

## RESUM

Títol de la tesina: Dics verticals dissipadors d'energia. Estudi d'una pala esmorteïdora.

Autor: Albert Mancera Sugrañes

Tutor: Dr. Eng. Jose Luis Monsó de Prat

Aquesta tesina pertany a l'àmbit de l'Enginyeria Marítima, i el seu objectiu principal és aportar nous coneixements sobre els dics verticals perforats, i les seves noves possibles aplicacions, com són la dissipació d'energia mareomotriu incident mitjançant la implantació d'una pala esmorteïdora en el parament exterior del dic.

Aquesta estructura es basa en els clàssics dics verticals, afegint la particularitat de que al parament exterior s'hi troba una paret mòbil que funciona com un pèndul invertit. El seu moviment s'utilitza per dissipar part de l'energia mareomotriu incident i així disminuir l'ona reflectida i les oscil·lacions del mar al parament exterior. Durant l'estudi es discutiran diferents formes de construir un dic d'aquestes qualitats intentant obtenir una combinació de propietats òptima dins de les múltiples opcions estudiades.

S'han realitzat uns assajos físics (2009) al laboratori del LIM de la UPC, concretament al nou canal de generació d'onatge CIEMito. Aquest assajos són gran part del cos d'aquesta tesina, doncs són la base de l'estudi. A partir d'ells s'estudia la viabilitat o no d'aquest projecte d'investigació i la seva possible implantació en un futur en la façana mediterrània.

El document es divideix en tres grans parts: l'estat de l'art, els assajos físics i les conclusions. A l'estat de l'art hi trobem dues parts diferenciades: la primera parla sobre els dics verticals en general de forma introductiva, per conduir al lector a la temàtica, i la segona tracta un estat de l'art més especialitzat, centrat en els propis dics verticals perforats.

Els assajos físics realitzats al laboratori del LIM contenen amb una descripció dels models utilitzats i una explicació dels assajos, així com la metodologia emprada. En aquests apartats s'explica exactament com s'ha realitzat tot el procediment d'experiments i obtenció de dades.

Pel que fa a les conclusions, primerament s'analitzen les dades obtingudes durant els assajos i a partir d'aquests resultats es troba una combinació de propietats òptimes per al seu funcionament. De tot aquest raonament sorgeixen les conclusions.

Per calcular de forma quantitativa el funcionament d'aquests models s'ha emprat el concepte de Coeficient de reflexió, que relaciona l'alçada d'ona incident en una estructura de contenció amb l'alçada d'ona reflectida. D'aquesta forma es pot obtenir una quantificació tangible del bon o mal funcionament de l'estructura en termes de dissipació d'energia mareomotriu.

Als annexes de la tesina s'hi inclouen els resultats de tots els assajos realitzats per que es puguin observar els comportaments de cada tipus de dic sota la influència de les diverses condicions marítimes estudiades. Aquests annexes poden servir de base per a propers estudis.

Paraules clau: dic, calaix, onatge, reflexió, alçada d'ona, esmorteïment, model.

## ABSTRACT

Thesis title: Vertical Breakwaters dissipaters of energy. Study of a dumping paddle.

Author: Albert Mancera Sugrañes

Tutor: Dr. Eng. Jose Luis Monsó de Prat

This work belongs to the field of Maritime Engineering. Its main goal is to provide new knowledge about the vertical perforated dikes and its' new applications, such as the dissipation of tidal energy incident by implementing a damping paddle in the exterior of the dam.

This structure is based on classic vertical dikes, noting that the exterior wall works like an inverted pendulum. The movement is used to dissipate the energy of incident waves and to decrease tidal reflected waves and oscillations in the exterior part of the port. In the study, the ways to build these types of dikes are discussed, with the aim of getting an optimum combination of properties within the options studied.

Some physical tests were carried out in 2009 in UPC's LIM laboratory, specifically in the new wave generation CIEMito channel. The tests largely make up the body of this thesis; they are the basis of the study. These essays are used to study the viability of this research project and its possible implementation in the future within the Mediterranean façade.

The document is divided into three parts: the state of the art, physical tests and conclusions. In the state of the art there are two distinct parts: the first discusses the vertical dykes in a general introductory way to lead the reader to the subject, and the second state of the art is more specialized, focusing on perforated vertical dikes.

The second section of the document pertains to physical tests performed in the laboratory of LIM. It consists of descriptions of the models used on the tests and its procedure, as well as the followed methodology. This section explains exactly how the whole procedure was carried out, the experiments and the collection of data.

In regards to the conclusions, first, analyzed data was obtained during the tests and from these results, a combination of properties for optimum performance was also obtained. From these deductions, conclusions are then produced.

To calculate quantitatively the performance of these models, we use the concept of Reflection Coefficient, which relates the incident wave height with the reflected wave height after the impact against the dam. This way, you can get a tangible measurement of the good or bad behaviour of the structure in terms of tidal energy dissipation.

The results of all tests are included in the appendices of this thesis. They are useful to observe the behaviour of each type of dike under the influence of the various maritime conditions studied. These appendices can serve as a basis for upcoming studies.

Key words: dike, caisson breakwater, waves, reflection, wave height, dumping, model

<b>CAPÍTOL 1.....</b>	<b>1</b>
<b>Introducció.....</b>	<b>1</b>
Motivació del problema .....	2
Antecedents .....	3
Consideracions tècniques, ambientals i econòmiques.....	3
Objectius de la tesina .....	4
<b>CAPÍTOL 2.....</b>	<b>5</b>
<b>Estat de l'art. Aproximació als dics verticals.....</b>	<b>7</b>
Concepte de dic vertical convencional.....	7
Parts d'un dic vertical convencional.....	8
Avantatges respecte un dic en talús.....	9
Dificultats associades a la construcció de dics verticals .....	9
Modes de fallida d'un dic vertical.....	10
Tipus de càrrega sobre un dic vertical .....	12
Ruptura de l'onatge front un dic vertical .....	13
<b>CAPÍTOL 3.....</b>	<b>17</b>
<b>Calaixos perforats amb càmeres dissipatives per reduir la reflexió de l'onatge incident.....</b>	<b>19</b>
Història.....	19
Característiques hidrodinàmiques dels calaixos perforats .....	20
Comportament del fenomen de reflexió.....	21
Forces i pressions actuants en el parament exterior i interior dels calaixos perforats .....	22
<b>CAPÍTOL 4.....</b>	<b>27</b>
<b>Estudi i disseny d'un dic vertical amb pèndul invertit al parament exterior. ....</b>	<b>29</b>
Definició de les característiques marítimes .....	30
Criteris de semblança.....	31
Estudi del tipus d'escala condicionat pel canal hidràulic.....	34
Estudi dels factors d'escala .....	35
Dimensionament dels calaixos .....	36
Estudi dels diferents materials de la comporta .....	39
<b>CAPÍTOL 5.....</b>	<b>47</b>
<b>Realització dels assajos en model físic .....</b>	<b>49</b>
Emplaçament del model al canal.....	50
Ubicació dels sensors .....	51

Assajos realitzats .....	54
Recull de dades quantitatives i qualitatives .....	58
<b>CAPÍTOL 6.....</b>	<b>61</b>
<b>Anàlisi dels resultats i optimització.....</b>	<b>63</b>
Tractament de les dades rebudes del laboratori.....	63
Mètode de Mansad i Funke .....	65
Comparació de resultats segons models i característiques .....	69
Combinació dels factors més dissipadors.....	74
<b>CAPÍTOL 7.....</b>	<b>77</b>
<b>Conclusions.....</b>	<b>79</b>
<b>CAPÍTOL 8.....</b>	<b>81</b>
<b>Referències .....</b>	<b>83</b>
<b>CAPÍTOL 9.....</b>	<b>85</b>
<b>Agraïments.....</b>	<b>87</b>
<b>CAPÍTOL 10.....</b>	<b>89</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>91</b>

## Índex de figures

Figura 1. Mapa paramètric de McConnel .....	7
Figura 2. Perfil i seccions d'un dic vertical.....	8
Figura 3. Modes de fallida d'un dic vertical (1). Font: Shore Protection Manual .....	11
Figura 4. Modes de fallida d'un dic vertical (2). Font: Shore Protection Manual .....	11
Figura 5. Distribució de forces sobre un calaix vertical en règim quasi-estàtic .....	12
Figura 6. Tipus de ruptura de l'onatge en funció del número d'Iribarren.....	13
Figura 7. Classificació de l'onatge en funció de $\beta$ . .....	14
Figura 8. Font: Coastal Engineering Manual .....	15
Figura 9. Font: INHA.....	15
Figura 10. Secció del calaix Jarlan.....	20
Figura 11. Comparació entre OCS i MCS. Font: Coastal Structures 99'.....	21
Figura 12. Càrregues totals sobre l'estructura en MCS. Font: Coastal Structures 99' .	23
Figura 13. Coeficient de reducció (Canel) i modificació (dades empíriques). .....	24
Figura 14. Diagrama de pressions sobre les diferents parets del dic vertical. ....	25
Figura 15. Disseny del Prototip .....	29
Figura 16. Dades del Mediterrani. Font: Universidad Politécnica de Madrid.....	30
Figura 17. Canal de simulació d'onatge regular CIEMito.....	34
Figura 18. Pati llarg (esquerra), pati mig (centre) i pati curt (dreta) del Model 1 .....	37
Figura 19. Secció longitudinal (esquerra) i transversal (dreta) del Model 1 .....	37
Figura 20. Foto del perfil longitudinal del Model 1 .....	37
Figura 21. Secció longitudinal (esquerra) i transversal (dreta) del Model 2, .....	38
Figura 22. Secció longitudinal (esquerra) i transversal (dreta) del Model 2, .....	38
Figura 23. Primera comporta d'acer (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta).....	40
Figura 24. Segona comporta d'acer (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta).....	40
Figura 25. Comporta de resina (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta) .....	41
Figura 26. Comportes del Model 1 (dades en centímetres).....	41
Figura 27. Primera comporta de pòrex (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta).....	42
Figura 28. Segona comporta de pòrex (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta).....	42
Figura 29. Primera comporta de resina (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta) .....	43
Figura 30. Segona comporta de resina (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta) .....	43
Figura 31. Comportes de radi curt del Model 2 (dades en centímetres) .....	44
Figura 32. Tercera comporta de pòrex (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta).....	44
Figura 33. Quarta comporta de pòrex (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta).....	45
Figura 34. Tercera comporta de resina (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta) .....	45
Figura 35. Quarta comporta de resina (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta).....	46

Figura 36. Comportes de radi llarg del Model 2 (dades en centímetres) .....	46
Figura 37. Imatge d'un assaig del Model 2 al canal LIM.....	49
Figura 38. Situació del LIM al Campus Nord de la UPC.....	50
Figura 39. Canal CIEMito. Diferents perspectives amb sensors d'alçada d'ona .....	51
Figura 40. Sensor d'alçada d'ona.....	52
Figura 41. Sensor d'alçada d'ona.....	52
Figura 42. Esquema longitudinal del canal CIEMito amb el Model 1 .....	53
Figura 43. Esquema longitudinal del canal CIEMito amb el Model 2 .....	53
Figura 44. Taula d'assajos realitzats amb el Model 1.....	55
Figura 45. Taula d'assajos realitzats amb el Model 2.....	57
Figura 46. Fitxa de seguiment d'un assaig .....	59
Figura 47. Taula de dades dels sensors procedent del laboratori del LIM.....	63
Figura 48. Gràfica del registre d'ona dels sensors propers al dic .....	63
Figura 49. Imatges del programa Lasa .....	64
Figura 50. Taula de dades dels sensors després del tractament amb full de càlcul ....	64
Figura 51. Dades del Model 1 .....	70
Figura 52. Dades del Model 2 .....	70
Figura 53. Comparació de les dades en funció del material de la comporta.....	72
Figura 54. Taula de dades amb $K_r < 40\%$ .....	73
Figura 55. Perfil longitudinal del nou prototip, .....	74
Figura 56. Taula de resultats òptims. Resum de les millors propietats .....	80



# CAPÍTOL 1





## Introducció

Aquesta tesina s'emmarca dins del Projecte d'Investigació del Subprograma de Transports i Infraestructures del Pla Nacional de Cooperació Pública-Privada. Es tracta d'un projecte cooperatiu on un consorci format per les empreses DRAGADOS, S.A.; FPS, Flota y Proyectos Singulares, URBASER, empresa amb una Direcció d'energia activa en sistemes renovables; INHA, Instituto de Hidrodinámica Aplicada, empresa tecnològica especialitzada en estudis d'enginyeria i assajos a escala en temes hidràulics, oceanogràfics i marítims, i finalment CIMNE, com a centre d'investigació de la Universitat Politècnica de Catalunya, l'àmbit d'especialització del qual són les eines numèriques i els models i mètodes matemàtics, els quals pretenen desenvolupar un sistema d'esmoreïment d'energia encaminat per una banda al descens de la cota de coronació i de les estructures marítimes rígides i monolítiques tipus dics verticals, i per altra banda l'aprofitament de l'energia incident per la seva transformació en elèctrica.

