proves de velocitat es va comprovar que la longitud i la distància entre les parets laterals no produeix cap tipus de influència sobre el flux del fluid, per tant es va considerar que eren prou distants per tenir els resultats desitjats.



II·lustració 2. Piscina de proves. Mides entre les parets. Mujal-Colilles et al (2017)

Del resultat de proves de velocitat axial es va obtenir el següent gràfic, on es veu la velocitat que adquireix el flux en funció a la distància que es trobi dels propulsors.



II·lustració 3. Gràfic de velocitat al eix de simetria per: a) $Y = 0$ i b) $Y = ap/2$. Mujal-Colilles et al (2017)

En el primer gràfic es tenen les dades del punt situat a en l'eix de simetria entre les dues hèlix. Mentre que el segon està situat en el centre d'una de les hèlix.

4.2 Model hidrodinàmic

4.2.1 Adequació del problema

Per tal d'analitzar l'estructura proposada s'han de realitzar simplificacions i adequacions, per poder simular un model que ens proporcioni els resultats desitjats amb el programa. Simplificar el model, a la vegada, estalviarà temps de càlcul del programa.

La idealització del problema feta es va seguir a partir de realitzar tasques de prova i error amb models variats fins arribar a les següents simplificacions:

- **Dimensions de la piscina.**

En un inici es va crear la piscina amb les dimensions reals del assajos del canal, però amb la prova de diferents models es va comprovar que es pot reduir les mesures de la piscina a:

Longitud inicial → 12,5 m va passar a → 4 m de longitud.

Amplada inicial → 4,6 m va passar a → 3,2 m de longitud.

Alçat inicial → 2,5 m va passar a → 0,7 m de longitud.

Per aquestes mesures el flux té el mateix comportament que amb les mesures inicial, per lo qual el seu efecte es pràcticament nul.

Finalment per la posició de les hèlix es va establir que han de ser situades a 3 m de distancia del la paret frontal per no tenir efectes en el flux.

- **Geometria Hèlix.**

Per a les hèlixs es va establir que el flux que generen es principalment de velocitat axial, per tant la geometria que es va definir en programa seria una superfície circular i plana. La divergència del fluid vindrà definida pel moviment del mateix fluid al estar movent-se constantment.

Degut al fet que no es pot simular el moviment rotatori de la hèlix en funció del temps, es va optar per emprar una entrada de flux, que introdueix nou fluid a mesura que passa el temps.

Una altra modificació que es va haver de fer va ser que la superfície de les hèlixs han de formar part de la estructura total ja que el programa del mallat no calcula bé les interaccions amb el flux.

- **Superfícies lliures.**

En la piscina de proves es tenia una superfície lliure de mes d'un metre d'alçada. Als assajos del Canal de proves es va veure que en aquesta superfície límit del fluid, que es troba a 0,7 m de l'alçat, no es presentava alteracions prou gran per tenir en compte aquesta superfície lliure, que apareix entre el aigua i l'aire de la piscina de proves.

Per tan en el modelat es va decidir treure aquesta superfície lliure i només treballar amb un sol medi que seria el del fluid, aigua, en comptes de tenir altre medi, aire. Amb aquesta reducció estalvia molt temps de càlcul ja que no s'ha de mallar aquest medi.

- **Condicions de contorn.**

Per al nostre model, les condicions de contorn principals han estat la limitació de moviment en els tres eixos de les parets que contenen i formen el fluid i les hèlixs, la introducció de moviment degut al *Inlet* creat per simular la entrada de flux i la creació d'un mitja de sortida, *Outlet*, del flux que entra a causa del *Inlet*.

En la entrada de fluid s'estableix una velocitat de sortida de 50 cm/s, en funció dels resultats, per nombre de revolucions màximes, que es troben al gràfic b) de la il·lustració 3.

A part de les condicions de contorn esmentades no es necessari tenir en compte cap altre tipus de condició externa, ja que als assajos tant al inici com el transcurs d'aquest no se li aplica cap altre força externa.

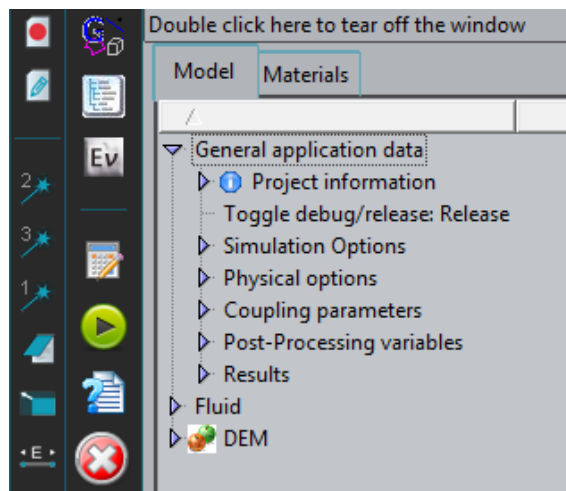
4.3 Pre-procés - disseny del problema

4.3.1 Geometria

L'estructura del model següent ha de simular un tros de la piscina de proves, per tal d'aconseguir la geometria desitjada es va seguir els següents passos:

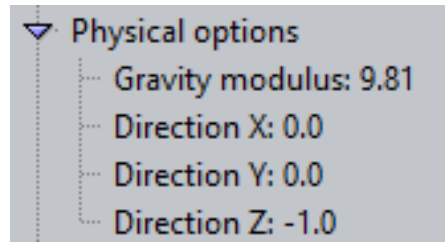
- **Paràmetres inicials**

Abans de realitzar la modelització del programa, es té diferents opcions que poden modificar el tipus de anàlisi en el apartat de **General Application Data** com **Project Information**, **Simulation Options**, **Physical Options**, **Coupling Parameters**, **Post-Processing Variables** i **Results**. En principi els paràmetres establerts pel programa son els correctes pel tipus d'anàlisi que es durà a terme.



II-lustració 4. Finestra de paràmetres generals.

Tot i que els paràmetres establerts ja estan bé inicialment, per no tenir problemes futurs es comprova la direcció on s'aplicarà la força de la gravetat i el seu mòdul a **Physical Options**. D'aquesta forma es tindrà en compte aquesta direcció per definir els eixos de coordenades de la geometria del model.



Il·lustració 5. Valors de mòdul i sentit de gravetat.

Un altre apartat que és important comprovar i, possiblement, modificar és el de **Simulation Options**. Però aquest s'explicarà en els apartats posteriors.

- **Definició dels eixos de coordenades.**

Per començar amb la creació del model es va definir el eixos de coordenades de la següent manera:

Eix de coordenades Z → Per valors de la alçada.

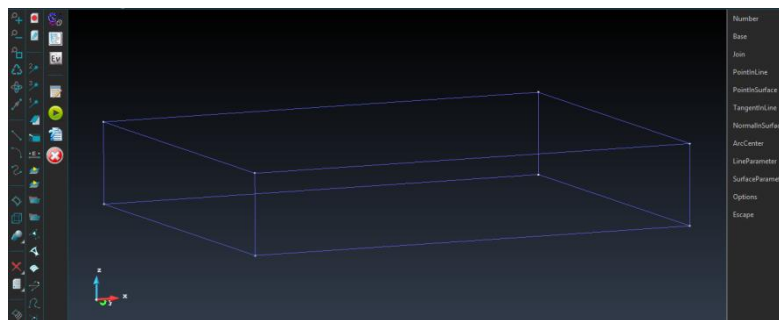
Eix de coordenades X → Per valors de la longitud.

Eix de coordenades Y → Per valors de la amplada.

Es pren com a origen de coordenades la paret oposada a la posició de les hèlixs, al punt de simetria. Aquesta disposició es la oposada a la que es va presentar en els assajos del canal de proves hidrodinàmiques.

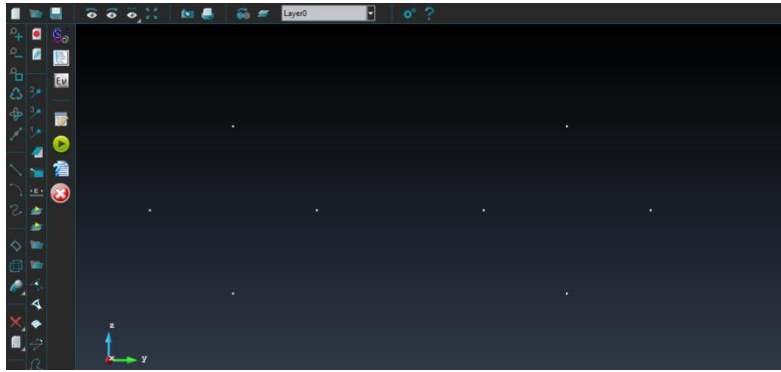
- **Definició dels contorns de la estructura**

Amb el comandament **Geometry – Create – Point** s'introdueix els 8 punts necessaris, per crear les arestes del contorn principal del model. Per unir aquests punts fa servir el comandament **Geometry – Create – Line – Join** i s'aconsegueix els contorns del disseny.



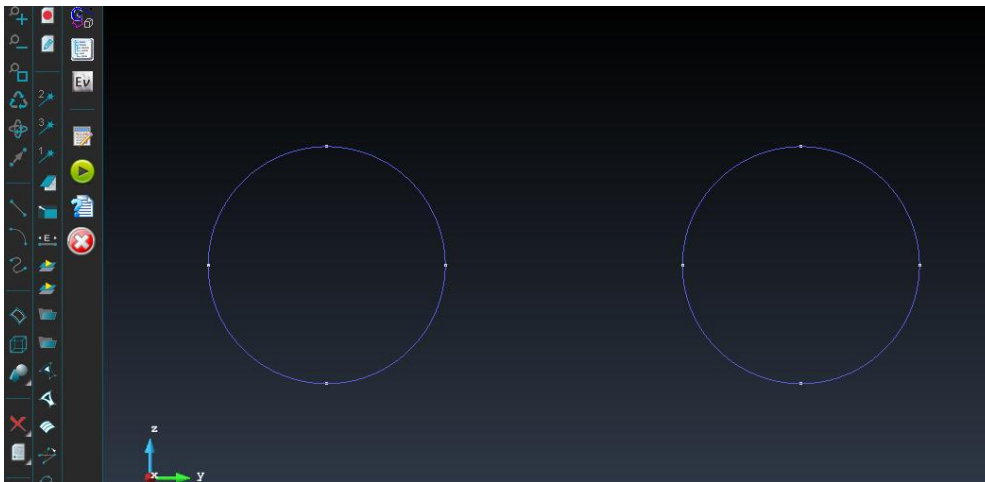
Il·lustració 6. Contorns exteriors del model.

Un cop fets els contorns es va donar pas a la realització de les hèlixs amb **Geometry – Create – Point** creant 4 punts per formar les circumferències que representarà els propulsors.



Il·lustració 7. Punts d'unió de les circumferències per hèlixs.

Amb els punts creats per definir les circumferències de diàmetre 0.254 m, es va fer servir **Geometry – Create – Arc – Join**. Després de crear les circumferències que es veuen a continuació es va procedir a eliminar els punts sobrants.




Il·lustració 8. Superfície circular de les hèlixs.

El resultat es la estructura que es veu a la següent imatge forma per punts i línies. Al programa es obligatori definir punts als extrems de cada línia, ja que d'altre manera no podrà calcular res a falta de punts per la creació dels nodes del mallat.

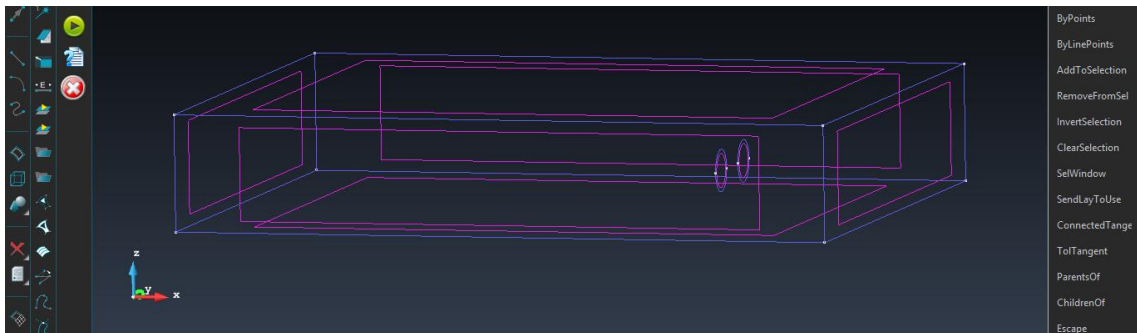


Il·lustració 9. Model amb contorns exteriors i interiors.

Seguidament es va haver de crear totes les superfícies que ha de tenir el model per representar les parets que delimitaran el fluid del projecte. Es va utilitzar **Geometry – Create – NurbSurfaces** i es van escollir les línies que han de formar la superfície. Altra forma de crear superfícies es escollir directament l'opció de la barra de la dreta  .


Per fer totes les superfícies necessàries es va haver de crear una per una, ja que si es seleccionen més línies de les que posseeix una superfície, el programa no llegeix bé l'orde i no genera cap superfície.

El resultat final obtingut es:



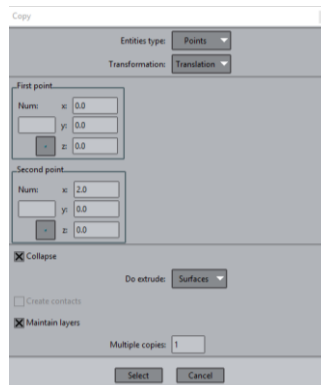
Il·lustració 10. Superfícies inicials.

Com es pot apreciar les hèlixs, tot i tenir la superfície que els hi correspon, estan posades en una posició lliure i no formen part de la estructura. Com s'ha dit anteriorment, per a que el programa generi bé el nodes del mallat del fluid i la estructura, no ha d'haver-hi cap tipus d'element deixat sol en mig del fluid i per tant el model amb les hèlixs han de ser una sola estructura.

Per tal d'aconseguir-ho es proposa simular l'entrada de flux de les hèlixs a través d'una canonada i es fa servir la opció de **Copy/transform**. 

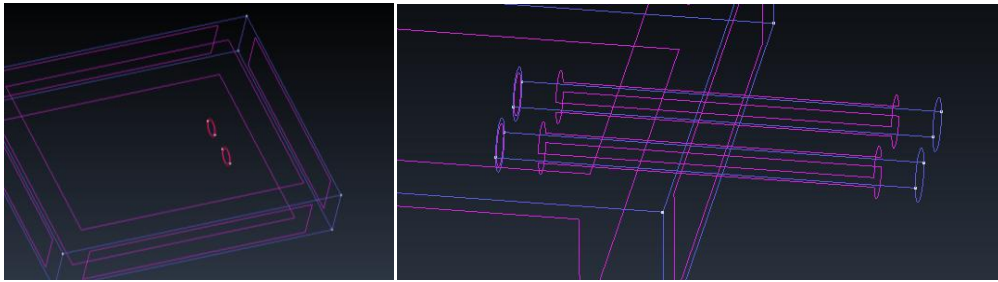
Amb aquesta eina es poden realitzar diferent tipus d'accions com pot ser copiar, traslladar, rotacions, escalats, etc.

Per aquest cas es realitza una **Transformations – Traslations**, designant les línies de la superfície circular com a entitat a traslladar i que també realitzi la opció d'extrudir les línies a superfícies. Apart de seleccionar les entitats es determina el desplaçament que ha de realitzar i l'eix on es vol que es produeixi, en aquest cas en l'eix X amb un desplaçament de 2 m.



Il·lustració 11. Finestra d'opció copiar/transformar.

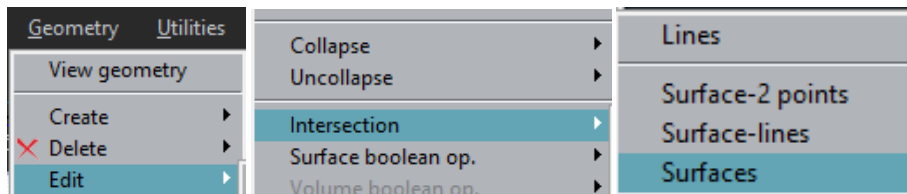
Es seleccionen les línies a modificar i es genera la nova estructura desitjada:



Il·lustració 12. Selecció de superfície. Resultat d'extrusió.

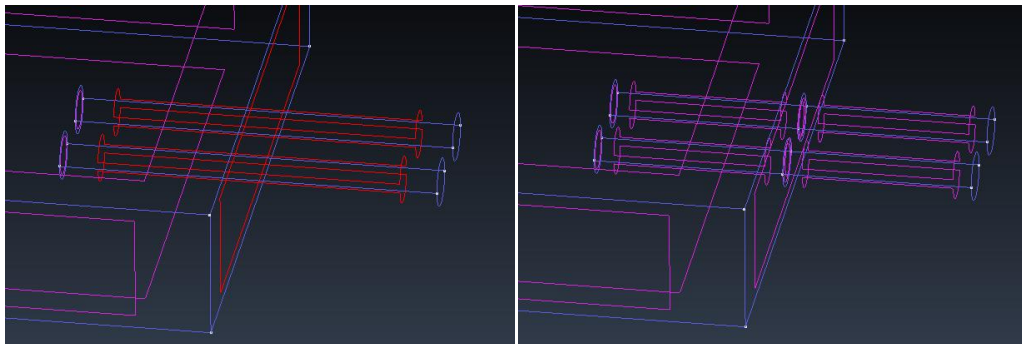
Com es pot veure la geometria creada sobrepassa la superfície de una de les parets creades prèviament, tot i això no estan formant una sola estructura com es vol.

Per tan es farà servir la opció de **Geometry – Edit – Intersections – Surfaces**, la qual realitzarà un tall on les dues superfícies entren en contacte.



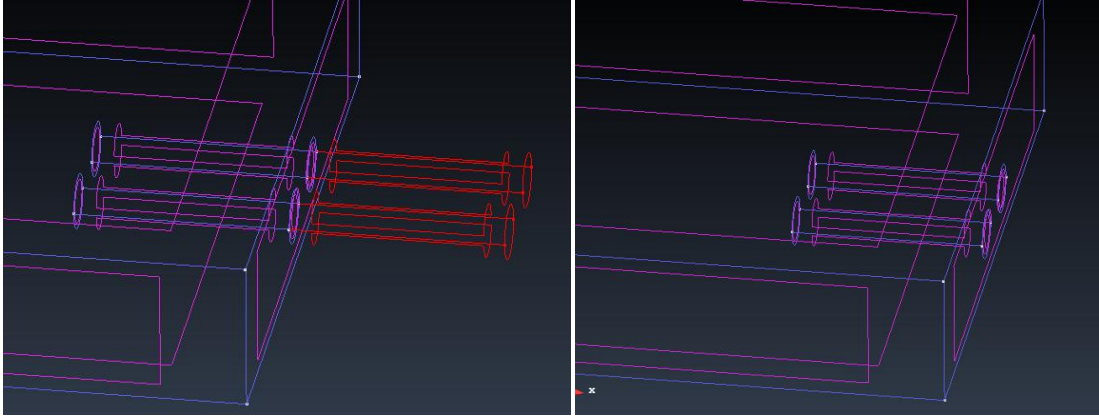
Il·lustració 13. Comanda de intersecció per dos Superfícies.

Es seleccionen les superfícies corresponents i es realitza el tall. D'aquesta manera les es generà dues superfícies cilíndriques que correspondran a les hèlixs, formin part de la estructura total i no afecten de manera important al fluid.



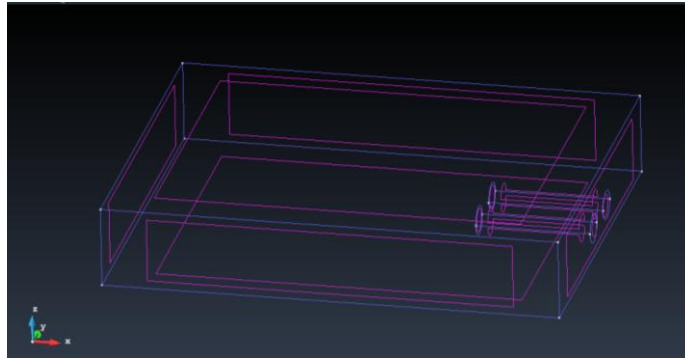
Il·lustració 14. Selecció de superfície. Resultat de la divisió de superfícies per la intersecció.

Com es té més superfícies, línies i punts dels que es necessiten pel càlcul, s'opta per eliminar i deixar només les entitats essencials




Il·lustració 15. Selecció de superfície. Resultat del eliminació d'entitats.

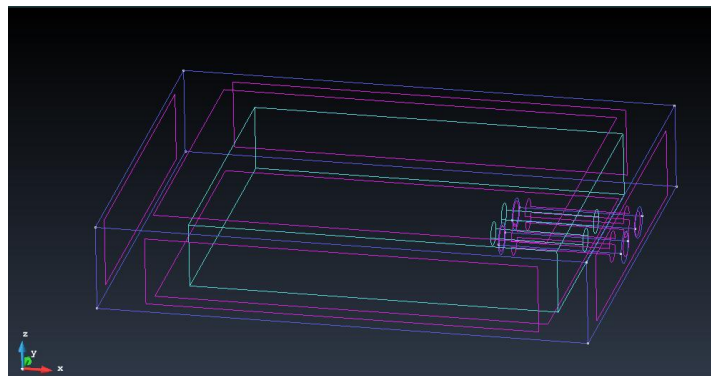
Amb aquestes superfícies creades es poden les condicions de contorn de les parets, el Inlet d'entrada del fluid i el Outlet que expulsarà el fluid sobrant.



Il·lustració 16. Model amb superfícies finals.

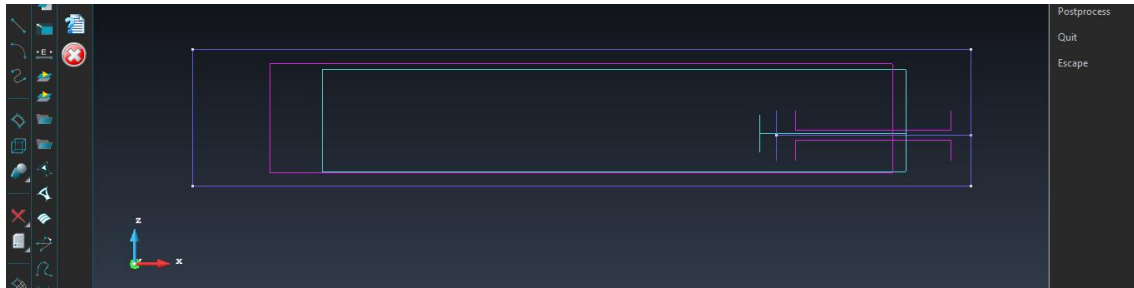
Per finalitzar la part del disseny de la estructura, es crea una entitat de Volum per poder establir el fluid en programa. Per tant es fa servir el comandament **Geometry – Create – Volume** o es selecciona aquesta mateixa opció de la barra d'eines. 

Es marquen totes les superfícies creades prèviament i s'obté el volum següent, que serveix per crear el mallat del fluid.

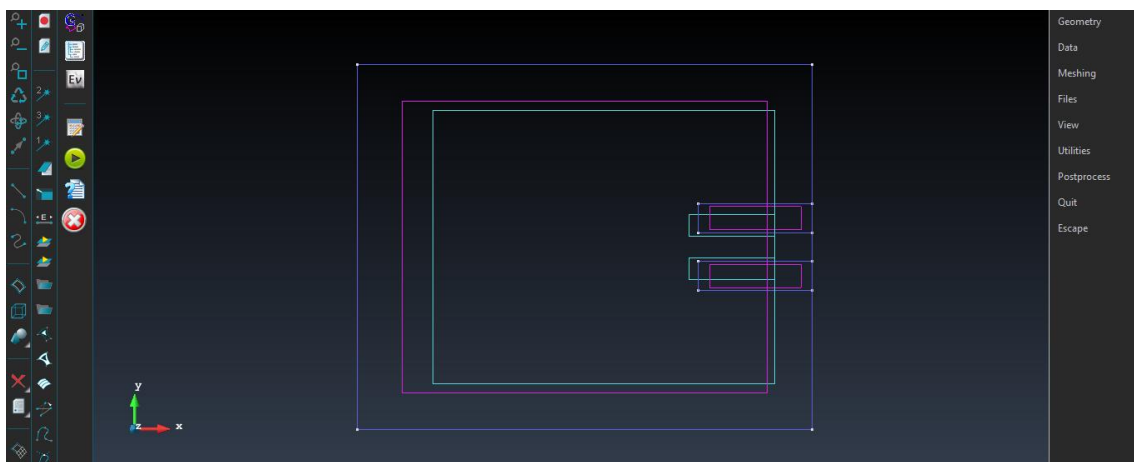


Il·lustració 17. Model amb volum.

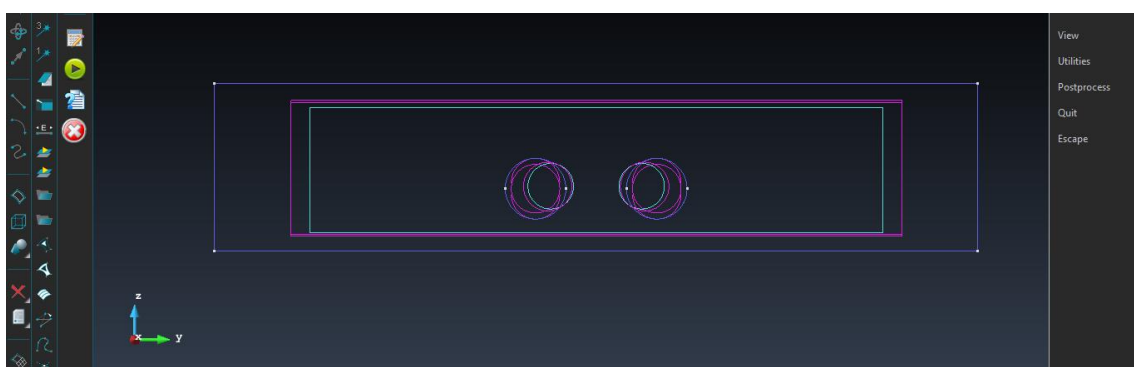
Les vistes de la geometria final es veuen a continuació.



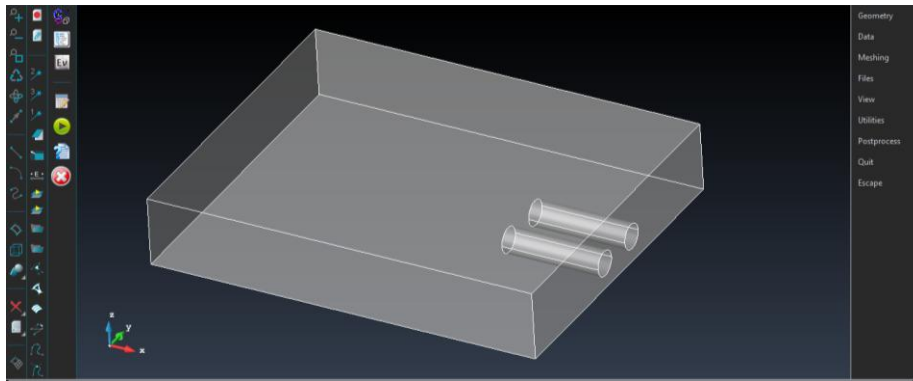
Il·lustració 18. Vista del perfil del model.



Il·lustració 19. Vista de la planta del model.




Il·lustració 20. Vista del alçat del model.

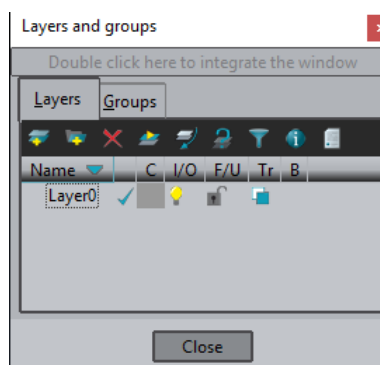


Il·lustració 21. Vista isomètrica del model.

Per poder definir les característiques de cada entitat, primer s'ha de crear diferents grups de poder seleccionar-los en les opcions posteriors.

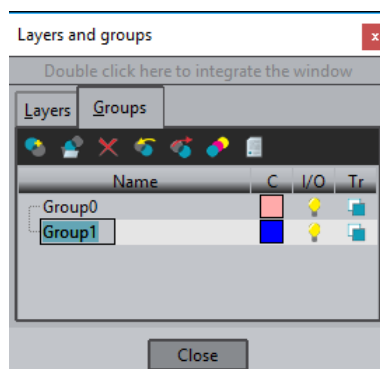
Aquesta tasca es realitza amb l'opció de **Layers**. 