Com a suport científic d'investigació i desenvolupament tecnològic, el consorci d'empreses ha contat amb la col·laboració del Grup d'Investigació consolidat de l'Universidad Politècnica de Madrid, Medi Marí, Costaner i Portuari i altres Àrees Sensibles, adscrit a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports.

El projecte se centra en els aspectes de disseny de l'estructura rígida i monolítica d'un dic vertical dotat al parament exterior d'una comporta esmoreïdora de l'onatge que funciona com un pèndul invertit, i constarà de dues fases principals:

- \* Optimització del disseny geomètric del calaix pendular
- \* Assajos i simulació en el medi físic.

És en aquesta segona fase on aquesta Tesina ha estat realitzada. La simulació en el medi físic i els assajos, així com els anàlisis dels resultats obtinguts i la comparativa entre models formen part d'aquesta tesina.

Tot i així, el projecte d'Investigació és molt més ampli que aquesta Tesina, i se centra en tres aspectes concrets: econòmics, tècnics i ambientals a nivell general. Tot i que cal destacar-ne:

- \* El disseny d'un nou tipus de dic vertical de calaixos amb làmines pendulars per l'esmoreïment de l'onatge.
- \* L'anàlisi del comportament hidrodinàmic i resistent del calaix.
- \* L'aprofitament de l'energia del mar per convertir-la en elèctrica mitjançant un sistema de columna oscil·lant OWC.

A continuació es descriuen la motivació d'aquest Projecte d'Investigació i com a conseqüència la motivació de la Tesina, el antecedents, les consideracions tècniques, econòmiques i ambientals, i els objectius concrets de la Tesina.

## Motivació del problema

La construcció de dics verticals com a parament en aigües profundes està actualment en alça degut a l'avantatjosa reducció de material emprat, la rapidesa de construcció i les millores ambientals i econòmiques que aporta front al dic en talús tradicional.

En l'actualitat existeixen certes dificultats per a obtenir material de pedrera i sembla que cada cop resultarà més costós. A més contínuament s'incrementen les limitacions mediambientals que afecten a l'actuació de l'home en el medi marí. Per aquest motiu, els dissenys i les tecnologies emprades clàssicament en aquest tipus d'obres han de ser revisats i millorats en base a l'experiència acumulada durant les últimes dècades.

Per altra banda, l'actual crisi energètica i l'efecte del canvi climàtic està causant un major interès i èmfasis a l'hora d'aprofitar al màxim les energies renovables. La societat és conscient de la gran quantitat d'energia que hi ha al mar. Actualment existeixen diferents iniciatives per l'aprofitament de l'energia de l'onatge. A Portugal, per exemple, s'ha treballat durant anys en una instal·lació OWC a la illa de Pico a les Açores. Espanya, amb els seus 3.900 km de costa, és un dels països més interessats en aquest tipus de tecnologia.

La idea en aquest cas és optimitzar el disseny de les estructures que faciliten l'abric dels ports i aprofitar al màxim tota l'energia del mar quan aquest xoca contra un dic. A dia d'avui els dics són blocs immòbils amb la única finalitat de frenar aquesta força marítima.

Els dics construïts mitjançant calaixos de formigó ofereixen unes possibilitats enormes, doncs són elements que, tot i tenir algunes limitacions estructurals, ofereixen moltes possibilitats gràcies a la facilitat amb que es poden variar els seus dissenys per aconseguir diferents objectius.

Per predimensionar un dic vertical s'han utilitzat històricament formulacions basades en resultats empírics que tracten d'avaluar les càrregues que es registren front un determinat clima d'onatge. No obstant això, l'infinita varietat de geometries i possibilitats de tenir forces d'impacte generen incertesa sobre el valor real de les empentes actuant sobre l'estructura. Per això, l'ús de models reduïts per optimitzar els dissenys de les seccions és avui en dia de vital importància, inclús quan existeixen models numèrics per simular el fenomen es requereixen assajos físics per poder calibrar-los.

El principi de funcionament d'un model físic és el de reproduir a escala reduïda un succés sense fer hipòtesis ni ometre fenòmens físics per poder mesurar còmodament els esforços realitzats. Els valors obtinguts s'extrapolen amb rigor a l'escala real.

Treballar en un model reduït implica, no obstant, l'assumpció d'efectes d'escala, la importància dels quals s'ha de quantificar i minimitzar al màxim per no errar en la predicció dels esforços del prototip.

## Antecedents

L'ús extensiu dels calaixos verticals es va generalitzar als últims anys del segle XX. Primerament fora forçat per la consciència ecològica i més tard per les millores de terminis i costos.

No obstant això, l'ús de calaixos cel·lulars tal i com són concebuts actualment per a la construcció de dics trencaonades no és adequada o, senzillament, és encara inviable en algunes situacions.

Fonamentalment els motius que l'invaliden són estètics, constructius (doncs es requereixen instal·lacions especials degut les seves grans dimensions), ambientals (es necessita reduir el volum de materials emprats en l'estructura) i geotècnics (el terreny ha de tenir una capacitat portant adequada i s'ha d'esperar que pel seu assentament o consolidació, requerint doncs grans dragats i substitucions per altres materials).

En aquest estudi es pretén donar una solució eficient (sempre que es produeixin les circumstàncies de terreny favorables) que suposi un progrés important en la reducció de volum de materials en l'estructura per determinats nivells d'abric, sent una solució a determinats problemes estètics al reduir la cota de coronació.

En els últims anys s'han desenvolupat dissenys innovadors que busquen que les càrregues provocades per l'onatge siguin minorades per una dissipació esglaonada, per etapes.

## Consideracions tècniques, ambientals i econòmiques

Existeixen una sèrie de sinèrgies i objectius comuns que es produeixen entre les obres d'abric i les obres d'aprofitament energètic que abasten diversos aspectes de tipus econòmic, tècnic i ambiental.

### **(A) Aspectes econòmics**

El nou disseny permet obtenir determinats nivells d'abric a uns costos menors. A més, part de l'aprofitament energètic pot finançar les obres d'abric d'un port i per tant pot implicar la viabilitat econòmica d'una instal·lació portuària que fins ara no resultés viable.

L'execució o ampliació d'un port en base a una obra d'abric de baixa cota de coronació és visualment més atractiva, per exemple de cara al turisme, i pot comportar la necessitat de desenvolupament econòmic en una zona i per tant una quantitat d'energia major per cobrir la demanda esmentada.

### **(B) Aspectes tècnics**

L'estructura de làmines pendulars disminueix les reflexions de l'onatge davant del dic i millora d'aquesta manera la maniobrabilitat en aquesta zona. A més redueix els

ultrapassaments per sobre de l'estructura, disminuint per tant la seva cota de coronació. Per tant les làmines serveixen per minimitzar els esforços sobre les obres d'abric i per tant redueixen el seu cost. El sistema pot impedir l'aparició de pressions impulsives que habitualment encareixen les obres de tipologia vertical convencionals.

### **(C) Aspectes ambientals**

El desenvolupament de noves tecnologies d'obres d'abric pot implicar un canvi en els dissenys clàssics d'aquest tipus d'estructures, fomentant així l'estudi de noves tipologies que puguin aprofitar l'energia de l'onatge, o bé minimitzant l'impacte visual de la seva implantació. L'iniciativa privada podria desenvolupar noves tecnologies de mínim impacte visual si existís una possibilitat d'aprofitament energètic que justifiqui els estudis d'investigació.

La disminució de les reflexions davant del dic minimitza la cota de coronació de l'obra i per tant el seu impacte visual. La font d'energia, l'onatge, és un recurs inesgotable en el temps, i de gran extensió espacial, el que garanteix la sostenibilitat d'aquest medi d'extracció.

La interacció entre l'enginyeria civil i l'enginyeria industrial al mar pot afavorir l'estat del coneixement de les obres d'abric. Aquest aspecte pot ser beneficiós en el camp de l'instrumentació i la conservació d'aquest tipus d'infraestructures, aspecte que resultarà molt rellevant en els pròxims anys.

## **Objectius de la tesina**

Aquesta tesina té els següents objectius:

- \* Presentar els dics verticals, les seves propietats i les seves possibles problemàtiques.
- \* Explicar el concepte de calaix vertical perforat i el seu comportament hidràulic.
- \* Conèixer la física associada al moviment d'un dic vertical amb el parament exterior actuant com un pèndul invertit.
- \* Estudiar els models de calaixos suggerits per l'Universidad Politécnica de Madrid mitjançant assajos de reflexió.
- \* Buscar una opció òptima pel disseny del calaix vertical amb el parament exterior actuant com un pèndul invertit, partint dels models anteriors proposats.
- \* Discernir si és viable o no l'ús d'aquest tipus de dic per l'aprofitament de l'energia mareomotriu.



## CAPÍTOL 2



## Estat de l'art. Aproximació als dics verticals

### Concepte de dic vertical convencional

Es pot definir un dic de parament vertical com un monòlit rígid, de paret impermeable, de comportament gravitatori (que basa l'estabilitat en el pes) i que es caracteritza per reflectir pràcticament el total de l'energia de l'onatge, sense intentar variar el seu comportament, ni laminar-lo per transmissió o dissipació de l'impacte fent rebotar com una paret rígida l'acció de trens d'ona successius representats per la seva altura d'ona màxima incident [1].

En diverses ocasions es confon un dic vertical amb un dic vertical compost o mixt. Això es deu a que a vegades aquestes últimes tipologies presenten comportaments on la reflexió no és completa i existeixen problemes de pics impulsius, ones trencades, xocs confinats i masses d'aigua amb la seva corresponent quantitat de moviment en comptes de l'impacte successiu dels trens d'ones. No obstant això, a nivell geomètric l'estructura sembla una obra de parament vertical. El diagrama de McConnel reproduïx aquest fet de forma senzilla, exhaustiva i completa permetent diferenciar entre les diverses tipologies del dic de parament vertical [2].