En aquesta opció es pot escollir per crear diferents capes de geometries, però per aquest cas no es necessari crear més de la capa actual.



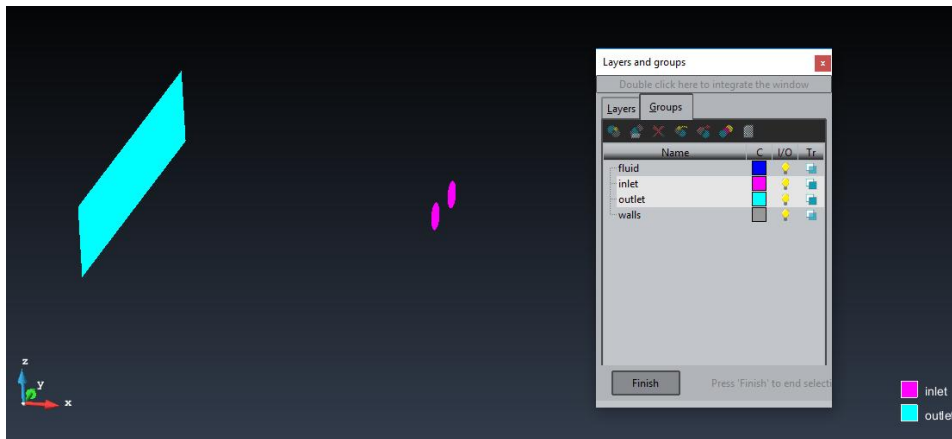
Il·lustració 22. Finestra de Capes i grups.

En aquest cas es fa servir el comandament **Create New Groups** i seguidament **Assigning Entities to Group**. Per les **entities** es poden escollir diferents tipus d'entitats com punts, línies, superfícies, volums o totes aquestes juntes en un mateix grup.

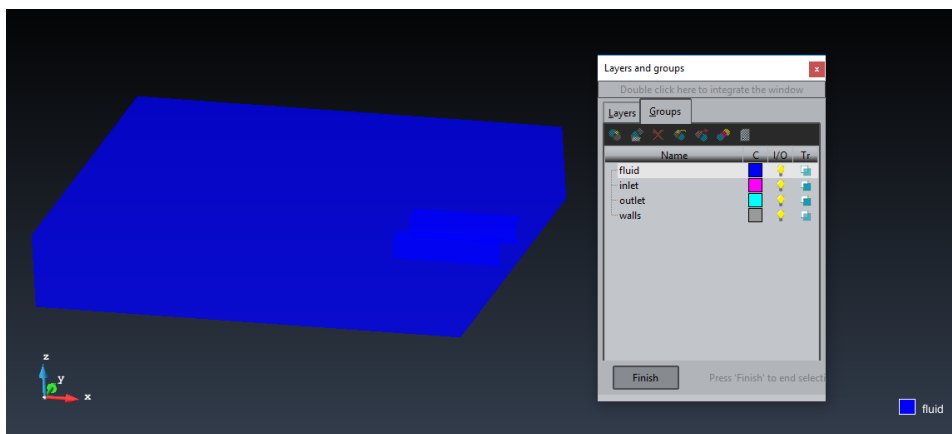


Il·lustració 23. Creació de grups.

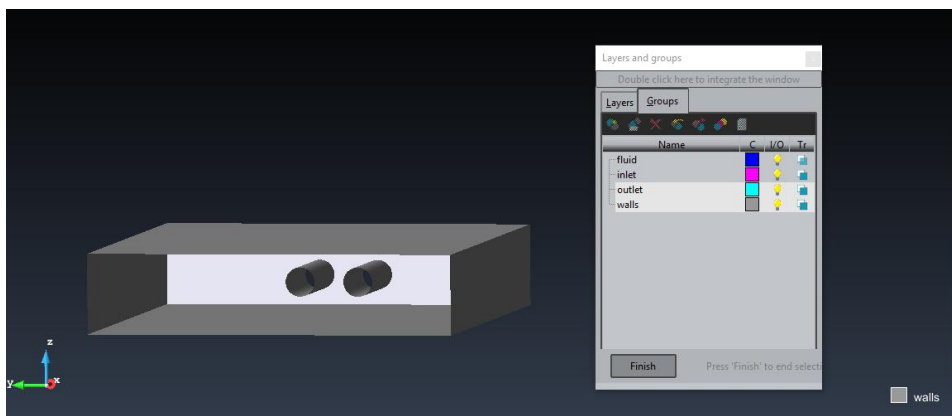
Com a resultat s'obté el llistat amb els grups que es veuen a continuació:



Il·lustració 24. Representació gràfica d'entitats Inlet i Outlet.



Il·lustració 25. Representació gràfica d'entitat Fluid.

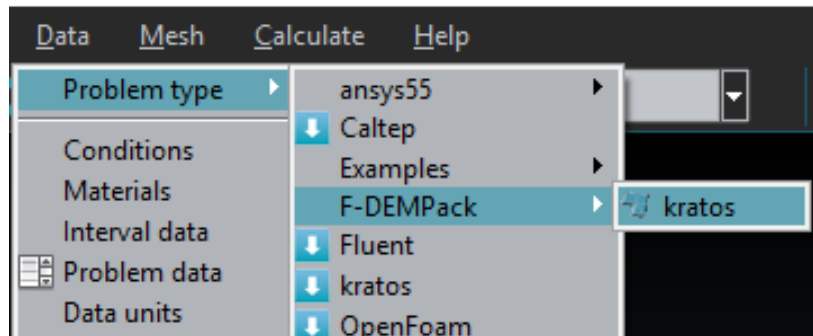


Il·lustració 26. Representació gràfica d'entitat Walls

4.3.2 Problem Type

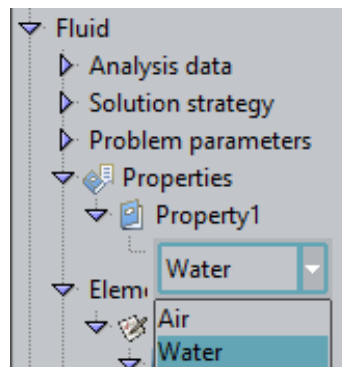
Un cop acabat el apartat de la creació de la geometria del model amb els grups assignats, la part del procés, es passa a donar-li les propietats corresponents fent servir el **Problem Type** corresponent per aquest anàlisi.

Per seleccionar el **Problem Type** correcte s'usa l'opció **Data – Problem Type – F-DEMPack – Kratos**.



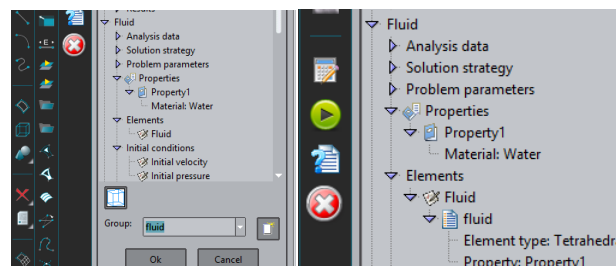
Il·lustració 27. Problem Type F-DEMPack.

En l'apartat de **Fluid**, primer es seleccionen les propietats que es vol al subapartat **Property**, per aquest cas es selecciona aigua. Es poden crear més d'una sola propietat pel fluid per treballar amb més d'un sol medi, com en el cas de treballar amb aigua i aire o crear altres propietats de fluids com el oli.



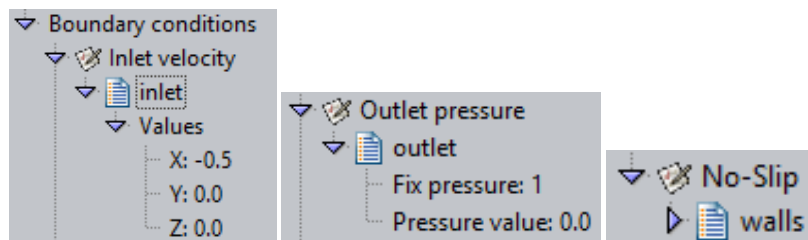
Il·lustració 28. Selecció de propietats.

Després es passa a seleccionar el grups creats prèviament als subapartats corresponents. En **Elements** es selecciona el grup de Fluid i també es definirà el tipus d'element (Tetrahedre) pel mallat i la propietat que té (aigua).



Il·lustració 29. Assignació d'entitats i propietats.

Finalment s'assignen els grups restants al subapartat de **Boundary Conditions**. A **Inlet Velocity** es selecciona el grup **Inlet** i se li dóna la velocitat establerta pel assaig de 0,5 m/s en la direcció corresponent, en aquest cas el sentit contrari al eix X. A **Outlet Pressure** s'assigna el grup **Outlet** amb mòdul de pressió 0, per que aquesta sortida només actuï quan aparegui pressió causada pel medi i equilibri el sistema amb pressió nul·la. A **No-Slip** s'escull el grup **Wall**, aquesta opció determina que totes les entitats dintre del grup generaran força de fricció amb el contacte del fluid.



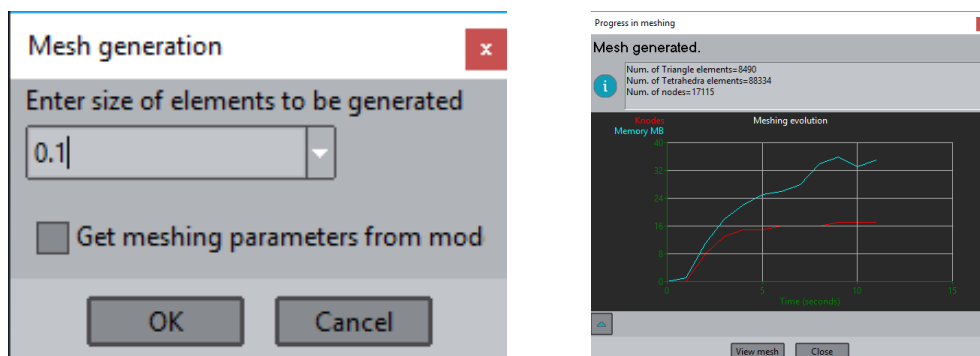
Il·lustració 30. Selecció d'entitats per Boundary Conditions, Outlet Pressure i No-Slip.

Com que no es té cap tipus de forces externes o moviment inicial del fluid, com podria ser per simular un riu que es trobaria en moviment des de inici de la simulació, no s'assigna cap valor al subapartat **Initial Conditions**.

4.3.3 Mallat

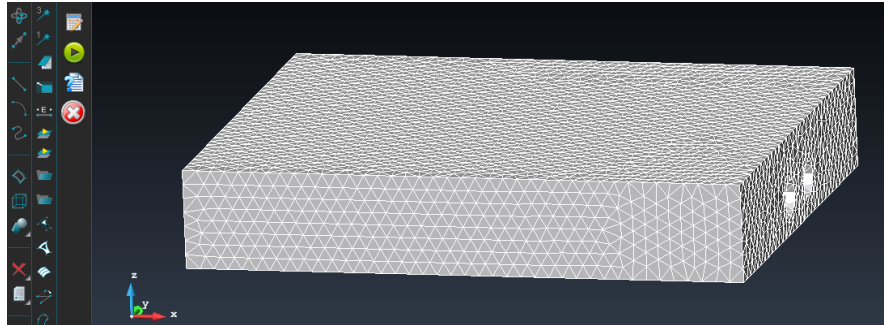
Per a realitzar l'anàlisi, l'estructura feta ha de tenir un mallat determinat, per tant s'ha de generar una malla adequada i amb un mida d'elements prou petita per obtenir uns resultats acceptables, però no massa ja que el temps necessari pel càlcul seria molt elevat o el programa directament passaria a tancar al no tenir la capacitat suficient per realitzar la tasca demanada.

S'utilitza l'opció **Generate – Mesh** i s'obre la finestra que permet determinar la grandària dels elements que es generaran. El programa et genera una mida per defecte que va ser inicialment 0,3 m. Es van realitzar diferents mallats per provar quina era la optima en relació temps de calcul – nombre d'elements i s'estableix una mida de 0,1 m.



Il·lustració 31. Assignació de la mida dels elements. Generació de malla.

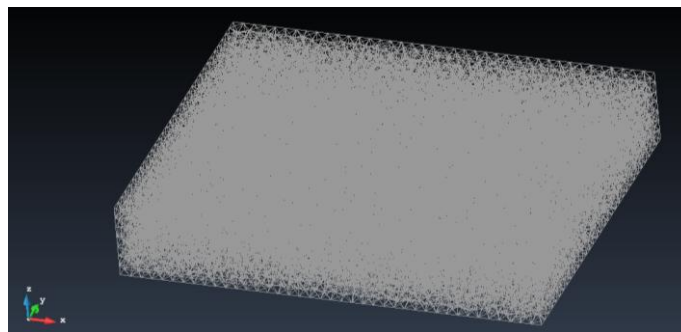
Un cop el programa ha terminat de generar el mallat de tota el model es presenta la següent imatge:



Il·lustració 32. Malla resultant de les parets.

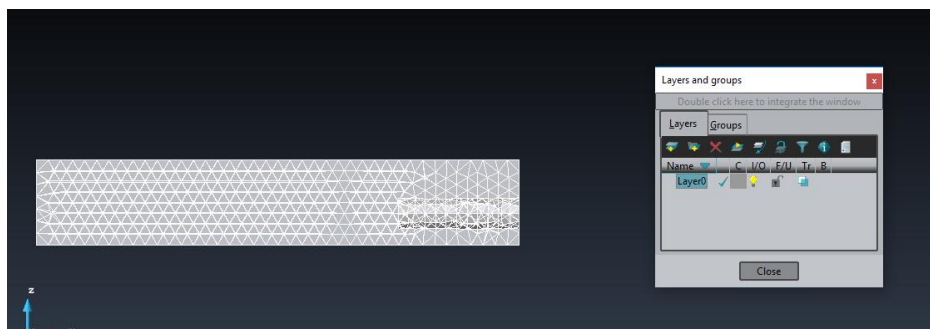
La geometria que s'observa correspon al mallat crear pel grup de superfícies que es tenen com las del les parets (**Walls**), la entrada (**Inlet**) i la sortida del fluid (**Outlet**), las quals estan formades per triangles i unides per nodes.

Es canvia el tipus de visió i s'observa el mallat interior realitzar pels volums existents, en aquest cas només pel grup **Fluid**, que correspon al aigua del interior. Aquesta a diferencia d'anterior esta formada per tetraedres que s'ajunten per nodes.

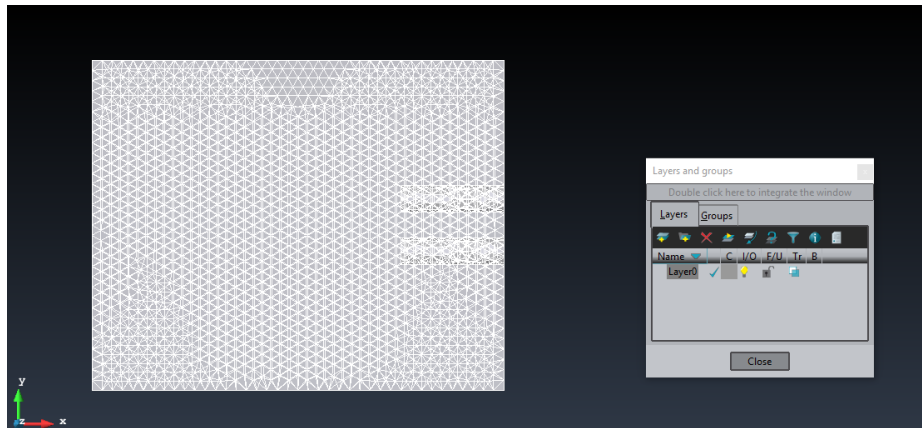


Il·lustració 33. Malla resultant del fluid.

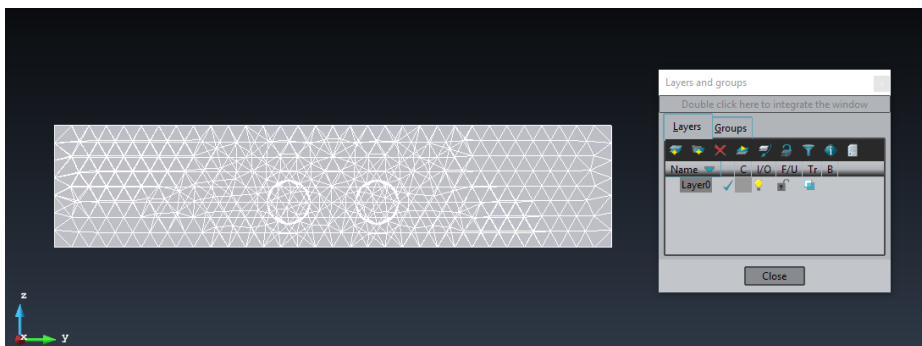
Degut al fet que la geometria que es té no es del tot simple, ja que inclou parts amb circumferències o formes cilíndriques, no s'obté una distribució homogènia en tot el mallat i el programa ordena els elements generats de la forma més adequada possible com es veu a les imatges següents.



Il·lustració 34. Vista del perfil de la malla.

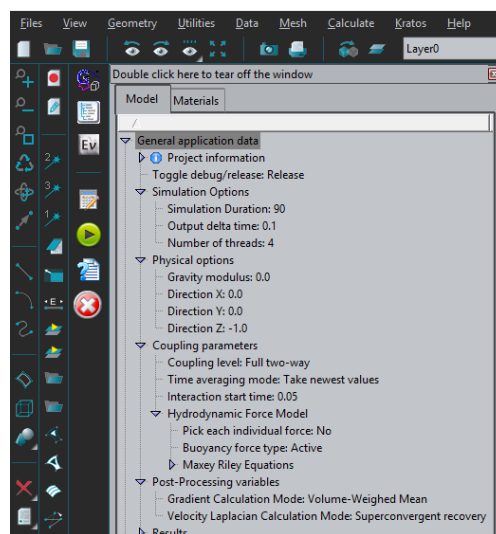


Il·lustració 35. Vista de la planta de la malla.



Il·lustració 36. Vista del alçat de la malla.

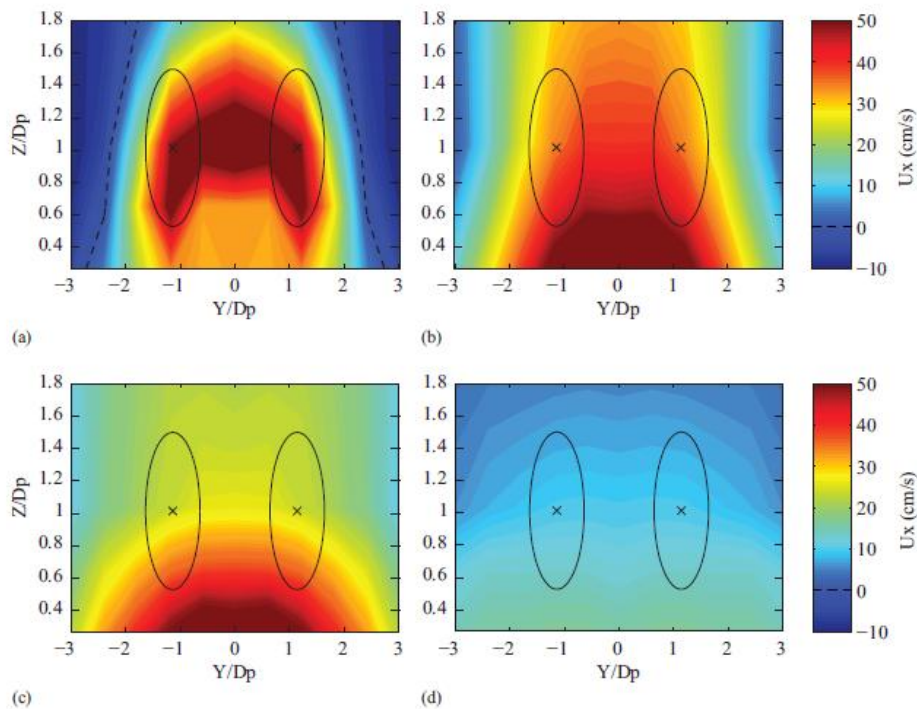
Amb el mallat establert, per realitzar l'anàlisi es comproven els paràmetres que es tenen són els correctes o si han de ser modificats per tenir millor rendiment. De totes les opcions que apareixen a l'apartat de **General Application Data**, els únics subapartats a modificar són **Simulation Options** i **Physical Options**.




Il·lustració 37. Barra de les opcions generals.

Capítol 5: Pre-procés. Resultats

Per poder validar el que el model hidrodinàmic es comporta d'una manera correcta es compara els resultats amb els que es tenen de l'assaig al canal.



Il·lustració 39. Visualització de la velocitat axial per a plans paral·lels al pla que conté els propulsors: a) $X = 2,5D_p$, b) $X = 5D_p$, c) $X = 7,5D_p$ i d) $X = 15D_p$. Mujal-Colilles et al (2017).

Per poder visualitzar tots els resultats del càlcul s'ha de passar al post-procés del programa fent servir la opció **Postprocess** o amb la icona corresponent. 

En un inici no es podrà accedir a cap resultat, ja que no està carregat cap tipus de model. Per tant es carrega l'arxiu de resultat **.lst** del nostre model i es podran veure els resultats les reaccions, velocitats, pressió, etc. Es poden visualitzar mitjançant **Contour Fills**, que marcarà amb capes de colors als valors que s'estableixin de resultats per la estructura; o amb **Displayer Vectors**, que crearà vectors dels resultats establerts.



II-lustració 40. Finestra de opcions de visualització de resultats policromatic o vectors.

Els resultats en què es centra aquest apartat son els de velocitat del flux en determinades seccions. S'estableix les seccions següents:

- Per anàlisis de velocitat es creen les seccions:

Pla ZX per a $Y = 0$ m.

Pla ZX per a $Y = 0,254$ m.

Pla YZ per a $X = 2,746$ m.

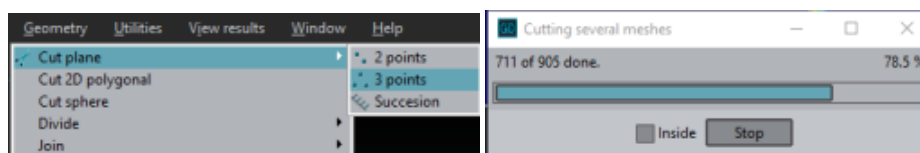
Pla YZ per a $X = 2,492$ m.

Pla YZ per a $X = 1,984$ m.

- Per anàlisis de reaccions es crea la secció:

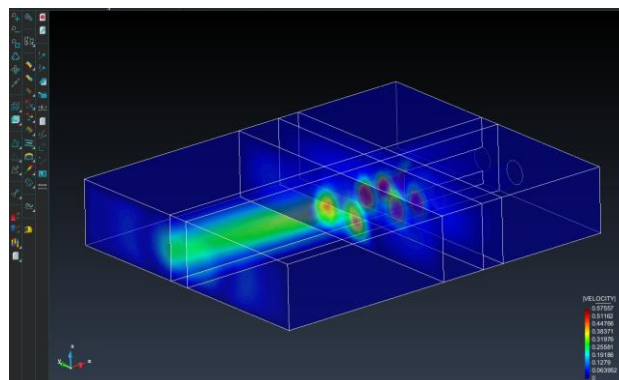
Pla XY per $Z = 0$ m.

Per tenir els diferents plans, es selecciona l'opció de **Geometry – Cut Plane – 3 Points** o **Geometry – Cut Plane – 2 Points**. S'introdueixen les coordenades necessàries per definir el pla de tall de cada secció i es generen els diferents plans.



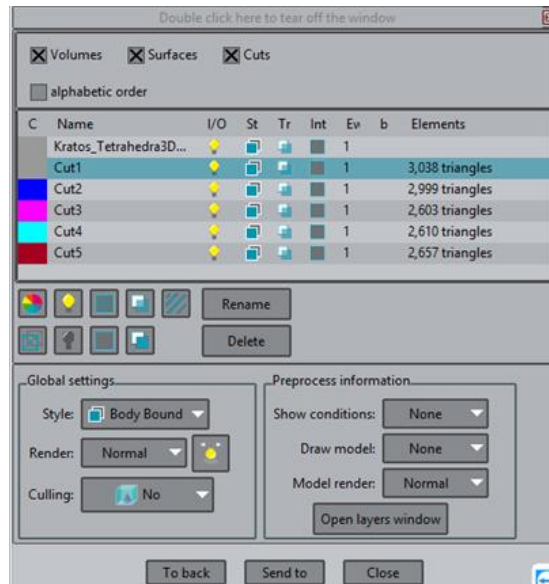
II-lustració 41. Comanda de tall de plans. Procés de tall dels nodes.

S'obté el resultat que es veu a continuació:



II-lustració 42. Model amb els plans de resultats.

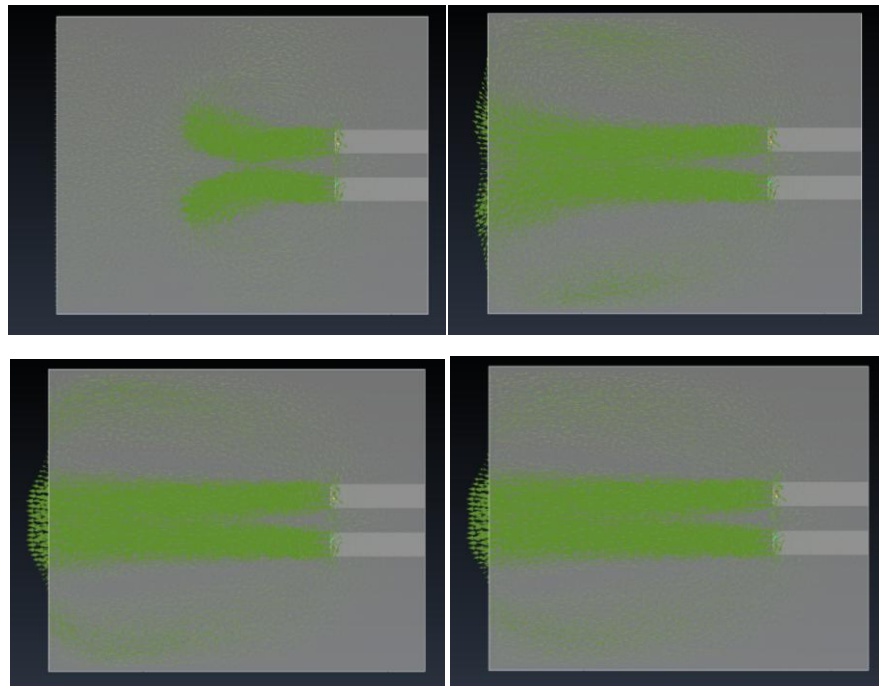
En la finestra de **View Styles**, opció que permet modificar la visualització dels nodes i les vistes del model, es pot trobar el grups creats pels diferents plans. Permetent ocultar els plans del model per llegir correctament els resultats.



Il·lustració 43. Finestra dels grups dels plans creats.

Es realitza una primera prova per comprovar l'evolució del model fins arribar a un punt de resultats estacionaris.

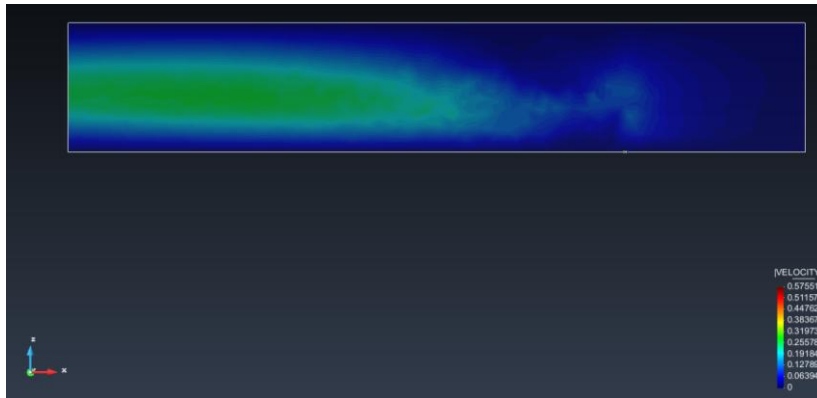
S'observa com a partir del segon 45 el comportament del fluid no varia i per tant es troba en un punt estacionari, les imatges següents mostren el flux del fluid en els temps 10, 30, 45, 90 segons.



Il·lustració 44. Resultat gràfic de la evolució de la velocitat del fluid en intervals de 22 segons.