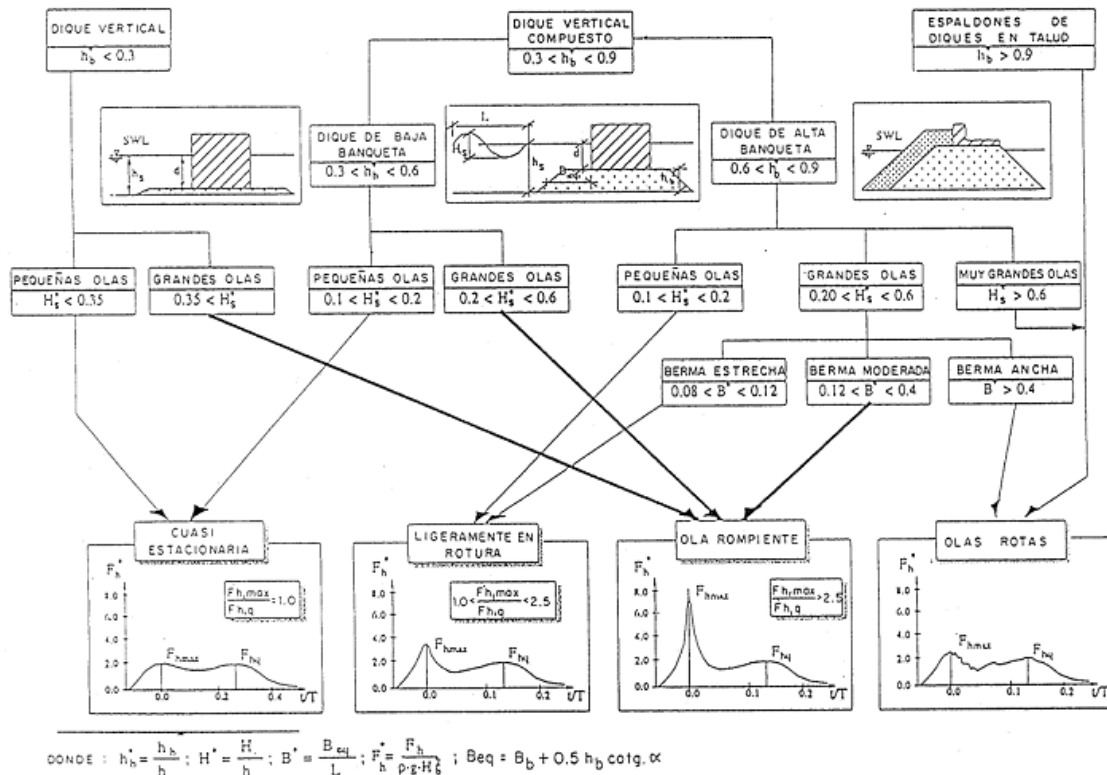


Figura 1. Mapa paramètric de McConnel

En aquest sentit el monomi d'alçada de berma relativa ha de ser  $h_b^* = 0,30$  i el monomi de l'altura d'ona significativa adimensional o relativa ha de ser  $H_s^* = 0,35$ , de forma que el parament pateix un impacte quasi-estacionari i la reflexió és total. Pot donar-se el cas que davant un dic vertical compost,  $0,30 < h_b^* < 0,90$ , amb banqueta baixa  $0,30 < h_b^* < 0,60$ , i petites onades, amb el monomi  $H_s^* < 0,20$ , el

comportament sigui semblant, però ens trobem davant una casuística molt reduïda, que a vegades es confon a nivell conceptual, tècnic, constructiu i funcional amb el clàssic dic vertical [2].

### Parts d'un dic vertical convencional

Els elements principals d'un dic vertical són els següents [1]:

- \* Banquetes de fonamentació amb el corresponent enrasament de grava (1)
- \* Berma de protecció del dic (2)
- \* Bloc de guarda anti-socavació, podent ésser embegut a la berma davantera de protecció (3)
- \* Monòlit (calaix o tipologia especial) (4)
- \* Espatlló, amb les seves múltiples solucions estructurals, funcionals i hidràuliques per minimitzar el ultrapassament quan la funció és de dic-moll (5)

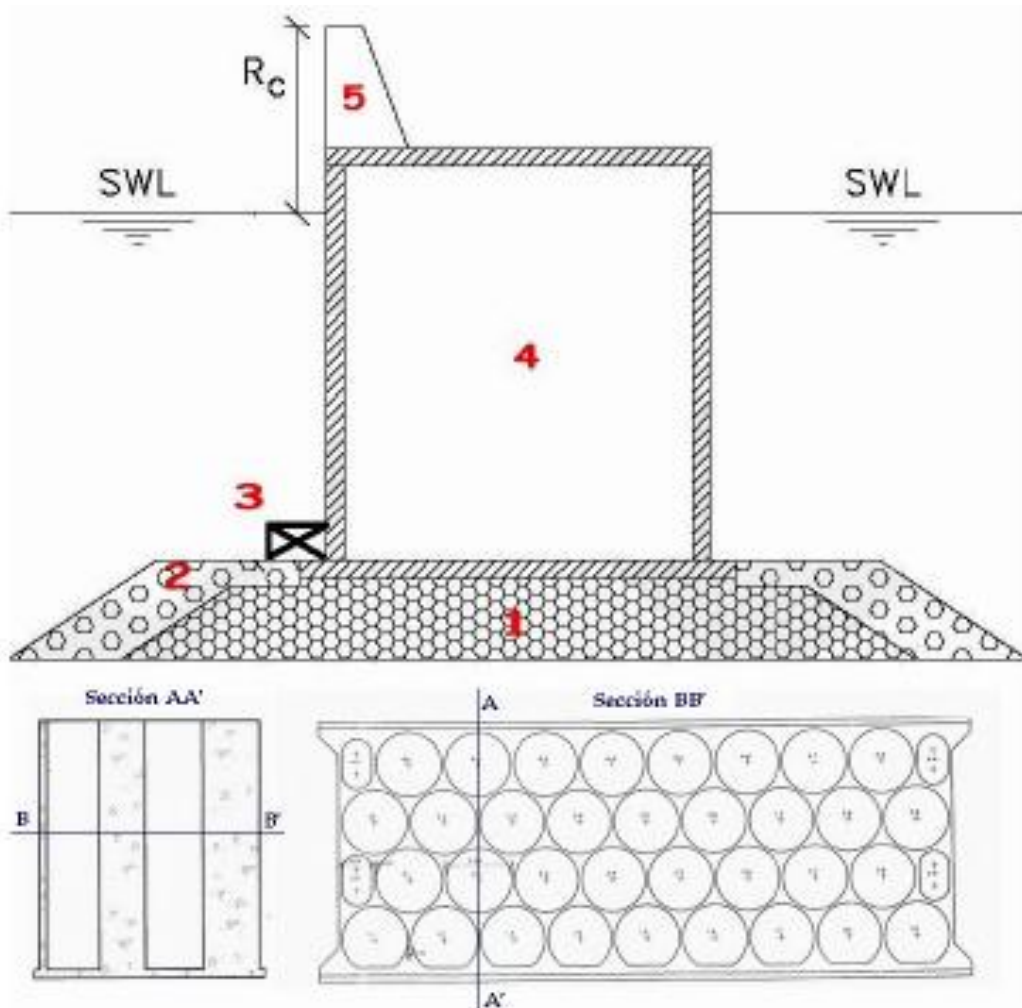


Figura 2. Perfil i seccions d'un dic vertical



## Avantatges respecte un dic en talús

- \* Requereix menys quantitat de material al tractar-se d'un cos de menor mida i per tant redueix el cost de la obra, aconseguint rendibilitat a partir dels 10 – 15 metres de profunditat.
- \* Ocupa menys superfície al fons marí, disminuint així l'impacte ambiental.
- \* Es genera menys terbolesa.
- \* La seva ràpida construcció disminueix el risc de ruptura durant aquest període i redueix els terminis d'execució.
- \* Requereix menys manteniment que un dic d'elements, que es dissenya per inici d'averies.
- \* Generalment permet millors acabats i s'adapta millor a la majoria d'usos.

Extret de [1] i [3].

## Dificultats associades a la construcció de dics verticals

Tot i l'esforç realitzat pels països líders en tecnologia de calaixos com Japó o diversos països d'Europa, l'experiència en construcció de dics verticals és encara precària i la investigació del comportament, disseny i optimització d'aquest encara té un llarg camí per recórrer. Extret de [1] i [3].

Les limitacions més corrents per l'ús d'aquestes tipologies són:

- \* És necessària maquinària sofisticada i mà d'obra qualificada, especialment per a la construcció del monòlit en l'encofrat. Petites variacions de densitat poden provocar grans diferències de flotabilitat i estabilitat del calaix a l'aigua, característiques bàsiques per a ésser remolcat fins a l'indret de fondeig amb seguretat.
- \* Durant el procés de fondeig dels calaixos poden sorgir problemes, doncs la manipulació es realitza amb el cos submergit.
- \* Poden existir condicionats estètics o arquitectònics que invalidin la opció del dic vertical.
- \* Si el calaix requerit és massa gran per ésser construït a les factories flotants o terrestres convencional, aleshores el preu es dispara qüestionant així la seva rendibilitat.
- \* El terreny on es recolzen els calaixos pot presentar una eventual falta de capacitat portant, que ens porti a:
  - Substituir grans volums
  - Esperar molt temps fins a la consolidació
  - Millorar artificialment el sòl.

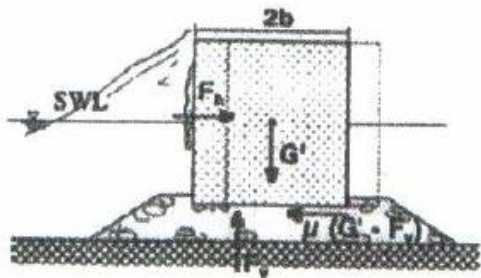
Aquestes activitats impliquen haver de dragar grans volums de sòl inadequat i substituir-lo per escullera per millorar la resistència. Aquest procés allarga els terminis de construcció, encareix la obra i exigeix la presència de pedreres properes i disponibles (reduint per tant les característiques avantatjoses que ens fan optar per un dic vertical en comptes d'un duc en talús).

- \* Per a la viabilitat del projecte i la fiabilitat del cost requerirem finestres d'onatge compatibles amb:
  - La posada en flotabilitat.
  - L'aprovisionament.
  - El remolcament fins l'obra.
  - El posicionament i l'enfonsament.
  - L'estabilitat del calaix enfonsat ple d'aigua.
  - L'emplenat amb material granular.
  - La construcció de la superestructura.

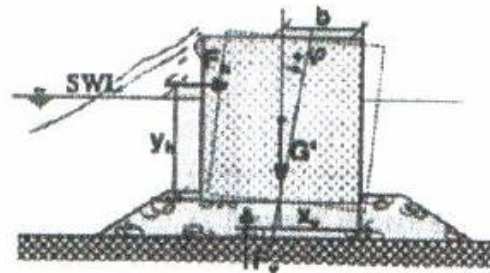
### Modes de fallida d'un dic vertical

- \* Mode de fallida instantani per l'acció de l'ona màxima sobre el monòlit. Fallida estructural per lliscament, bolcada o esfondrament.
- \* Mode de fallida instantani per l'acció de l'ona màxima sobre l'espalller. Fallida estructural per lliscament, bolcada o esfondrament.
- \* Mode de fallida operacional hidràulic per ultrapassament sobre l'espalller.
- \* Mode de fallida operacional hidràulic de reflexió per agitació interior a l'avantport, al canal d'enfilació i en dàrsenes interiors.
- \* Mode de fallida flexible per deformació acumulativa i col·lapse dels fonaments.
- \* Mode de fallida deformable per soscavació acumulativa a la berma.
- \* Mode de fallida a la berma per cota elevada d'aquesta, que funciona com a dic horitzontal compost.
- \* Mode de fallida per clavada del monòlit sobre la fonamentació de recolzament.
- \* Erosió als extrems del calaix i/o a la cimentació.
- \* Excés de pressió del recolzament.
- \* Fallida global a curt o llarg termini de la fonamentació.
- \* Altres modes de fallida derivats i/o interconnectats amb els anteriorment esmentats.

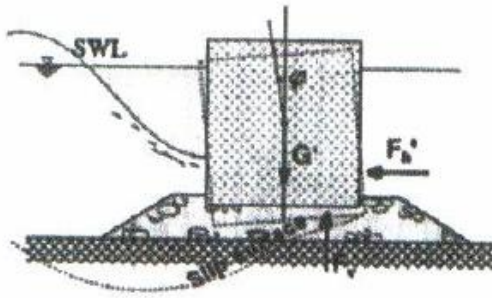
Gran part de les avaries dels dics verticals són degudes al mal dimensionament dels seus elements per culpa d'una incorrecta estimació del clima marítim i les seves accions associades, o bé per l'emplaçament del dic en una zona que pot ser susceptible de patir el trencament de l'onatge en casos de temporal. Extret de [1] i [3].