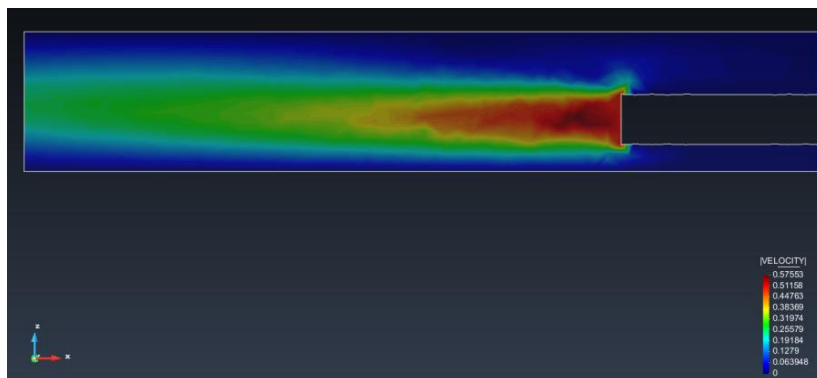
Es comprova que a partir de la tercera imatge el flux no varia, per tan es poden analitzar aquest resultats.

- Resultats del Pla ZX per a $Y = 0$ m.



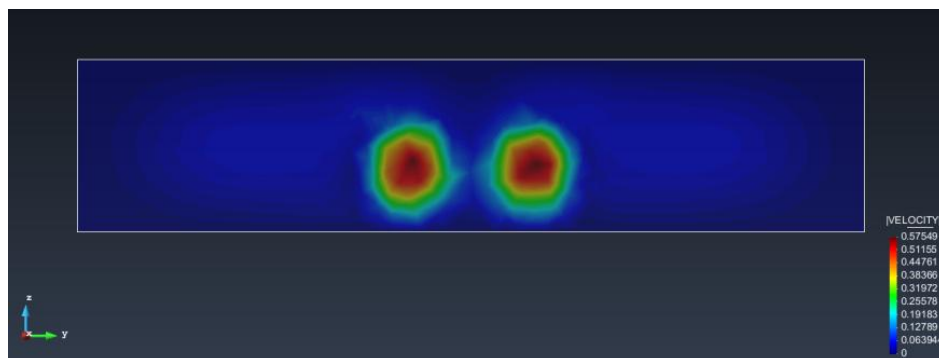
Il·lustració 45. Resultats de velocitat del flux Pla ZX.

- Resultats del Pla ZX per a $Y = 0,254$ m.



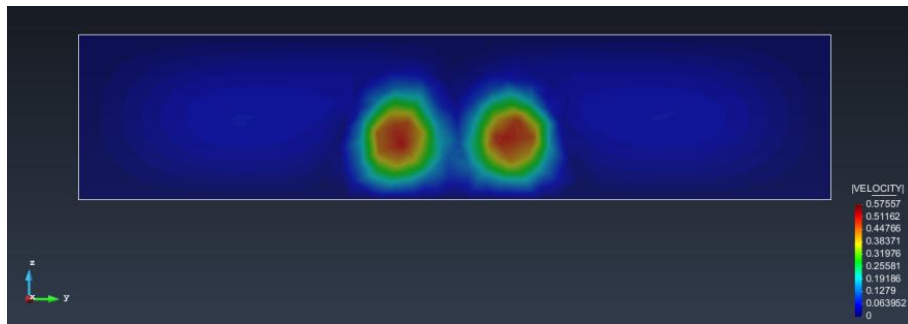
Il·lustració 46. Resultats de velocitat del flux Pla ZX.

- Resultats del Pla YZ per a $X = 2,746$ m. Correspon a una distancia de $1D_p$ allunyat de les hèlixs.



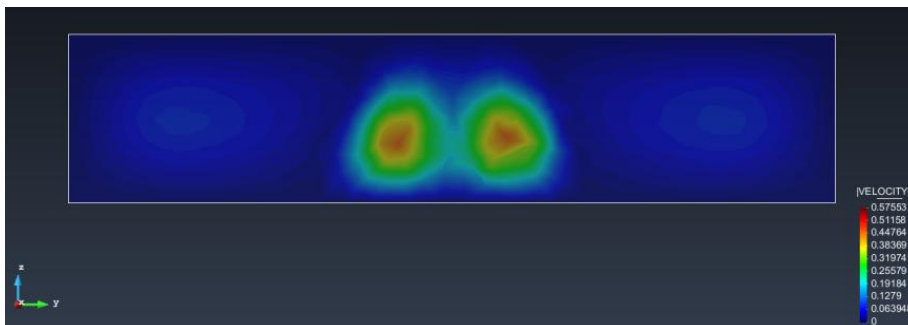
Il·lustració 47. Resultats de velocitat del flux Pla YZ.

- Resultats del Pla YZ per a $X = 2,492$ m. Correspon a una distància de $2D_p$ allunyat de les hèlixs.



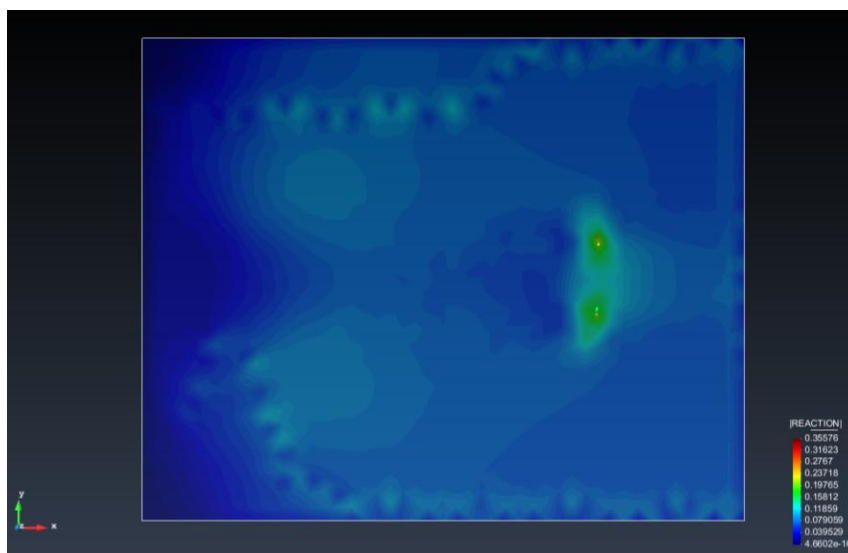
Il·lustració 48. Resultats de velocitat del flux Pla YZ.

- Resultats del Pla YZ per a $X = 1,984$ m. Correspon a una distància de $2D_p$ allunyat de les hèlixs.



Il·lustració 49. Resultats de velocitat del flux Pla YZ.

- Resultats del Pla XY per $Z = 0$ m.



Il·lustració 50. Resultats de reaccions del model al pla XY.

Dels resultats obtinguts es pot veure que a la posició del pla ZX a $Y = 0$ m, les velocitats a la que s'arriben son de 32 cm/s, ja que la distancia entre les hèlixs és grans la velocitat establida de 50 cm/s baixa, mentre que en el pla ZX la velocitat pic a la que arriba es del ordre de 57 cm/s, pujant respecte a la imposada en el model.

Una de les diferències del model real i de la simulació es veu en el pla ZX a $Y = 0$ m que a la part inicial de la posició de les hèlixs la velocitat es nul·la, mentre que a l'assaig del canal es mostren velocitats de pics molt més grans que els 57 cm/s, això es produït per la rotació de les hèlix que giren en sentits oposats en aquest punt i com en el nostre model no intervé cap tipus de rotació en aquest punt apareixen velocitats diferents. Tot i això aquest resultats són acceptables dins del comportament del flux, ja que el que es vol simular és l'efecte que tenen sobre la superfície del fons del model.

En les següents imatges dels plans YZ per a $X = 1Dp$, $2Dp$ i $4Dp$ de distancia a la posició de les hèlixs, s'observa com amb el pas de la distancia, tot i estar en un punt estacionari, les velocitats es redueixen de forma lineal com s'observa al gràfic de velocitats del assaig del canal. Per tan el comportament evolutiu es comporta correctament i de manera molt similar al mesurat en el canal.

Finalment les imatges del pla de XY per $Z = 0$ m corresponen als resultats de reaccions que pateix el fons del model, es pot apreciar que es genera unes reaccions constants en zones properes a on entra en contacte amb el flux resultant, just a la zona on es produeixen els fenòmens d'erosió. Les magnituds resultants d'aquest cas son de l'ordre de 0,2 N aplicada.

Comparant el resultats obtinguts amb els resultats de la imatge que es presenta a l'inici d'aquest apartat, es pot comprovar que el comportament del fluid actua de forma molt diferent, això es degut principalment al fet que el nostre model no presenta cap tipus de rotació d'hèlix. Tot i tenir una morfologia diferent, ja que els nostres propulsors injecten fluid en un sol eix, pel al objectiu establert es considera que el model es comporta de forma correcte dintre del paràmetres establerts i les simplificacions fetes.

Capítol 6: Conclusions

A l'inici del treball es va plantejar un seguit d'objectius a complir. També es van haver de modificar objectius o les tasques a realitzar, degut als problemes que es van presentar o a que es va comprovar que existien tasques que no eren necessàries pel treball.

L'objectiu general principal s'ha assolit parcialment però, a la vegada, satisfactòriament ja que, tot i que no s'ha pogut reproduir l'efecte de les hèlixs al sediment, s'ha obert la porta a la reproducció mitjançant modelat numèric del problema de l'efecte erosiu dels propulsors de popa. La part de modelat del sediment es va completar correctament, però el càlcul posterior dels resultats no era viable, ja que la quantitat d'elements necessàries per tenir valors resultants acceptables era massa gran per poder calcular-los amb l'equip disponible, incloent equips amb gran capacitat de càlcul que es va facilitar.

També es van realitzar diferents mètodes d'optimització, fora del programa per intentar que fes els càlculs, però es va trobar que seguia sent inviable la possibilitat de continuar amb aquest model.

En el primer objectiu específic es va plantejar aprendre a fer servir el programa. Podem concloure que ha estat complert satisfactòriament amb l'ajuda dels tutorials, manuals que es faciliten pel programa i les pàgines web del CIMNE, i amb la ajuda del professor Salvador de la Torre que va estar obert a consultes i dubtes en tot moment.

El segon objectiu específic que es centrava en realitzar un modelat correcte, pel model hidrodinàmic, es va completar després de realitzar moltes proves millorant sobretot la definició de la geometria per que el programa pogués entendre bé la estructura i els resultats fossin acceptables. El principal problema d'aquest model requeria en que la simplicitat del model, on només actua i s'analitza el fluid, generava problemes al programa, ja que hi han paràmetres o opcions que en aquest cas al no ser necessàries no es defineixen i al calcular donava problemes o l' hora de mallar.

El tercer objectiu específic, que consistia en comprovar i validar els resultats dels assajos pel model hidrodinàmic amb les velocitats del flux es va completar satisfactòriament. Aquesta comprovació, a part dels resultats de l'assaig, va ser possibles també gràcies als coneixements i l'experiència adquirida de treballar amb programes de càlcul estructural que es van superar en la carrera.

Malgrat la situació del treball amb el model de DEM elements s'han trobat possibilitats futures per tal d'aconseguir una simulació correcta amb bons resultats, ja que es va parlar que les següents versions del programa disposen de configuracions que milloren bastants aspectes que ara mateix no disposa i que s'està treballant per continuar millorant diferents aspectes per millorar el programa per a treballs com el que s'ha realitzat.

Bibliografia

Treball consultats

Burrel-Díez, S., *Aplicación de los elementos discretos a la simulación del problema de desgaste*. (2011). Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.

Mellado-Cruz, J., *Aplicación del método de los elementos discretos a problemas de desgaste*. (2011). Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.

Rubi-Massanet, C., *Realització de un tutorial para el cálculo matricial de estructuras navales*. (2011). Universitat Politècnica de Catalunya. Facultat Nàutica de Barcelona.

Santասusana-Isach, M., *Continuum modelling using the Discrete Element Method. Theory and implementation in an object-oriented software platform*. (2012.) Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.

Santասusana-Isach, M., *Kratos DEM, a Parallel Code for Concrete Testing Simulations using the Discrete Element Method*. (2013). Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.

Maymó-Molina, A., *Estudio, desarrollo de interfase con el usuario y validación de software de simulación numérica por el método de los elementos discretos (DEM) en problemas con materiales granulare*. (2010). Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.

Articles

Mujal-Colilles, A., Gironella, X., Jaquet, A., Gomez-Gesteira, R., & Sanchez-Arcilla, A. (2015). Study of the efflux velocity induced by two propellers. In *SCACR, Conference on Applied Coastal Research*. Florence. In press.

Mujal-Colilles, A., Gironella, X., Sanchez-Arcilla, A., Puig Polo, C., & Garcia-Leon, M. (2016): Erosion caused by propeller jets in a low energy harbour basin. *Journal of Hydraulic Research*.

Pàgines web

Informacion del DEMpack

- <http://www.cimne.com/vpage/2/1117/Introduction>

Tutorials del DEMpack

- <http://kratos-wiki.cimne.upc.edu/index.php?title=Special%3ASearch&search=DEMPack+tutorial&go=Go>
- <https://github.com/KratosMultiphysics/Kratos/wiki>

Pàgina de manuals de GiD

- <https://www.gidhome.com/gid-convention/gid-conventions-archive/gid-convention-courses/>

Informació de DEM

- https://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_element_method
- <https://www.icevirtuallibrary.com/author/Cundall%2C+P+A>
- <https://www.icevirtuallibrary.com/author/Strack%2C+O+D+L>

Apunts consultats

- Càlcul Numèric d'Estructures Navals
- Estructures aplicades a la enginyeria naval
- Propulsors
- Mecànica de fluids

Annex 1.

A1.1 Tutorial introductor del GiD

A continuació es realitzen les explicacions de conceptes que s'han après dels manuals sobre el programa GiD.

A1.1.1 Geometria

La geometria de GiD està organitzada seguint un esquema jeràrquic de Volum, Superfícies, Línies o Corbes i punts. El la posició mes inferior es troba baix de tot els punts i per sobre d'aquests estan les línies, que sempre han de tenir un punt en cada extrem. Hi ha programes que no necessàriament han de tenir punts al final de les línies, com es el cas dels CAD. En un CAD normalment l'objectiu és la visualització del model, en canvi, en GiD es aconseguir la simulació. Per sobre de les corbes es troben les superfícies, i per últim els volums.

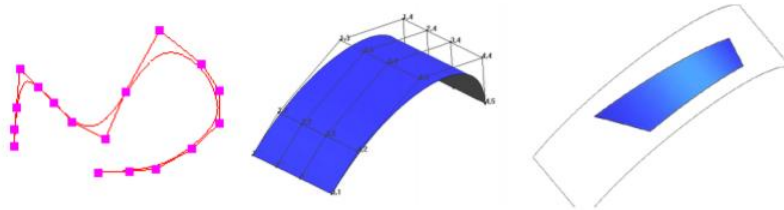
El contorn exterior d'una superfície ha d'estar format per un conjunt tancat de línies. A més, poden existir contorns interiors com podrien ser forats.