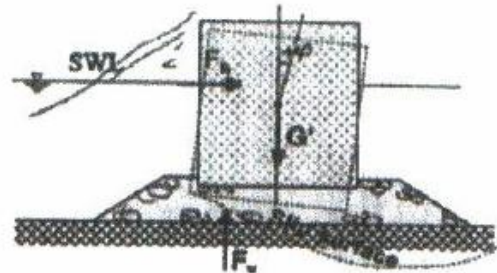
Liscament del calaix



Bolcada del calaix

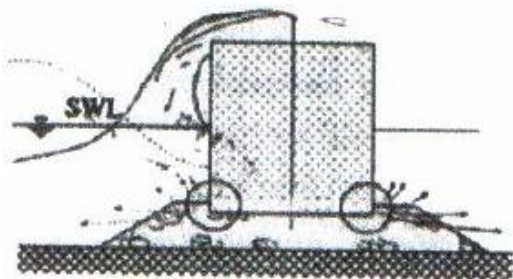


Esfondrament, liscament i inclinació cap al costat de mar

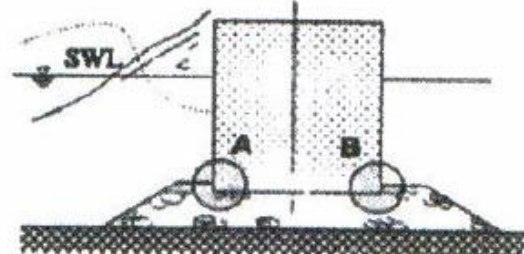


Esfondrament, liscament i inclinació cap al costat de costa

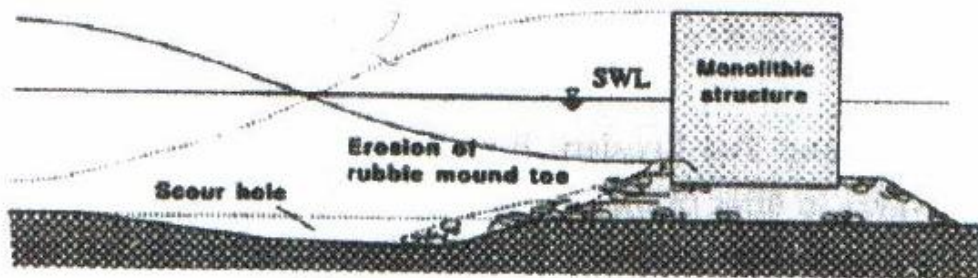
Figura 3. Modes de fallida d'un dic vertical (1). Font: Shore Protection Manual



Erosió a les zones de contacte calaix-banqueta. Excés d'ultrapassament



Perforació de la banqueteta a les zones de contacte



Soscavació del fons i erosió del peu d'escullera

Figura 4. Modes de fallida d'un dic vertical (2). Font: Shore Protection Manual

## Tipus de càrrega sobre un dic vertical

Distingim tres possibles tipus de càrrega sobre un calaix vertical:

- \* Les càrregues (quasi)-estàtiques o carregues associades a l'onatge quan aquest no trenca sobre l'estructura.
- \* Les càrregues hidrostàtiques
- \* Les càrregues dinàmiques produïdes pel trencament de l'onatge sobre l'estructura.

A la següent figura es pot observar en forma d'esquema simplificat la distribució de forces sobre un calaix vertical en règim quasi-estàtic (sense càrregues dinàmiques) [1].

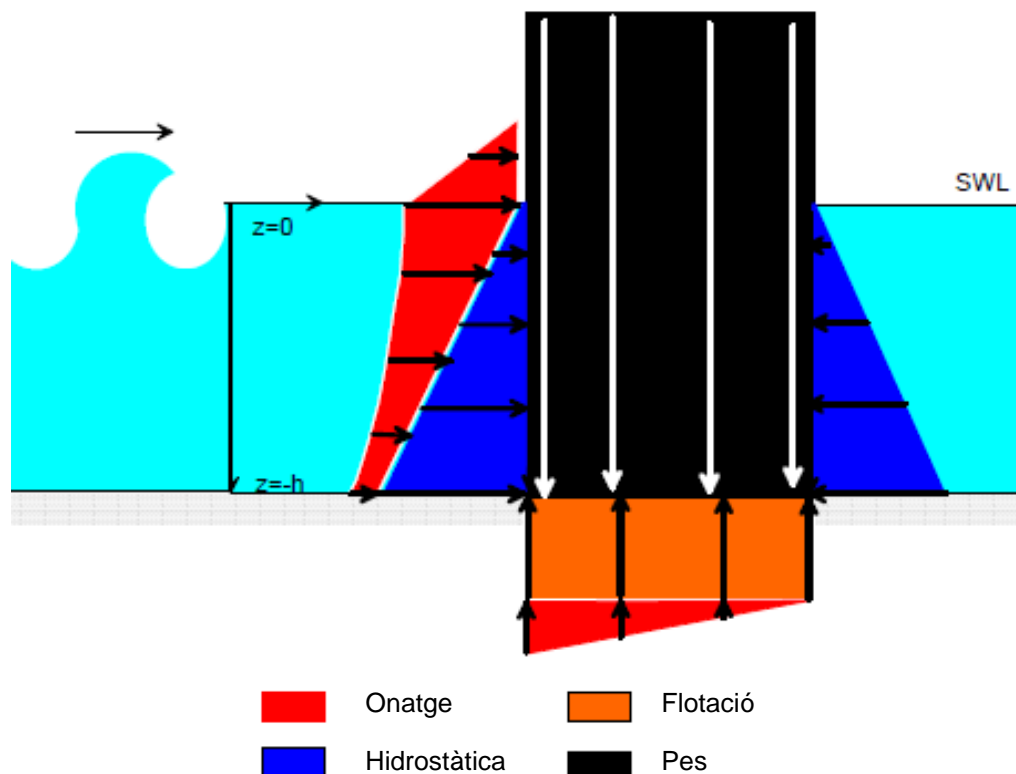


Figura 5. Distribució de forces sobre un calaix vertical en règim quasi-estàtic

El règim de disseny per un dic vertical és quasi estàtic, és a dir, que està pensat per a treballar en condicions d'aigües profundes i evitant, sempre que sigui possible, que l'onatge trenqui sobre de l'estructura.

Malauradament durant els temporals es produeixen altures d'ona incident tan grans que sovint aquestes noten el fons (condició d'aigües someres) i trenquen sobre l'estructura, generant així grans càrregues dinàmiques que poden arribar a ser problemàtiques i que han de ser preses en consideració en el procés de dimensionament. Per desgràcia a vegades és impossible evitar que es produeixin impactes dinàmics. Extret de [1] i [4].

## Ruptura de l'onatge front un dic vertical

Les ones que trenquen sobre estructures de parament vertical exerceixen pressions dinàmiques molt elevades i de curta durada prop de la zona on la cresta colpeja l'estructura. L'explicació a aquest fenomen ha estat estudiada al laboratori per diversos autors a rel dels estudis realitzats per Bagnold al 1939.

Els primers assajos en canal van revelar una primera explicació del fenomen: les forces d'impacte es produïen al moment a l'instant en que els front vertical d'una ona en trencament de tipus plunging colpeja el parament vertical i atrapa un coixí d'aire contra la paret [5].

La ruptura de tipus plunging es produeix quan el número d'Iribarren definit com:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L}} \quad (2.1)$$

Que assoleix valors entre 0,5 i 3 aproximadament, essent  $\xi$  la pendent del fons,  $H$  l'altura d'ona i  $L$  la longitud d'ona.

A partir d'aquestes experiències es va concloure que, tot i que la presència d'aquestes altes pressions és poc probable degut a que la geometria necessària és molt estricta i difícilment es produirà, aquests fenòmens han de tenir-se en compte durant el disseny.

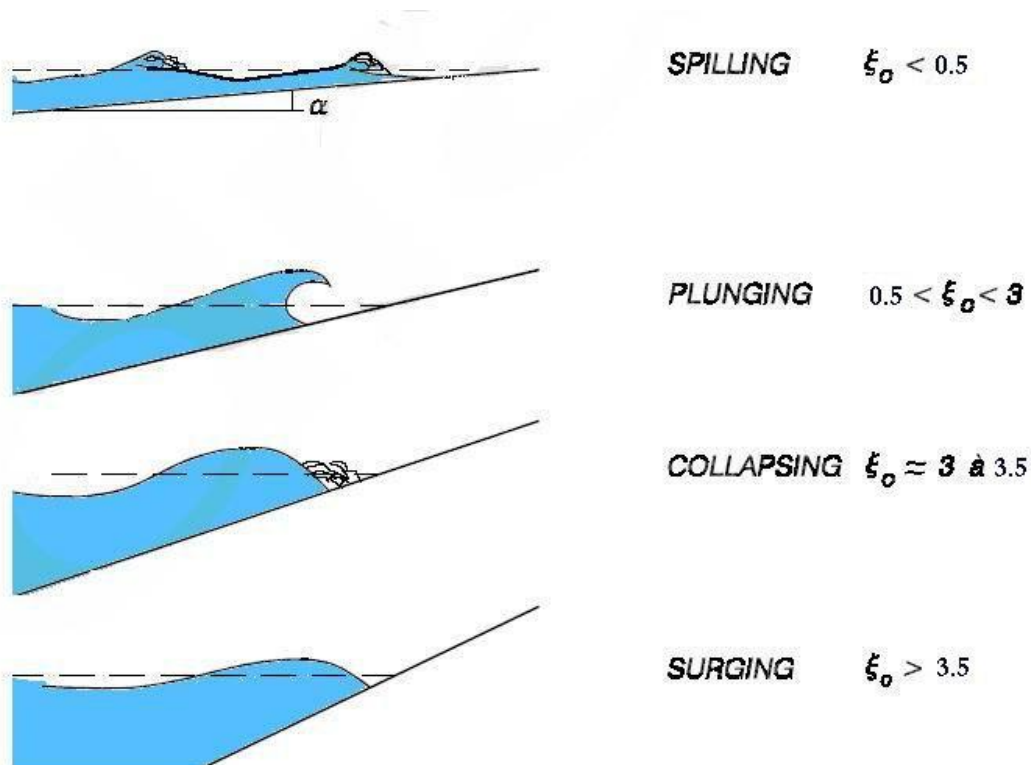


Figura 6. Tipus de ruptura de l'onatge en funció del número d'Iribarren.  
Font: Coastal Engineering Manual

Posteriors investigacions van determinar que, donat el curt període de temps en que actuen les grans forces de pic registrades ( $\approx 0.1s$ ), la importància de les pressions d'impacte contra el lliscament és qüestionable. Es va esbrinar que el que desplaçava el calaix no era l'empenta instantània sinó el momentum que l'empenta generava. El momentum és directament proporcional a l'impuls, el qual està relacionat amb el producte de l'empenta per la seva durada. Si la durada és curta, la capacitat per desplaçar el calaix, a priori, ha de ser escassa.

No obstant això, l'oscil·lació de pressions que a vegades es genera quan impacta l'ona en ruptura sobre el parament, deriva en un fenomen de ressonància sobre el calaix, que sí que obté rellevància a l'hora de computar els esforços sobre l'estructura [6].

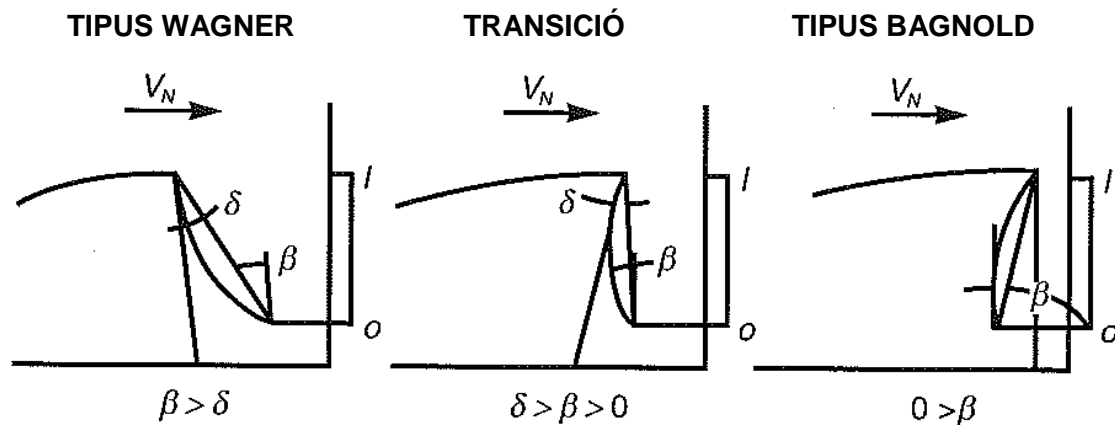


Figura 7. Classificació de l'onatge en funció de  $\beta$ .  
Font: Diseño de Diques Verticales. Vicente Negro et al.

- Si l'angle d'atac de l'onada  $\beta$  és major que la curvatura  $\delta$  s'origina el xoc ventilat o tipus Wagner, on l'aire comprès entre el front d'ona i l'estructura és expulsat pràcticament tot. Els pics de pressió no són massa elevats.
- Si l'angle d'atac de l'onada  $\beta$  és menor que la curvatura  $\delta$  i a més  $\beta$  és positiu, l'ona impacta de forma vertical i s'origina un xoc de compressió o de transició, que provoca pics de pressió més elevats.
- Si l'angle d'atac de l'onada  $\beta$  és negatiu (tipus Bagnold), significa que la ona a arribat a un punt més avançat del procés de peraltatge i ja ha començat a voltejar, impactant de manera que entre la ona i el parament queda aire atrapat. Les pressions es tornen oscil·latòries i el pic es redueix per l'efecte coixí que produeix l'aire atrapat.

Es podria pensar que el cas B és el més desfavorable, ja que el pic de pressió és el més elevat, però el temps que dura aquest fenomen és tan curt que el momentum produït és pràcticament menyspreable.

Quant a la ruptura tipus Bagnold (cas C), tot i que les pressions són menors gràcies a l'efecte coixí de l'aire atrapat, l'oscil·lació temporal de pressions d'alta freqüència després del pic pot generar problemes de ressonància a l'estructura. [6]

El període d'oscil·lació de les empentes el podem calcular mitjançant la següent expressió:

$$T_{ap} = k_c H \tag{2.2}$$

On  $k_c = \frac{25}{c_a} = 0.075 \text{ s/m}$ , essent  $c_a = 320 \text{ m/s}$  la velocitat del so en aire atrapat.

Amb aquest resultat es comprovarà, sempre que sigui possible, que la freqüència pròpia de vibració de l'estructura no coincideixi amb la de les pressions esperades per evitar ressonància i inestabilitat sobre el calaix (veure figures 8 i 9).

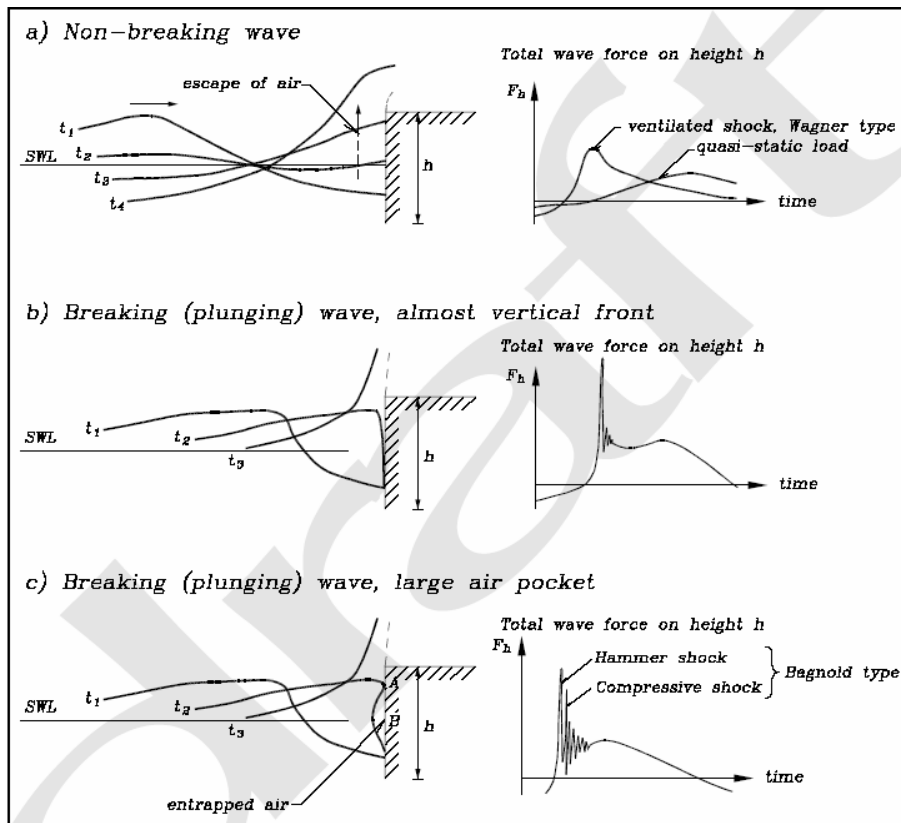


Figura 8. Font: Coastal Engineering Manual

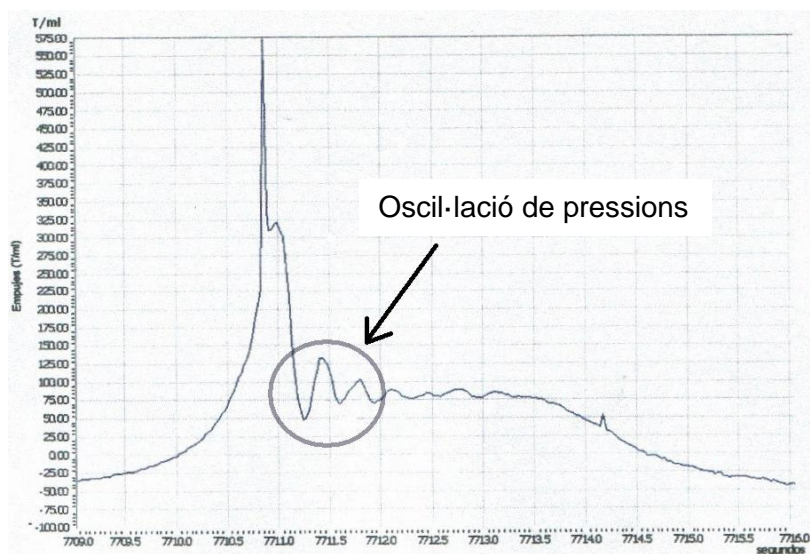


Figura 9. Font: INHA







## CAPÍTOL 3



## Calaixos perforats amb càmeres dissipatives per reduir la reflexió de l'onatge incident

### Història

Els espigons han estat utilitzats com estructures de defensa contra l'acció de l'onatge des de fa segles. En un inici els ports petits es protegien mitjançant l'apilament d'escullera a mode d'escut. Actualment en molts casos s'empren dics verticals ja que ofereixen una solució més adequada a les demandes del problema. Malauradament, degut a la impermeabilitat de la paret vertical, es produeixen fortes reflexions de l'onatge incident a la part exterior del dic causant múltiples problemes quant a la navegació, la cota de ultrapassament, erosió local, etc. Per reduir aquests inconvenients és necessari enginyar certes millores al disseny.

Al 1960 *Jarlan* introdueix el principi de les cambres dissipadores d'energia amb perforacions al parament vertical (Calaixos Perforats). La idea principal és que l'energia de l'onatge incident es transmet parcialment a les diferents cambres del dic a través de les diferents obertures que va trobant i per tant només una part de l'energia es reflexa. Dins la cambra part de l'energia es dissipa a causa de les turbulències i els vòrtex generats pel fenomen de ressonància regit principalment per la porositat del parament vertical caracteritzada pel paràmetre "ample de la cambra/longitud d'ona". L'esmoreïment significant de l'onatge incident i la forta reducció de les pressions produïdes per l'onatge confirmen les avantatges d'aquest tipus de calaix.

De fet hi ha diferents solucions estructurals que produeixen aquesta dissipació dins d'un rang d'espai horitzontal, i els més emprats són els calaixos amb cambres d'absorció i d'una única o múltiples finestres amb porositat i espaiament de finestres variables. Normalment el parament vertical consta d'obertures verticals o horitzontals, o un seguit de files de finestres circulars o rectangulars. La porositat de la paret es defineix com el total de l'àrea de finestres del parament vertical dividit per l'àrea total del parament vertical, que normalment es troba entre un 15 i un 40%. L'ample de la cambra es troba entre  $1/10$  i  $1/4$  la longitud d'ona local  $L$ .

La idea dels calaixos perforats en el parament vertical anterior va sorgir a la dècada dels 60 (*Jarlan*, 1965) i es va aplicar per primera vegada en un dic de 305 m de longitud a Baie Comeau, Província del Quebec a Canadà. Les raons que van originar el desenvolupament d'aquesta estructura foren:

- (A) Un dic en talús d'escullera no era realitzable
- (B) Els vaixells havien d'amarrar a la cara interior del dic
- (C) La coberta del dic s'havia de fer servir per transportar i acumular les mercaderies i havia de tenir com a mínim 18 m d'amplada.

Des que el primer dic de *Jarlan* va ser construït a Comeau Bay (Canadà), s'han assajat i construït moltes modificacions respecte al disseny inicial, sobretot a Japó (*Takahashi*, 1996) i a Itàlia (*Franco*, 1994).

Encara avui en dia es coneix molt poc sobre el comportament hidràulic d'aquestes estructures i sobre les forces hidrodinàmiques que hi actuen forçant així gairebé sempre a realitzar assajos en model abans de construir.

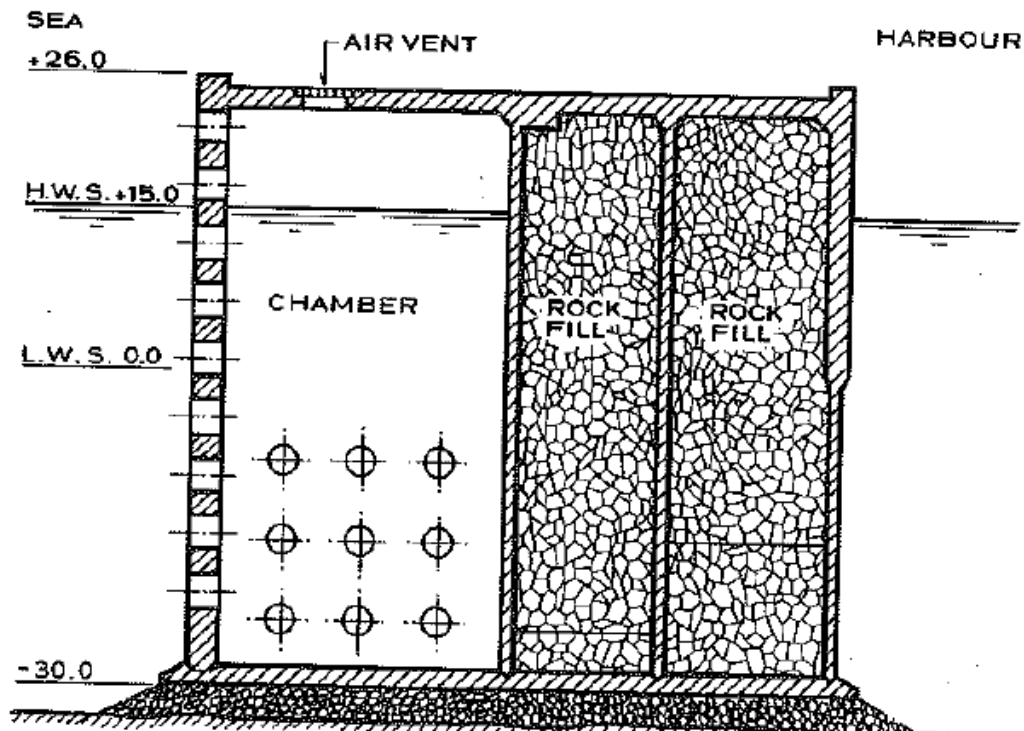


Figura 10. Secció del calaix Jarlan.

Font: *Planning and Design of Ports and Marine Terminals*

De fet el problema és força complex perquè a més dels paràmetres clàssic de l'onatge hi ha paràmetres específics de l'estructura: el número de finestres, l'ample de les cambres, la separació entre finestres, la forma de les obertures i la porositat de les finestres. Extret de [7] i [8].