Una entitat va lligada a les entitats té per sota, les que la conformen, per aquest motiu GiD no permet esborrar cap línia mentre existeixi alguna superfície que la tingui per contorn. Cada entitat emmagatzema el número d'entitats d'ordre superior a aquesta, prenent el nom de "higherentities" i es pot veure quan es llista una entitat. És a dir, un objecte no pot ser eliminat fins que el seu valor de "higherentities" sigui nul.

A1.1.2 Entitats geomètriques

Les entitats geomètriques de que disposa GiD són les següents:

- Punts
- Corbes
- Segments rectes
- Arcs de circumferència
- Polilínies
- Superfícies
- Planes
- Cons
- Superfície – malla (la forma de la superfície ve descrita per una malla de triangles subjacents)
- Volums (descrits per les superfícies orientades del seu contorn)



Il·lustració 51. Exemple de corba, superfície i superfície retallada.

A1.1.3 Materials

El concepte de GiD material està relacionat amb el concepte físic del material que compona un objecte dissenyat.

Una entitat només pot tenir com a màxim un tipus material associat, a diferència de les condicions. Els materials poden ser assignats a línies, superfícies, volums o directament als elements de la malla. Fins que no es carrega un “problem type” no hi ha disponible cap material per a ser aplicat.

Per exemple, en el cas d'un càlcul elàstic lineal es requereixen camps pel mòdul elàstic, coeficient de Poisson i la densitat, mentre que per un càlcul tèrmic aquests camps no tenen sentit i es requereix la conductivitat tèrmica del material. També es pot crear un nou material derivat d'un altre, del qual en rep els camps als que se li pot donar nous valors.

A1.1.4 Condicions

En el concepte de condició es pot considerar qualsevol dada que tingui que ser associada a les entitats, per exemple, condicions de contorn, forces, etc. Una condició pot ser assignada diverses vegades a una mateixa entitat. En certs problemes no s'utilitzen els materials propis de que disposa GiD i s'implementen mitjançant condicions, amb les avantatges i desavantatges que comporta pel resultat.

Una condició pot ser visualitzada amb un símbol associat. Per exemple, si es considera una secció d'una biga com una condició, es podrà dibuixar de manera orientada. Internament múltiples entitats apunten a un mateix material, per tant, si es canvia el valor d'una propietat del material no és necessari tornar a generar la malla. Per contra, si es vol realitzar una modificació d'algun valor les condicions que estan assignades a entitats s'ha de tornar a assignar la condició i tornar a generar la malla.

Una condició només pot ser assignada al tipus d'entitat que es seleccioni en el moment de que es defineix: punts, línies, superfícies, volums, nodes, elements o capes. El terme de "capa" no és en realitat una entitat geomètrica, però es pot utilitzar per aplicar una condició a totes les entitats que estiguin dintre d'aquesta capa.

A1.1.5 Dades generals

Les dades generals "problema data" es fan servir per a poder guardar la informació que no està relacionada amb les entitats geomètriques, tractant-se de dades comunes al llarg de tot el problema. Com a exemples es tindrien el valor de la constant de gravetat, el tipus de "solver" amb el que es resolen les equacions, etc.

A1.1.6 Intervals

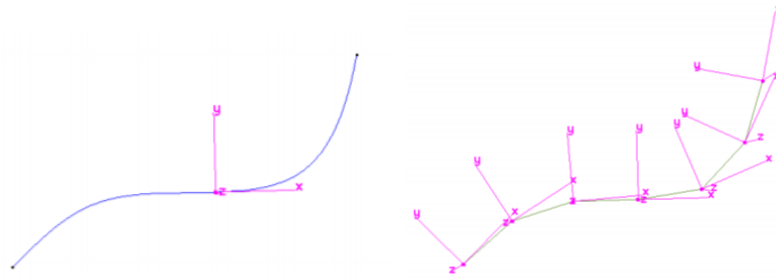
El concepte d'interval és útil per a poder separar diferents blocs de condicions, on cada interval té el seu propi conjunt de condicions i de dades generals. Els intervals serveixen per a definir casos de càrrega diferents en cada pas del temps en problemes dinàmics, separar diverses hipòtesis de càrrega, etc.

Només es dibuixen en pantalla les condicions assignades al interval que es troba en ús. Tot i que es poden crear nous intervals durant els temps d'execució si es vol.

A1.1.7 Eixos Locals

Per a poder descriure algunes propietats de materials, càrregues, entre d'altres coses, es pot requerir la necessitat de definir uns eixos de coordenades locals diferents dels eixos XYZ globals. Es pot definir de forma manual els seus propis eixos per, posteriorment, referenciar-los en algun camp d'una dada concreta.

Les entitats de la corba i la superfície tenen uns eixos locals naturals associats a la seva tangent i a la seva normal que es poden utilitzar sense distinció, eixos locals automàtics.



Il·lustració 52. Eixos locals de la corba. Eixos locals transferits als elements de la malla.

A1.2 Modelació Geomètrica

Es realitza un seguit de cassos senzills per tal d'aclarir els conceptes esmentats als manuals juntament amb explicacions que ja fetes .

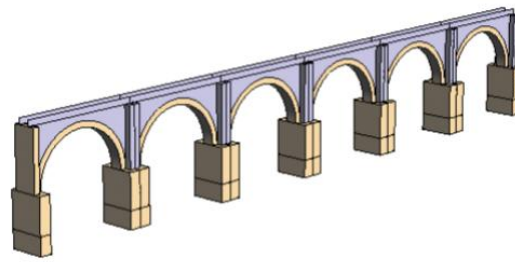
A continuació es descriu algunes de les eines bàsiques del pre-process de GiD per a la creació o modificació de la geometria d'un model. Es poden consultar totes les instruccions disponibles al manual de referència de GiD.

Es vol destacar l'ús de disseny per mig de coordenades (absolutes, relatives, polars, etc.), l'ús d'eines de còpia i moviment d'entitats, la intersecció de corbes, el col·lapse d'entitats, l'ús de capes, etc.

A1.2.1 Descripció de la figura a construir

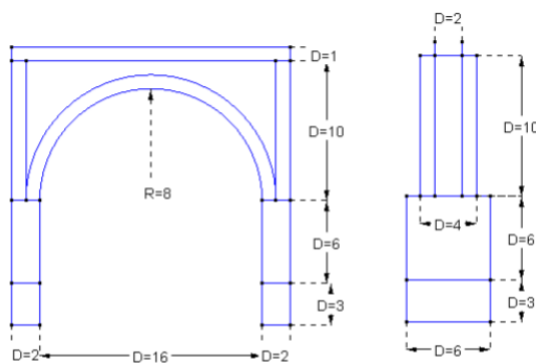
Es planteja la construcció d'un model amb la forma d'un pont romà, tenint en compte que el model està destinat a generar una malla de volum d'elements tridimensionals (tetraedres concretament).

L'aspecte resultant que es vol aconseguir és el següent:



Il·lustració 53. Pont, model de disseny.

Com el pont presenta una geometria amb seccions repetitives es construeix inicialment un tram que es copiarà progressivament. Es modela un tram amb les dimensions següents (en m):



Il·lustració 54. Esquema de mides del model.

A1.2.2 Disposició de coordenades

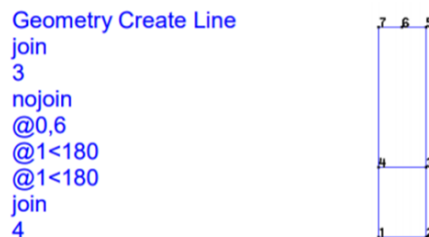
Es comença definint mitjançant coordenades cartesianes les línies de l'alçat projectat sobre el pla XY i es creen les primeres 4 línies:



Il·lustració 55. Coordenades dels punts. Línies creades.

Les ordres es poden realitzar de diverses maneres: escrivint directament a la línia de comandes, prement sobre la icona de creació de punts o des del menú. La següent línia es començarà partint del punt 3 (no creant un nou punt superposat amb aquest). Selecció de la creació d'una línia recta i prement sobre el botó dret del ratolí apareix una finestra del menú. En aquest cas es té la opció de **Join** per a seleccionar punts preexistents.

Es selecciona **Join** i es fa un click sobre el punt 3. Es canvia al mode de creació de nous punts mitjançant i es creen els punts 5, 6 i 7 fent servir coordenades relatives, per aquestes s'afegeix @ davant les coordenades.



Il·lustració 56. Creació de punts. Línies resultants.

El punt 5 té les coordenades del 3 més 6 unitats al valor del eix Y. Els punts 6 i 7 es creen mitjançant coordenades relatives polars en l'eix X. Les coordenades relatives es consideren respecte al punt previ.

A1.2.3 Copy i Move

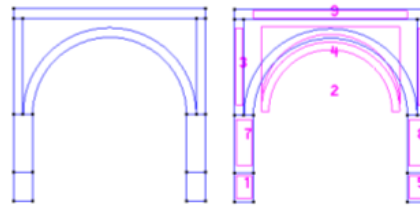
Les eines de còpia i de moviment d'entitats presenten multitud de prestacions: permeten fer rotacions, translacions, reflexions i entitats paral·leles que permeten múltiples còpies, extrusions, col·lapse de les noves entitats junt amb les existents, etc.

Per a poder crear els arcs s'utilitzarà l'eina de còpia comentada prèviament, tot fent rotació al voltant del centre (10, 9, 0) dels punts 5 i 6. La rotació es defineix com a pla 2D i amb un angle negatiu de 180° per tal de que giri en sentit antihorari.

La resta de línies es fan d'una meitat i es copia les línies apropiades mitjançant una copia especular 2D (**Mirror**) respecte d'un eix definit per les coordenades (10, 0, 0) - (10, 9, 0), seleccionant les línies i sense cap extrusió. És important tenir desactivada la casella **Duplicate entities** per tal d'evitar crear punts duplicats superposats físicament.

Les superfícies seran de tipus Nurb utilitzant el mode automàtic amb l'objectiu de que el programa s'encarregui de generar les superfícies que s'observen a continuació:

Geometry Create NurbSurface Automatic
4
5
6
escape



Il·lustració 57. Coordenades de creació de superfícies. Superfícies resultants.

Les superfícies es representen en color rosa des del contorn fins a l'interior. Es deixa les superfícies 3 i 6 en $Z = 0$ i es mou les superfícies 1, 5, 7 i 8 un increment de $Dz = 1.0$ i les superfícies 2, 4, 6 i 9 un increment de $Dz = -1.0$.

Els paràmetres de **Move** són:

- Selecció de superfícies
- Transformació de translació de les coordenades relatives (0, 0, 0) a (0, 0, 1) per a les superfícies 1, 5, 7 i 8 i de (0, 0, 0) a (0, 0, -1) per les superfícies 2, 4, 6 i 9.
- Es construeix les superfícies de la cara oposada mitjançant l'eina de **Copy**, fent una extrusió de les superfícies addicionals.
- La transformació és una translació relativa de valors: $Dz = -6$ per a les superfícies 1, 5, 7 i 8, $Dz = -4$ per a les superfícies 3, 6 i $Dz = -2$ per a 2, 4, 6 i 9.

A1.2.4 Construcció del volum

L'objectiu de fer un únic volum es que pugui ser mallat per tal d'obtenir una partició del domini. S'eliminen les superfícies internes, per tal de deixar únicament la capa externa del volum, amb **Geometry Delete Surface** i seleccionant les Superfícies que calguin.

S'elimina les línies que estan dins del volum, ja que determinades línies tenen una part dins i una altre fóra del volum i han de dividir-se. Per tant, es divideixen les línies automàticament creant la intersecció múltiple entre totes les línies.

Per tal que no hi hagin punts duplicats superposats s'utilitza l'eina de **Collapse** que s'encarrega de fusionar aquestes entitats. Un cop s'han eliminat les parts sobrants es generen de nou les diferents superfícies de forma automàtica de costats 4, 5 i 6.

A1.2.5 Selecció de superfícies pel volum

Ara es dissenya un volum especificant les superfícies que li faran de contorn. Des del menú es pot seleccionar la opció de **Add To Selection** per a poder afegir entitats, **Remove From Selection** per a treure de la selecció o **Clear Selection** per tal de deixar de seleccionar tot.

El volum ve dibuixat en un color blau clar. En un suposat cas on el contorn no es tanqués per qualsevol motiu, s'indica el nombre d'entitats on es detecten problemes i s'activa l'eina per a fer etiquetes **Label** per tal de visualitzar el problema i corregir-lo lo més ràpidament possible.

Si el grup de superfícies tanca un volum de forma única resulta útil crear el volum amb l'opció **Search**, sent suficient la indicació d'una de les superfícies de contorn perquè el programa en trobi la resta.

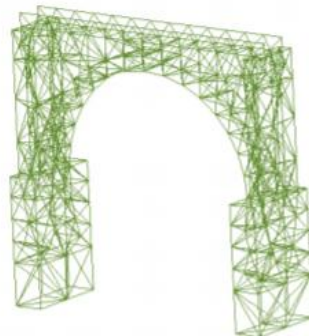
A1.2.5 Ús de capes

En casos on les geometries siguin complicades és fonamental separar les entitats per capes, activant i desactivant-les en funció de les facilitar la visualització. D'aquesta manera es facilitarà la selecció, es reduirà la probabilitat de confusions, etc.

Els objectes creats es trobaran a la capa inicial que hi ha per defecte. S'haurà de crear una capa que es denominarà **Pont** on s'enviarà el volum creat i totes les entitats descendents jeràrquicament (superfícies, línies i punts). S'activa la opció **Also lower entities** i es canvia el volum de capa mitjançant **Send To**.

A1.2.6 Test del mallat

Es comprova que es pot generar la malla desitjada en aquest mòdul, mitjançant el menú **Meshing** → **Generate**. I s'obté una malla amb tetraedres pel volum i triangles com es veu en la següent imatge:



Il·lustració 58. Malla de la estructura.

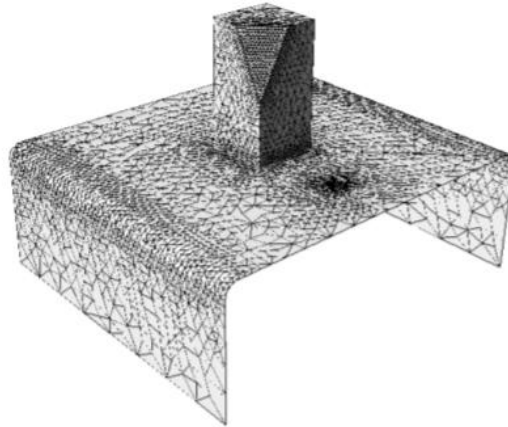
A1.2.7 Creació del pont complet

Per últim, es fa una còpia del volum i després de les baranes mitjançant una translació relativa (fent dos punts com a origen – destí), sense fer extrusions d'entitats i seleccionant 5 múltiples còpies.

A1.3 Assignació de mides a la generació de la malla

L'objectiu d'aquest exemple és mallar una peça utilitzant les diferents opcions que el programa GiD ofereix per a l'assignació de les mides dels elements. Al següent exemple es genera la malla d'un model amb les següents assignacions:

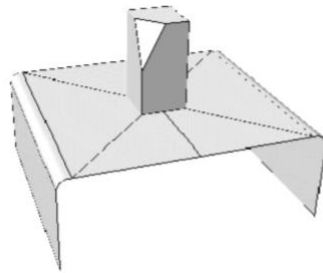
- Assignació de mides d'elements al voltant de punts
- Assignació de mides d'elements al voltant de línies
- Assignació de mides d'elements en superfícies
- Assignació de mides utilitzant Cordal Error



Il·lustració 59. Mallat del model.

Per aquest exemple es parteix d'un fitxer denominat "*ToMesh1.gid*". Aquest conté una geometria la qual es mallarà de diferents formes i augmentant progressivament el nombre d'elements en unes zones determinades. Els passos a seguir són els següents:

- Al menú **Files** es selecciona l'opció **Read**. Després s'obre amb la funció Open el fitxer "*ToMesh.gid*".
- Es selecciona la opció **Render-Flat lighting** del menú del ratolí.
- Es selecciona la opció **Rotate-Trackball** del menú del ratolí i es fan alguns canvis de perspectiva per tal de facilitar la comprensió del model.
- Es retorna a la visualització normal amb **Render-Normal**, ja que ens serà més fàcil de treballar.



Il·lustració 60. Model de ToMesh.gid

A1.3.1 Generació de la malla amb assignació de mides

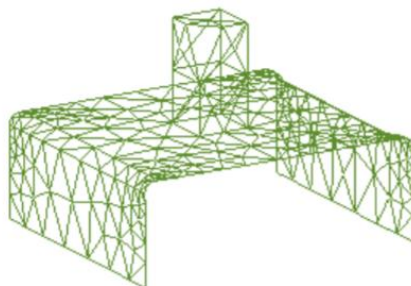
GiD té activada per defecte una correcció de les mides dels elements segons la forma de l'entitat que es tingui que mallar. Aquesta opció de correcció es pot activar o desactivar a la finestra de **Preferences**, just a l'apartat de **Meshing** sota el nom de **Automatic correct sizes**.

Si aquesta correcció no és suficient i s'ha d'indicar on es vol una major precisió en el mallat. En aquests casos, GiD permet assignar les mides dels elements mitjançant varies opcions.

A1.3.2 Generació de malla amb opcions per defecte

Per realitzar aquesta tasca es segueix els passos següents:

- S'escull l'opció **Meshing-Generate**.
- Apareix una finestra on s'introdueix la mida dels elements de la malla que es vagi a generar. Es deixa el valor que GiD dona per defecte i es prem **OK**.
- Una finestra mostra el progrés de la generació de la malla. Un cop s'ha finalitzat, apareix una finestra amb informació sobre la malla que s'ha generat. Es prem **OK** per tal de poder-la visualitzar.

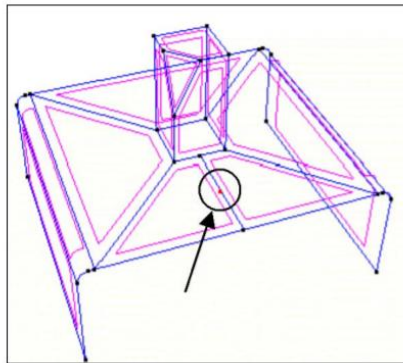


Il·lustració 61. Mallat per defecte.

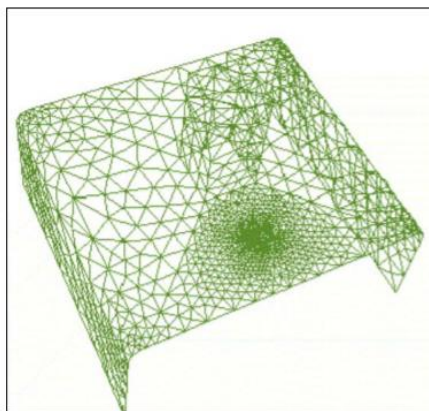
A1.3.3 Assignació de mides d'elements al voltant de punts

Per tenir més elements en punts determinats es fa:

- S'escull l'opció **Meshing – Assign sizes – Points** i apareix una finestra on s'ha d'introduir la mida dels elements al voltant dels punts a seleccionar. S'introdueix un 0,1 i es prem OK.
- Es selecciona el punt que s'indica a la figura. Es prem ESC per tal d'indicar que s'ha donat per finalitzada la selecció de punts.
- S'escull l'opció **Meshing – Generate**.
- Apareix una finestra preguntant si es desitja eliminar la malla anterior i es prem a Si.
- GiD permet que introduir la mida màxima dels elements. Es deixa el valor que ve proporcionat per defecte i es prem OK.

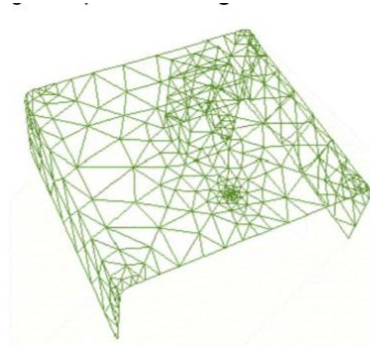


Il·lustració 62. Selecció del punt de concentració de la malla.



Il·lustració 63. Malla resultant de la concentració en un punt.

- Hi ha una gran concentració d'elements al voltant del punt que s'ha seleccionat perquè la seva mida és molt inferior a la resta del model.
- S'obre la finestra de **Preferences** que es troba a **Utilities**. Es fa click sobre la pestanya **Meshing**. En aquesta finestra hi ha una opció denominada **Unstructured Size Transitions** que defineix la velocitat de transició entre les dimensions dels elements i el seu valor varia entre 0 i 1. A més, si es té un factor més gran, major serà la velocitat de transició. S'introdueix un valor de 0,8 i es fa click sobre **Accept**.
- Es torna a escollir la opció **Meshing-Generate**.



Il·lustració 64. Mallat amb elements concentrats i velocitat de transició de 0,8.

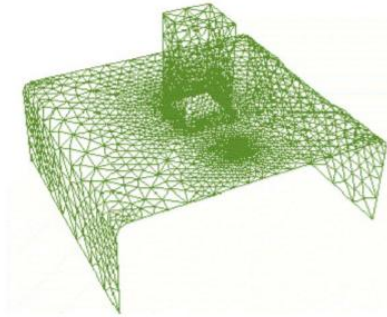
- La velocitat de transició entre les diverses mides dels elements és molt gran, causant que aquells elements que presenten una mida de 0,1 estiguin molt concentrats.
- Es torna a introduir un 0,4 a la opció **Unstructured Size Transitions**, ja que és el valor més adequat per a fer la generació de malla que es desitja obtenir.

A1.3.4 Assignació de mides d'elements al voltant de línies

El procés a seguir es similar a l'anterior amb la diferència que es seleccionen línies per la concentració del mallat, i es realitza mitjançant:

- S'escull l'opció **Meshing – Assign sizes – Lines** i apareix una finestra on s'ha d'introduir la mida dels elements al voltant de les línies a seleccionar. S'introdueix un 0,5 i es prem **OK**.
- Es selecciona les línies que defineixen la base del prisma i es fa click a **ESC**.
- S'escull l'opció **Meshing – Generate**.
- Apareix una finestra preguntant si es desitja eliminar la malla anterior i es fa click a **YES**.

- Apareix la finestra que permet introduir la mida màxima dels elements. Es deixa el valor que GiD dóna per defecte i es prem **OK**. Hi ha una gran concentració d'elements al voltant de les línies que s'ha seleccionat, ja que la seva mida és molt inferior a la de la resta del model.

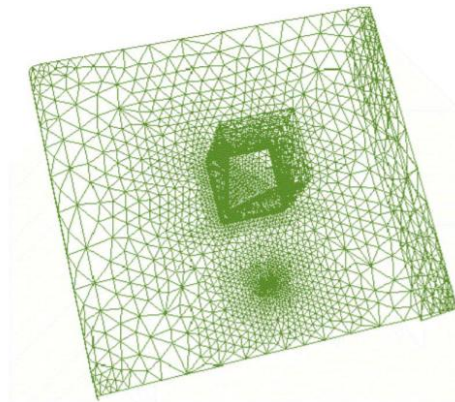


Il·lustració 65. Concentració de malla a les línies de base del rectangle.

A1.3.5 Generació de malla amb assignació de mides dels elements a les superfícies

Ara es passa a seleccionar superfícies per la concentració de malla a partir de:

- Escollir l'opció **Meshing – Assign sizes – Surfaces**, apareix una finestra on s'ha d'introduir la mida dels elements en aquelles superfícies seleccionades. S'introdueix un 0,5 i prem **OK**.
- Es selecciona la superfície triangular que defineix el tall d'una cantonada del prisma i es prem **ESC**.
- S'escull l'opció **Meshing – Generate**.
- Apareix una finestra preguntant si es vol eliminar la malla anterior, es fa click en **YES**.
- Apareix la finestra per introduir la mida màxima dels elements. Es deixa el valor que GiD dóna per defecte i es prem **OK**. Hi ha una gran concentració d'elements a la superfície que s'ha seleccionat, ja que la seva mida és de 0,5.

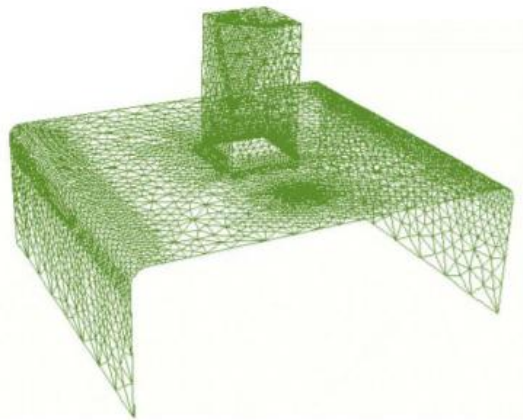


Il·lustració 66. Malla amb la concentració al tall del prisma.

A1.3.6 Generació de malla utilitzant Cordal Error

Per acabar amb el mallat es realitza els passos següents:

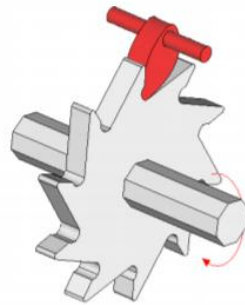
- S'escull l'opció **Meshing – Assign Sizes – By Cordal error**.
- GiD requereix que s'introdueixi la mida mínima dels elements. S'introdueix un 0.1 a la línia d'ordres i es prem **Return**.
- GiD demana la mida màxima dels elements. Introduïu un 10 a la línia d'ordres i premi **Return**.
- Ara s'ha d'afegir l'error cordal. Aquest es correspon amb la màxima distància entre l'element generat i l'element real. Introduïu un 0.05 i premi **Return**.
- S'escull l'opció **Meshing – Generate**.
- Apareix una finestra preguntant si es vol eliminar la malla anterior. Es fa click a **YES**.
- Apareix la finestra que permet introduir la mida màxima dels elements. Es deixa el valor que GiD dóna per defecte i es prem **OK**. S'aconsegueix una concentració molt més gran d'elements en les zones on hi ha corbes. Ara es pot veure que l'aproximació és bastant millor que abans.



Il·lustració 67. Mallat amb concentració d'elements a zones corbades.

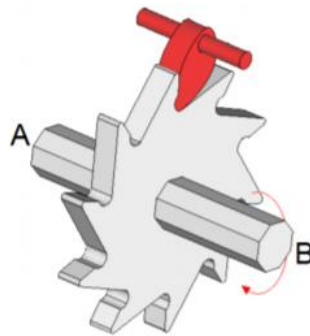
A1.4 Post-process d'una peça mecànica

L'objectiu d'aquest apart és fer l'estudi del post-process d'una peça d'acer sotmesa a una sèrie de forces per veure les tensions del material i la seva deformació. La geometria i el mallat venen ja fets al arxiu "pieza.rar".



Il·lustració 68. Peça mecànica a analitzar.

La peça en qüestió representa un engranatge que permet el moviment d'un eix en un sol sentit. Es vol estudiar el comportament d'aquesta peça sotmesa a una sèrie de forces externes, més concretament quan la peça es troba en una situació d'equilibri. En aquesta situació, la peça queda bloquejada per un dels seus dents contrarestant la força de rotació que arriba des de l'eix.



Il·lustració 69. Peça amb punts A i B bloquejats.

Per fer la simulació es fa una simplificació de la següent forma: es bloqueja els extrems de l'eix (A i B) i s'aplica pressió a les superfícies del dent on es suposa que hi ha contacte amb la peça impedit qualsevol moviment.

En aquest cas no té gaire importància les propietats del material ni els valors de la pressió, sinó únicament mostrar les diverses opcions de post-process.

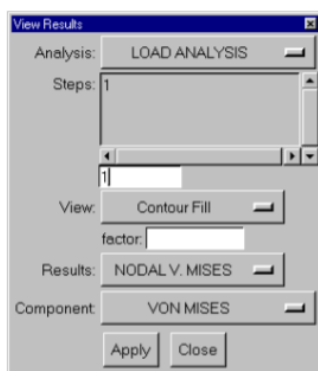
A1.4.1 Post-process de la peça

Un cop fet el càlcul es pot començar l'estudi de post-process. El post-process de GiD permet la visualització dels resultats obtinguts a partir de l'anàlisi.