### Característiques hidrodinàmiques dels calaixos perforats

Els calaixos perforats s'utilitzen normalment per remeiar els inconvenients que presenten els dics verticals convencionals. S'empren per reduir tant la reflexió com l'ultrapassament. A més, redueixen les pressions de l'onatge que actuen sobre el calaix, especialment les provinents d'ones impulsives.

Un calaix perforat convencional consta d'una paret vertical davantera perforada, una paret vertical posterior i una cambra d'aigua entre aquestes dues. El pes d'aquest calaix és menor que el d'un dic vertical no perforat d'iguals dimensions, i la major part d'aquest pes es concentra en la paret posterior del calaix. D'aquí que sovint es requereixi un major gruix de la paret perforada per satisfer les condicions de disseny quant a lliscament i bolcada.

A més, en el cas de d'un llit marí amb baixa capacitat portant, l'excés de pes a la paret posterior del calaix pot provocar efectes adversos. Per solucionar aquests problemes s'empren un calaix parcialment perforat, aportant així un pes major a la paret davantera. Malauradament, si es pren aquesta mesura, el comportament hidràulic del calaix pot empitjorar en altres camps com en la reflexió o l'ultrapassament, respecte a un calaix perforat complet. Extret de [7] i [9].

### Comportament del fenomen de reflexió

La reflexió de l'onatge està fortament lligada amb la reducció de forces exteriors que s'exerceixen sobre el calaix, així que aquest és un dels paràmetres més importants a discutir quan parlem de pressions de l'onatge sobre calaixos perforats.

L'anàlisi dels assajos en termes de comportament hidràulic es descriu millor gràcies al Paràmetre de Reflexió "PR" (Clauss et al, 1998).

$$PR = (H_i/d)^{0.65} / n^{0.95} \tag{3.1}$$

on  $n$  és la porositat,  $H_i$  l'alçada d'ona incident, i  $d$  el calat.

El bon comportament hidràulic d'un calaix amb una única cambra dissipativa (OCS) està limitat a un petit rang de valors de  $B/L$ , essent  $B$  l'ample de la cambra dissipativa entre la paret perforada i la paret posterior, i  $L$  la longitud d'ona.

En canvi un calaix de sistema multicambres (MCS) ofereix una reflexió estable i relativament baixa quan la longitud total dels sistema d'absorció ( $B$ ) es major d'un terç de la longitud d'ona ( $L$ ).

Es pot observar gràficament en la següent figura la relació existent entre els paràmetres dels calaixos i la diferència entre calaixos perforats amb una única cambra o amb més d'una.

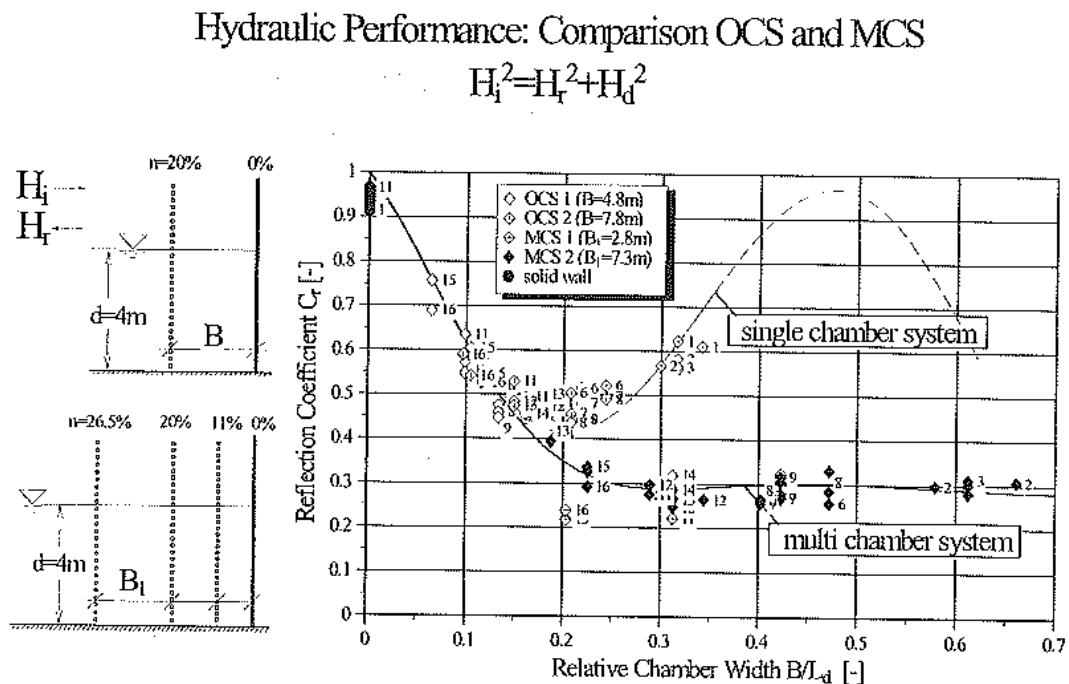


Figura 11. Comparació entre OCS i MCS. Font: Coastal Structures 99'

El comportament de la reflexió ens mostra la relació parabòlica entre el coeficient de reflexió  $C_r$  i la longitud relativa de la cambra  $B/L$ , amb un mínim entorn  $B/L = 0,2$  (Allsop et al, 1994). La gràfica evidencia que la solució MCS és òptima quant a reduir

la reflexió i a més ens dona dada important a l'hora de dimensionar,  $B/L > 0,2$  si volem reduir la reflexió al mínim.

Extret de [7] i [9].

### Forces i pressions actuants en el parament exterior i interior dels calaixos perforats

La força total sobre un calaix perforat és menor que la força total sobre un dic vertical no perforat de les mateixes dimensions per dues raons principalment:

- \* Reducció de l'altura d'ona total davant del calaix degut al menor coeficient de reflexió gràcies a la dissipació de part de l'energia.
- \* Desfasament entre el moment en que incideix la màxima força de l'onada ja que la força total actuant al calaix és la resultant de la força que actua sobre la paret permeable i la que actua sobre la paret impermeable del fons.

Aquest fenomen depèn de les característiques de l'ona i de la geometria del calaix perforat, tenint en compte la forma i les dimensions de les cambres, la porositat de la paret i la presència de conductes de ventilació (en el cas de cel·les tancades). Extret de [8].

#### Fórmula empírica pel Sistema Multi-Cambres (MCS):

La suma de les pressions d'onatge mesurades simultàniament a cada paret perforada i a la paret impermeable del trasdós dóna la força total que actua sobre l'estructura.

Les mesures indicaren que les pressions totals es redueixen per a les crestes de les ones i per ones en situacions similars a les forces mesurades en la paret vertical impermeable ( $F_0$ ). Aquest minvament de la força es degut principalment a la porositat hidràulica de cada paret, al desfasament i en alguns casos a les diferents direccions de les pressions especialment en casos on  $B/L$  és gran. Els factors de reducció ( $F_{tot}/F_0$ ) són importants, especialment en el cas del Sistema Multi-Cambres:

\* Sistema de Cambra Única:  $F_{tot,OCS}/F_0 = 0,6 - 0,8$

\* Sistema Multi-Cambres:  $F_{tot,MCS}/F_0 = 0,5$

Considerant la geometria de les cambres (o el seu volum) i les característiques de la ona, les pressions totals es poden calcular mitjançant el paràmetre:

$$FF_{tot} = \frac{(d/B)^{2/3}}{H_i/L_d} \quad (3.2)$$

El total de les pressions és  $F_{tot} = 12 \tanh^{11}(0.009 FF_{tot}) \rho g H_i^2$  en  $kN/m$ . Per a ones que no trenquen aquest paràmetre obté una bona correlació amb les forces mesurades.

### Overall Load on Structure One and Multi Chamber Systems

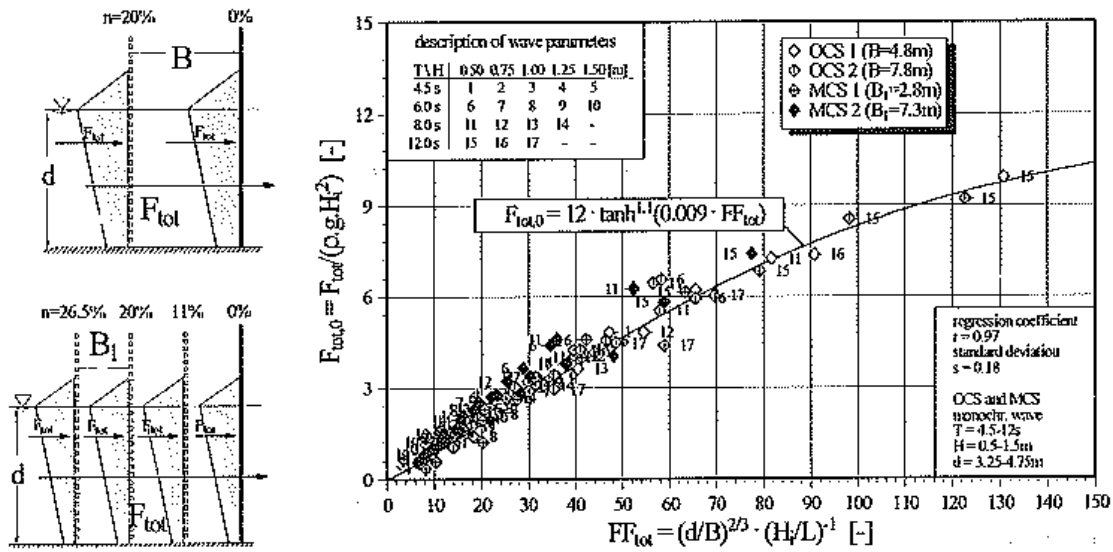


Figura 12. Càrregues totals sobre l'estructura en MCS. Font: Coastal Structures 99'

#### Fórmula empírica pel predisseny:

L'objectiu era buscar una formulació simple que permetés el predimensionament del calaix perforat. La idea parteix del fet que en la majoria de casos la fórmula de Goda proporciona una relació lineal entre les pressions hidrodinàmiques i l'altura de l'ona incident. En concret, mentre el pic de l'onada arriba a la part superior del dic, la sobrelevació de la superfície lliure i les corresponents pressions són generalment proporcionals a l'ona incident  $H_i$ . Canel proposa considerar la formulació de Goda i adaptar-la als calaixos perforats modificant la ona incident mitjançant el coeficient de reflexió  $Cr$ .

$$H_i = (1 + Cr) H_D / 2 \tag{3.3}$$

Comparant aquesta expressió amb diversos valors experimentals s'ha observat que aquesta dona uns valors d'un 5% a un 30% més alts per les forces i d'un 20% a un 85% pel run-up.

Per això la formulació de Canel ha estat adaptada per una funció de transferència mitjançant un paràmetre més útil que el coeficient de reflexió el qual és molt difícil de saber per a l'estructurista. Aquest paràmetre és el coeficient de reducció i s'ha extret de mesures en diferents assajos. S'expressa com:

$$Kr = H_i / H_D = 1 + a \cdot (B/L) \tag{3.4}$$

On  $a = -1.43$ ,  $H_i$  és l'altura d'ona incident utilitzada en la formulació de Goda, i  $H_D$  és l'altura d'ona de disseny.

Aquest mètode té l'avantatge de ser simple però el desavantatge d'estar limitat per a certes aplicacions.

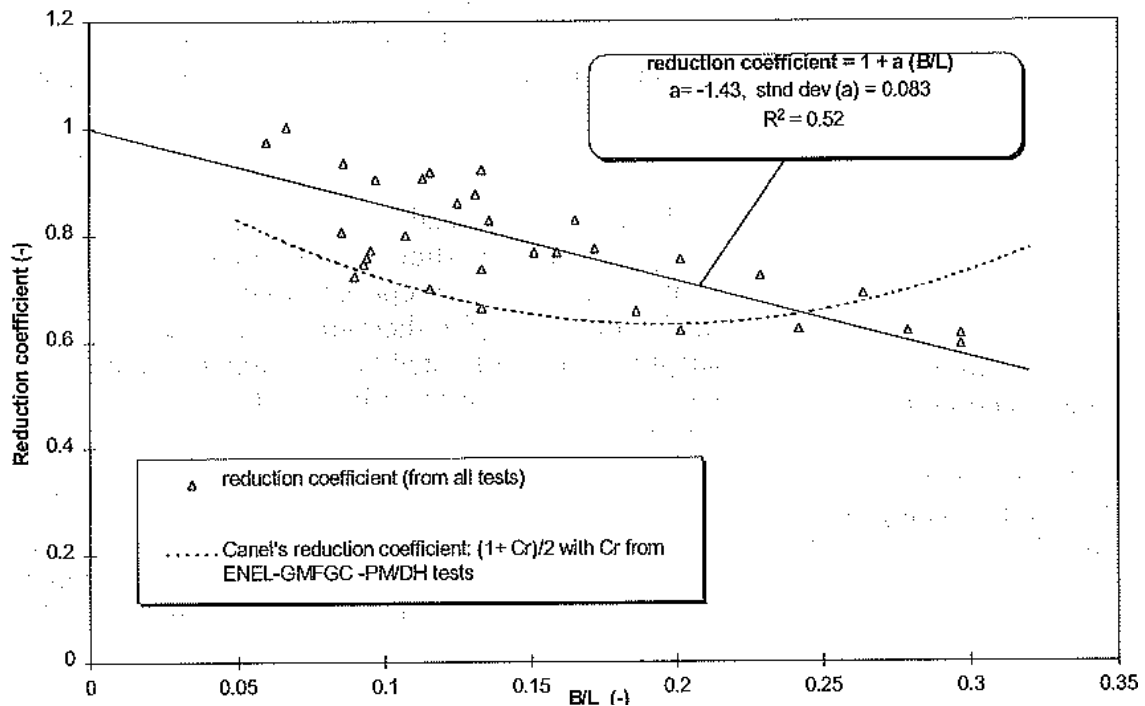


Figura 13. Coeficient de reducció (Canel) i modificació (dades empíriques).  
 Font: Coastal Structures 99'

#### Nova formulació:

Es van realitzar diagrames de pressions i de forces totals a partir de les dades dels assajos del model 2D dels calaixos de *Dieppe*. Els anàlisis es van realitzar amb d'intensió d'aconseguir les següents expressions:

- \* Màxima Força Horitzontal a les dues cares de la paret perforada:  $F_{ext}$  i  $F_{int}$
- \* Màxima Força Horitzontal a la paret posterior:  $F_r$
- \* Màxima Força Total al calaix:  $F_{tot}$ , calculada mitjançant una suma algebàrica de les forces simultànies:  $F_{ext}$ ,  $F_{int}$  i  $F_r$ .

Les series històriques dels assajos mostren que els màxims de  $F_{ext}$ ,  $F_{int}$  i  $F_r$  es produeixen de forma esglaonada i no a la vegada. Aquest desfasament depèn del període de l'onatge i de la relació  $B/L$ .

Per a ones curtes el màxim de les forces apareix després que la cresta de l'ona incident hagi assolit el parament exterior del dic i abans que arribi a la paret posterior del fons de la cambra. Per tant, la posició del màxim de forces en el temps depèn tant de la longitud com de l'amplada de la cambra.



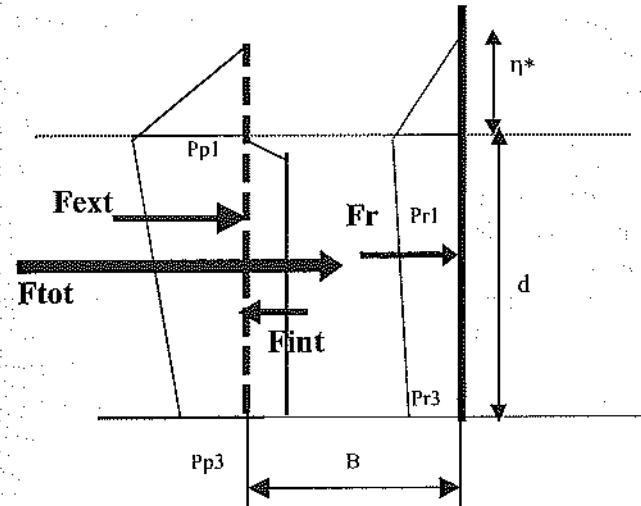


Figura 14. Diagrama de pressions sobre les diferents parets del dic vertical.  
Font: Coastal Structures 99'

Tenint en compte el desfasament entre les pressions al parament extern i intern dels calaixos es va desenvolupar un mètode específic de càlcul. Aquest nou mètode, basat també en la formulació de Goda-Takahashi i aplicable per a ones impulsives, requereix un factor de modificació relacionat amb el càlcul de forces a cada paret i introdueix un nou factor  $\chi$  lligat al desfasament. Aquesta millora permet evitar triar entre les 3 fases de l'onatge com deia Takahashi. Aquest nou mètode, aplicable per relacions  $B/L < 3,5$  s'aplica de la següent manera:

(A) Càlcul del run-up sobre les parets verticals

Es calcula el paràmetre  $h_c^*$  incloent l'efecte d'ultrapassament mitjançant la fórmula de Goda  $h_c^* = \min\{\eta^*, h_c\}$ . El run-up es modifica tenint en compte les particularitats de l'estructura excepte l'angle  $\beta$  d'incidència de l'onatge que no aporta cap millora en aquest paràmetre pel cas dels models Goda 2D.

$$\eta^* = 0,75(1 + \cos\beta)\lambda_{i1}H_D \quad (3.5)$$

On  $\lambda_{i1} = \lambda_{p1} = 0,42$  per a la paret perforada i  $\lambda_{i1} = \lambda_{p1} = (0,7 - B/L)^2$  per la paret posterior.

(B) Càlcul dels paràmetres de pressió

$$\alpha_1 = 0,6 + 0,5[2kh/\sinh(2kh)]^2 \quad (3.6)$$

$$\alpha_2 = \min\{(1 - d/h_b)(H_D/d)^2/3, 2d/H_D\} \quad (3.7)$$

$$\alpha_3 = 1 - (h'/h)[1 - 1/\cosh(kh)] \quad (3.8)$$

$$\alpha_4 = 1 - h_c^*/\eta^* \quad (3.9)$$

$$h_c^* = \min\{\eta^*, h_c\} \quad (3.10)$$

$$\alpha^* = \max\{\alpha_1, \alpha_2\} \quad (3.11)$$

## (C) Càlcul del diagrama de pressions

- \* Per la paret perforada:

$$p_{p1} = 0,5(1 + \cos \beta)(0,42\alpha_1 + (B/2L)(1 + \alpha^*) \cos^2 \beta)\varpi_0 H_D \quad (3.12)$$

$$p_{p3} = \alpha_3 \cdot p_{p1} \quad (3.13)$$

$$p_{p4} = \alpha_4 \cdot p_{p1} \quad (3.14)$$

- \* Per la paret posterior:

$$p_{r1} = 0,5(1 + \cos \beta)((0,7 - B/L)^2 \alpha_1 + (0,43 - B/L)(1 + \alpha^*) \cos^2 \beta)\varpi_0 H_D \quad (3.15)$$

$$p_{r3} = \alpha_3 \cdot p_{r1} \quad (3.16)$$

$$p_{r4} = \alpha_4 \cdot p_{r1} \quad (3.17)$$

## (D) Càlcul de les forces

- \* Força a la paret perforada:

$$F_p = [(p_{p1} + p_{p3}) d/2 + (p_{p1} + p_{p4}) h_c^*](1 - n) \quad (3.18)$$

- \* Força a la paret posterior:

$$F_r = (p_{r1} + p_{r3}) d/2 + (p_{r1} + p_{r4}) h_c^* \quad (3.19)$$

- \* Força total resultant

$$F_{tot} = \chi(F_p + F_r) \quad (3.20)$$

$$\chi = 1 - 0,36(B/L) + 7,4(B/L)^2 - 62,1(B/L)^3 + 116,3(B/L)^4 \quad (3.21)$$

Així doncs tenim tres mètodes diferents de predir les forces que poden ser considerats com a complementaris:

- \* La primera aproximació ens porta una nova fórmula per calcular les càrregues totals. Té una forma simple i per tant és bastant senzilla d'utilitzar, i s'adapta força bé tant al sistema de calaix d'una única cambra (OCS) com al sistema de calaix multi cambra (MCS).
- \* La segona aproximació s'ha basat en la modificació de l'alçada d'ona per introduir-la a la formulació de Goda. La principal avantatge d'aquesta formulació recau a la seva simplicitat, doncs no s'ha de modificar el disseny típic de la formulació de Goda.
- \* La tercera aproximació és bastant més detallada que les anteriors, doncs intenta descriure la distribució de pressions a cada cara del mur, on la força total es pot repartir per tot el mur al igual que les càrregues.

Per altra banda, els mesuraments instantanis de les pressions destaquen la importància de les forces negatives a la cara interna de la paret perforada per certes fases de l'onatge. Extret de [7].



**CAPÍTOL 4**

---



## Estudi i disseny d'un dic vertical amb pèndul invertit al parament exterior

En aquest apartat es presenten els models amb els que s'ha treballat amb els assajos físics, així com les condicions marítimes utilitzades. S'explica també on s'han realitzat aquests assajos i els criteris que s'han utilitzat per construir-los. Es fixen uns criteris que marquen el desenvolupament del disseny fixant hipòtesis de partida tenint en compte les consideracions geomètriques, estructurals i ambientals del procés.

L'objectiu és determinar la interacció existent entre el disseny conceptual i geomètric del calaix i la hidrodinàmica derivada de la interacció de l'onatge amb les làmines pendulars ja sigui en la part frontal com sobretot al pati interior. Respecte als aspectes hidrodinàmics interessa conèixer el comportament del sistema com a estructura absorbent o esmorteïdora de la reflexió de l'onatge.

Per crear aquests dos models s'han tingut en compte diferents casuístiques per intentar abastar el màxim de característiques tan marítimes, com mecàniques i geomètriques. Donat que aquests dos models seran la base de tot l'estudi és important que ens serveixin per estudiar el màxim de casos diferents possibles, i així l'estudi sigui més fiable.

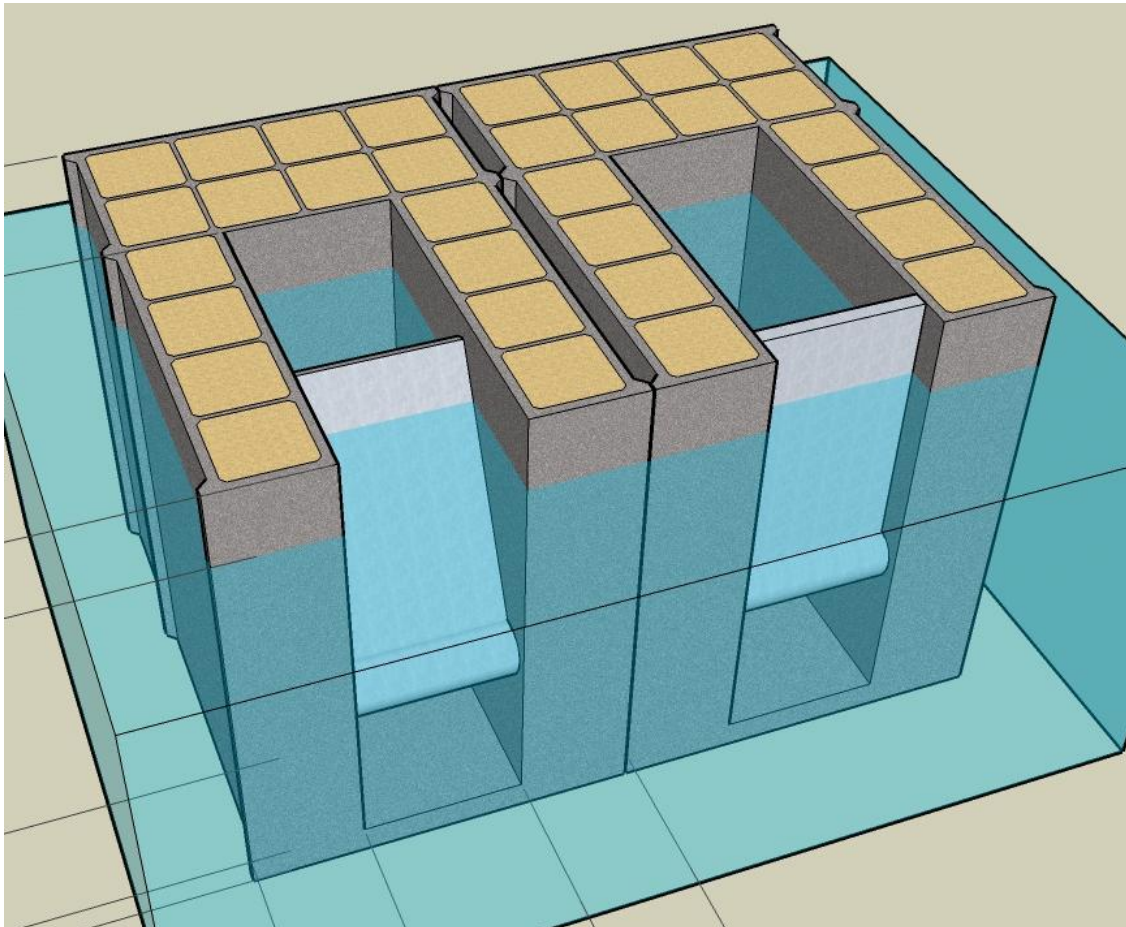


Figura 15. Disseny del Prototip

## Definició de les característiques marítimes

Les característiques marítimes són l'ambient on es vol construir la obra civil, i determinen part de les sol·licitacions a les que estarà sotmesa aquesta. Estan formades per un còmput de dades tals com: períodes, alçades d'ona, calats, etc. És vital conèixer-les abans de començar a projectar, doncs són totalment determinants per a qualsevol estructura marítima.