A1.4.2 Visualització dels resultats

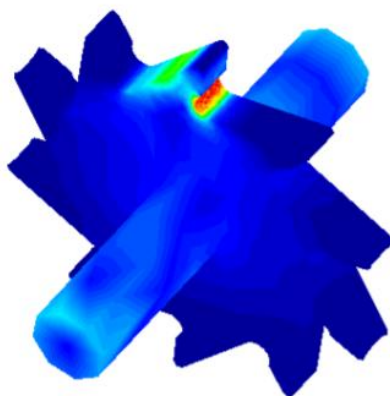
Per poder veure els resultats es segueix els passos següents:

- S'escull l'opció **Files – Postprocess**.
- Al menú Windows s'escull l'opció **View Results** i apareix la finestra de visualització dels resultats. Per defecte no es veurà cap resultat a l'entrar al post-process.
- Al menú **View** de la finestra **View Results** s'escull l'opció **Contour Fill**.



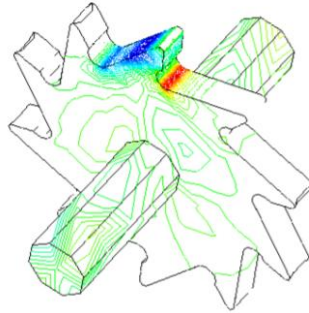
Il·lustració 70. Finestra de visualització de resultats.

- Al menú **Results** s'escull l'opció **NODAL V.MISES** i es prem sobre **Apply**. S'obté la representació gràfica del càlcul de Von Misses que aporta una idea del nivell de càrrega del material.



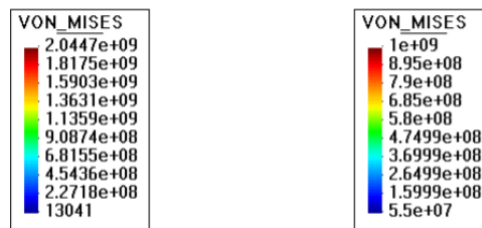
Il·lustració 71. Resultats de VON MISES per Contour Fill.

- Els menús **View i Results** es poden combinar i veure els diferents càlculs amb cadascun dels mètodes de visualització. Per exemple, es selecciona **Contour Lines** al menú **View** i **NODAL STRESS** al menú **Results**. Al menú Components s'escull **Sx** (tensió segons l'eix X) i s'obté la següent figura:

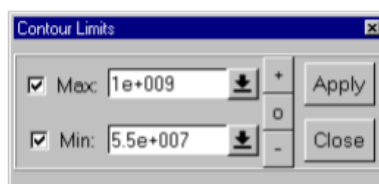


Il·lustració 72. Resultats de VON MISES per Contour Fill. Pel component X.

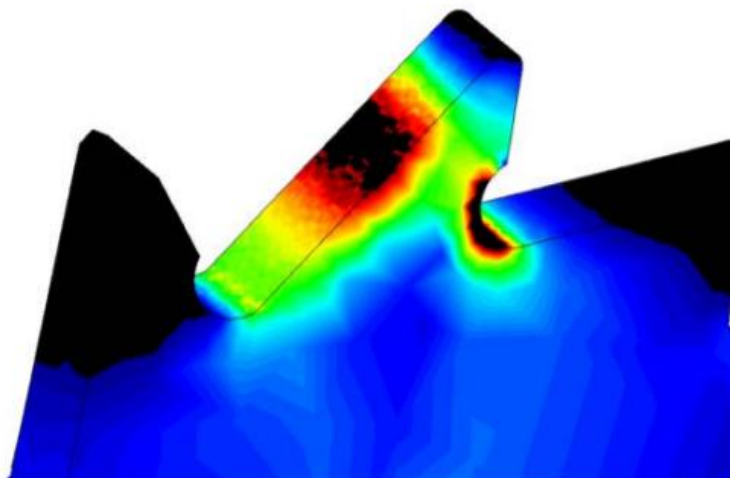
- Es torna a la visualització del càlcul de Von Mises amb l'opció Contour Fill.
- La peça es renderitza amb una escala de colors que engloben el rang de valors calculats. En aquest exemple únicament interessa un rang de resultats determinat. Es pot adequar l'escala de colors de tal forma que el límit inferior sigui de $5,5e7$ i el superior de $1e9$.
- S'escull l'opció **Options – Contour – Define Limits** i apareix la finestra **Contour Limits**. A la casella de Max d'aquesta finestra s'introdueix $1e9$ i a la de Min el valor de $5,5e7$. Seguidament, es prem sobre Apply i s'obté la figura:



Il·lustració 73. Llegenda de valors per defecte. Llegenda amb els limitis imposats.

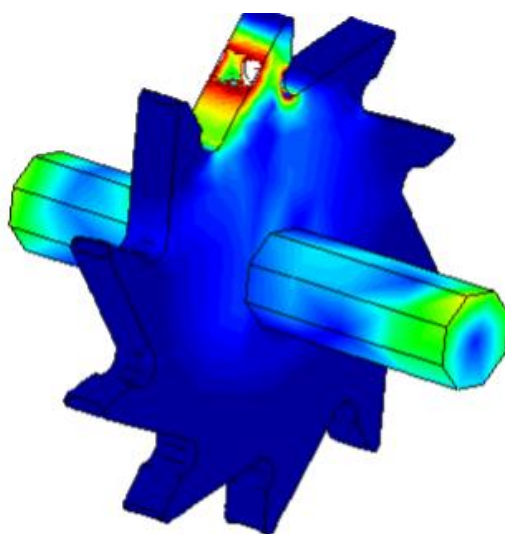


Il·lustració 74. Finestra de Contour Limits.



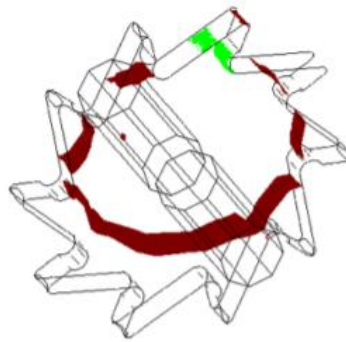
Il·lustració 75. Resultats amb la nova escala de colors.

- La gama de colors es reparteix entre el $1e9$ i el $5,5e7$, per tant tots aquells valors que no estiguin compresos dins d'aquest rang es visualitzen amb color negre. És possible fer un canvi en la visualització d'aquests valors fent servir **Options – Contour – Min Options – Out Min Color – Min Color** o **Options – Contour – Max Options – Out Max Color – Transparent**.
- Els valors que es troben per sota del rang de visualització es representen amb el mateix color que el color mínim. Els valors que es troben per sobre del rang de visualització no es dibuixen i acaben sent transparents.



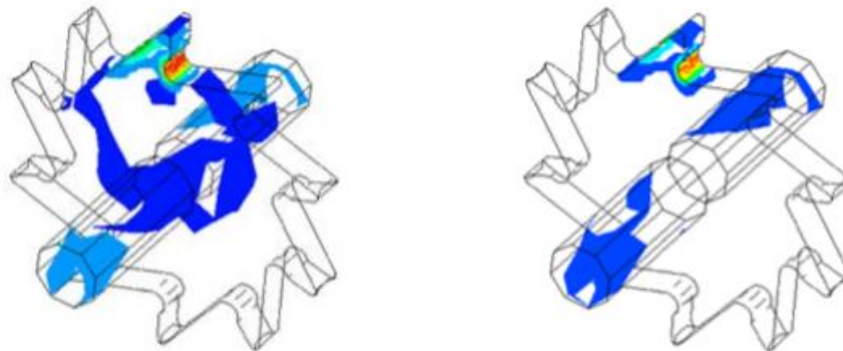
Il·lustració 76. Resultats amb escala de colors modificada per valors mínims i màxims.

- Per tal d'establir els valors inicials dels límits de visualització s'escull l'opció: **Options – Contour – Reset Limit Values**.
- Una altre opció de visualització de resultats és l'opció **Iso Surfaces**. Aquesta opció permet trobar aquells elements del model que tenen associat el mateix valor. S'escull l'opció **View Results – Iso Surfaces – Exact – NODAL V. MISES**.
- GiD sol·licita el nombre de **Iso Surfaces** que es volen visualitzar; en aquest cas s'introdueix un valor de 2 (de $1e9$ i de $5,5e7$). Apareix al monitor la visualització d'aquelles superfícies d'elements que tenen associats els valors de $1e9$ i de $5,5e7$.



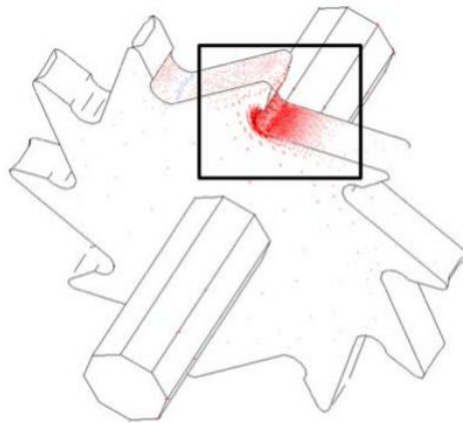
Il·lustració 77. Resultats per la visualització de valors específics.

- Existeixen altres formes de poder visualitzar **Iso Surfaces**. Una opció és mitjançant **View Results – Iso Surfaces – Automatic – NODAL V. MISES** e introduint el nombre de **Iso Surfaces** que es volen visualitzar, GiD assigna un valor automàticament a cadascuna d'aquestes.
- Amb l'opció **View Results – Iso Surfaces – Automatic Width – NODAL V. MISES** s'introdueix la distància entre els valors de les diverses **Iso Surfaces**. GiD automàticament crea tantes **Iso Surfaces** com sigui possible.



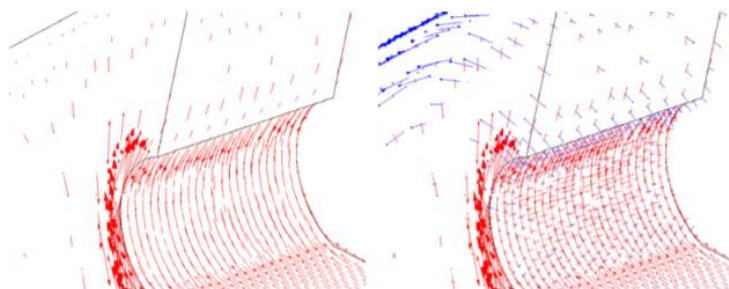
Il·lustració 78. Resultats de Iso Surfaces per defecte. Resultat de Iso Surfaces amb Automatic Windth

- També és possible la visualització de resultats amb vectors. Es dibuixa un vector per a cada element de la malla. A la finestra **View Results** s'escull **Display Vectors** al menú **View** i **NODAL STRESS** al menú **Results**. Al menú **Components** s'escull la opció **Yes** (Tensió segons l'eix Y) i es prem sobre **Apply**. S'obté la següent figura:



Il·lustració 79. Resultats amb vectors.

- Al menú Components de la finestra **View Results** es selecciona la casella de **All** i es podrà veure el següent:



Il·lustració 80. Resultats ampliats de la visualització amb vectors.

- Els vectors són de color vermell si la figura està sotmesa a esforços de tracció i de color blau si són esforços de compressió.

A1.4.3 Modes de visualització

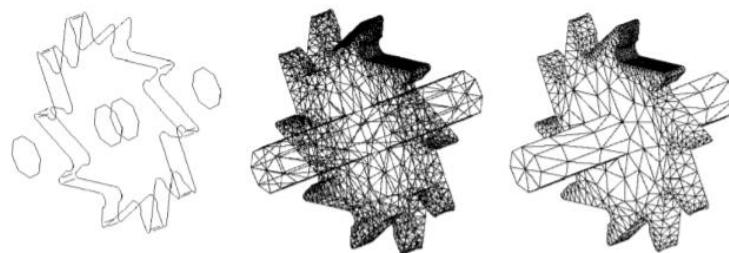
A continuació es presenten els modes de visualització i els passos per accedir-hi:

- S'escull l'opció **Windows – View Style**. Apareix una finestra on es poden canviar les opcions de visualització de la geometria. Aquesta finestra està composta per diferents menús que caracteritzen certs aspectes de la visualització de la figura; tots aquesta menús es poden combinar per tal d'aconseguir la visualització desitjada.

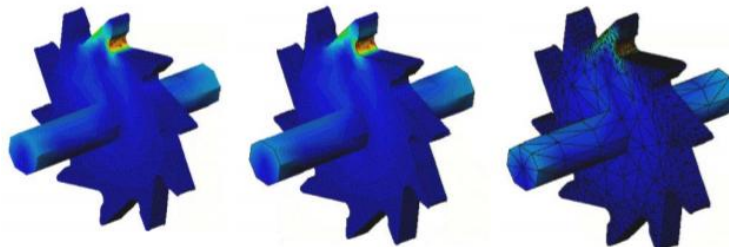


Il·lustració 81. Finestra d'estils de visualització.

- Per ensenyar de forma visual les diferents opcions que ens ofereix el menú **Style**, es prem Apply i s'obtenen els resultats següents:



Il·lustració 82. Visualització amb Style de: Boundaries, All Lines i Hidden Lines.



Il·lustració 83. Visualització amb Style de: Body, Body Bound i Body Lines.

- En el següent cas s'analitza les diferents opcions que ofereix el menú **Culling**, combinant-lo amb el menú **Conditions** i les opcions **Transparent** i **Massive**.

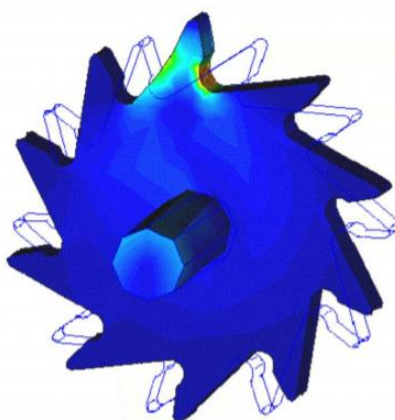


Il·lustració 84. Meú Culling de Front Faces. Front Faces amb Massive. Culling None amb Transparent.

A1.4.4 Visualització de la deformada

Finalment es mostra la visualització de la deformada seguint els passos que es presenten a continuació:

- S'escull l'opció **Windows – Deform Mesh** i apareix la finestra de **Mesh Deformation**.
- Al menú **Style** de la finestra **Select & Display Style** es selecciona la opció **Boundaries**.
- A la finestra **Mesh Deformation** es selecciona **Deformation** a **Main Geometry**. I per **Reference Geometry** es selecciona **Original**.
- Les visualitzacions dels resultats ja es poden aplicar a la geometria deformada. Com a exemple es pot anar a la finestra **View Results** i seleccionar les opcions **Contour Fill** i **NODAL V. MISES**.



Il·lustració 85. Resultats de la deformada.