El que es va realitzar prèviament va ser recollir dades de característiques marítimes representatives de diferents zones per saber quines condicions s'havien de reproduir al canal per fer l'estudi més real. D'aquest recull de dades va sortir-ne les diferents configuracions que s'han usat en aquest estudi.

Les condicions d'onatge reproduïdes als assajos han estat diferents per a cada model. En un primer moment no s'havia encara concretat si el model serviria per al clima mediterrani o el clima atlàntic, així que es van escollir unes condicions intermèdies de calat i alçada d'ona.

Les condicions d'onatge pel primer model foren una alçada d'ona fixa  $H = 17 \text{ cm}$ , un calat també fixa  $h = 35 \text{ cm}$ , i un ventall de períodes des de  $1,13 \text{ s}$  fins a  $1,70 \text{ s}$ . Les dimensions dels models s'adapten a la geometria del canal hidràulic on s'han realitzat els assajos.

Posteriorment es va decidir que se centraria l'estudi en el cas de clima mediterrani, així que es van tornar a dissenyar les condicions de l'onatge per reproduir-lo de la manera més fidel possible. Es va considerar un ventall de períodes de  $0,74$  a  $1,48$  segons per una alçada d'ona fixa  $H = 7,69 \text{ cm}$ , un calat de  $33,8 \text{ cm}$  i onatge regular.

Per dimensionar aquestes condicions marítimes es va recórrer a un estudi realitzat per la *Universidad Politécnica de Madrid* (UPM), la qual es va dedicar a recollir tant les alçades d'ona com els períodes de pic, les cotes de coronació i els tipus de dic més freqüents de la zona del Mediterrani, com es mostra a la següent taula.

Extret de [10].

Emplaçament	Tipologia	Període de retorn	$H_s$ (m)	$T_P$ (s)	Cota de Coronació	Ample de calaix
Botafoc	Vertical	308 anys	6.80	12	+ 7.00 m	21.60
Màlaga	Vertical	300 anys	6.10	11 – 13	+ 10.00 m	21.21
Escombreres	Vertical	300 anys	8.09	11 – 15	+ 8.00 m	24.50
Sagunt	Vertical	475 anys	6.30	11	+ 14.00 m	19.60
València	Vertical	300 anys	6.60	12	+ 8.00 m	19.60
Castelló	Vertical	224 anys	7.24	12	+ 9.00 m	15.25
Nova Bocana	Vertical	500 anys	6.57	8 – 12	+ 8.00 m	19.60
Dic Sud	Vertical	448 anys	6.29	11	+ 11.00 m	24.40
Tarragona	Vertical	310 anys	7.00	14	+ 11.50 m	23.00

Figura 16. Dades del Mediterrani. Font: Universidad Politécnica de Madrid

## Criteris de semblança

Per tal de que els resultats del model es corresponguin amb el prototip, s'han de complir diversos criteris de semblança (geomètrica, cinemàtica i dinàmica).

### (A) Semblança geomètrica

La semblança geomètrica s'aconsegueix quan les dimensions del model són proporcionals a les del prototip, mitjançant una escala geomètrica  $n_L = L_m/L_p$ , on  $L$  és la longitud (horitzontal o vertical) i els subíndex  $m$  i  $p$  fan referència al model i al prototip respectivament.

Aquesta semblança és fàcil de complir un cop es decideix l'escala a la que es vol treballar. Simplement s'aplica l'escala al prototip per aconseguir les dimensions del model.

### (B) Semblança cinemàtica

La semblança cinemàtica implica que el moviment i la trajectòria de les partícules homòlogues han d'estar en proporció. Així doncs, definim de forma similar a l'escala de longituds  $n_L$  les escales d'acceleració  $n_a$ , velocitat  $n_v$ , i temps  $n_t$ , com:

$$n_a = a_m/a_p \quad (4.1)$$

$$n_v = v_m/v_p \quad (4.2)$$

$$n_t = t_m/t_p \quad (4.3)$$

Per a que es compleixi la semblança cinemàtica s'han de satisfer les equacions:

$$n_v = n_a \cdot n_t \quad (4.4)$$

$$n_L = n_v \cdot n_t \quad (4.5)$$

Per un cas determinat, un cop fixada l'escala de longituds  $n_L$ , i prenent  $n_a = 1$  (procediment habitual ja que l'acceleració de la gravetat no pot ser variada), s'obté de les relacions anteriors les relacions:

$$n_v = (n_L)^{1/2} \quad (4.6)$$

$$n_t = (n_L)^{1/2} \quad (4.7)$$

### (C) Semblança dinàmica

La semblança dinàmica requereix que la massa i les forces sobre les partícules d'un fluid en el model i el prototip estiguin en proporció. Una condició necessària però no suficient per que es compleixi la semblança dinàmica és que es compleixin a la vegada la semblança geomètrica i la semblança cinemàtica.

La segona llei de Newton estableix que la relació que pateix una partícula és igual a la suma de forces exteriors que actuen sobre la mateixa:

$$m \frac{dv}{dt} = \sum F_j^{ext} \quad (4.8)$$

Considerant que les forces que actuen sobre un fluid expressades en termes de les mateixes unitats són:

$$* \text{ Inèrcia: } F_i = m \cdot a = \rho \cdot L^3 \cdot \frac{v^2}{L} = \rho \cdot L^2 \cdot v^2 \quad (4.9)$$

$$* \text{ Gravat: } F_g = m \cdot g = \rho \cdot L^3 \cdot g \quad (4.10)$$

$$* \text{ Viscositat: } F_f = \tau \cdot A = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \cdot L^2 = \mu \cdot \frac{v}{L} \cdot L^2 = \mu \cdot v \cdot L \quad (4.11)$$

$$* \text{ Tensió superficial: } F_s = \sigma \cdot L \quad (4.12)$$

$$* \text{ Elasticitat: } F_e = E \cdot A = E \cdot L^2 \quad (4.13)$$

$$* \text{ Pressió: } F_p = p \cdot A = p \cdot L^2 \quad (4.14)$$

On  $\rho$  és la densitat del fluid,  $L$  és una dimensió de longitud,  $\tau$  és la tensió tangencial,  $\mu$  és la viscositat dinàmica,  $\frac{dv}{dy}$  és la velocitat diferencial a través d'un gruix  $dy$  de fluid,  $\sigma$  és la tensió superficial,  $E$  és el Mòdul d'Elasticitat del fluid,  $a$  és l'acceleració d'una partícula de fluid,  $p$  és la pressió i  $A$  és l'àrea sobre la que actua la pressió.

Es compleix que:

$$F_i = F_g + F_f + F_s + F_e + F_p \quad (4.15)$$

Per tant, existirà semblança dinàmica entre el fluid del model i del prototip si es compleix que:

$$\frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} = \frac{(F_g + F_f + F_s + F_e + F_p)_m}{(F_g + F_f + F_s + F_e + F_p)_p} \quad (4.16)$$

De totes les forces presents en el comportament d'un fluid en moviment, les inercials són les més rellevants. Per a determinar, entre les restants, quines són les forces predominants i quines les secundàries, es compara l'importància relativa de cadascuna respecte les forces d'inèrcia. Cal doncs, definir primerament els paràmetres adimensionals següents:

\* Forces inercials / Forces gravetat = Número de Foude

$$\frac{(F_i)}{(F_g)} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{\rho \cdot L^3 \cdot g} = \frac{v^2}{L \cdot g} \quad (4.17)$$

\* Forces inercials / Forces viscoses = Número de Reynolds

$$\frac{(F_i)}{(F_f)} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{\mu \cdot L \cdot v} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (4.18)$$

\* Forces inercials / Forces de tensió superficial = Número de Weber

$$\frac{(F_i)}{(F_s)} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{\sigma \cdot L} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L}{\sigma} \quad (4.19)$$



\* Forces inercials / Forces elàstiques = Número de Cauchy

$$\frac{(F_i)}{(F_e)} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{E \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot v^2}{E} \quad (4.20)$$

\* Forces inercials / Forces de pressió = Inversa del Número d'Euler

$$\frac{(F_i)}{(F_e)} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{p \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot v^2}{p} \quad (4.21)$$

Als models hidràulics d'enginyeria de costes, les forces de pressió són considerades dependents de les altres forces a l'equació (4.15), i per tant no s'utilitzen per determinar l'escala de treball.

Una altra forma de definir la semblança dinàmica total seria exigir que es conservés cadascun d'aquests números (Foude, Reynolds, Weber, Cauchy i Euler) en el model, que és el mateix que dir:

$$\frac{(Fr)_m}{(Fr)_p} = \frac{(Re)_m}{(Re)_p} = \frac{(We)_m}{(We)_p} = \frac{(Ca)_m}{(Ca)_p} = \frac{(Eu)_m}{(Eu)_p} = 1 \quad (4.22)$$

Tots aquests ràtios han de ser considerats independents entre ells excepte un que es determina una vegada que els altres ja s'han establert. Generalment el ràtio de les forces de pressió és el que es pren com a independent respecte els altres. Pel que fa a les forces elàstiques, aquestes prenen importància quan són suficientment grans com per produir canvis de compressibilitat al fluid.

Com que el fluid és considerat normalment incompressible als problemes d'enginyeria de costes, menyspreem en principi el ràtio de forces elàstiques a l'hora d'escalar el model. L'excepció a aquesta pràctica és l'estudi de l'acció d'esforços sobre una estructura causats per la compressió de l'aire que queda atrapat a les onades quan trenquen contra ella.

Per tant podem dir que la conservació dels tres números següents, Froude ( $Fr$ ), Reynolds ( $Re$ ) i Weber ( $We$ ) és regla habitual per obtenir la semblança dinàmica dels models d'enginyeria de costes, tot i que estrictament això segueix essent impossible. Per il·lustrat aquesta situació se suposa un cas concret en el qual en número de Froude i el número de Reynolds tenen el mateix valor en el model i en el prototip. S'haurien de complir les següents igualtats:

$$\frac{(Fr)_m}{(Fr)_p} = \frac{(Re)_m}{(Re)_p} = 1 \quad (4.23)$$

Per tant  $n_{Fr} = n_{Re} = 1$ . Considerant que la gravetat no varia ( $n_g = 1$ ), s'obté per la conservació del número de Froude que  $n_{Fr} = \frac{n_v^2}{n_L \cdot n_g} = \frac{n_v^2}{n_L \cdot 1} \Rightarrow n_v = n_L^{1/2}$  (coincident

amb la condició cinemàtica), i substituint aquesta relació a la condició de conservació del número de Reynolds, s'obtindria que:

$$n_L^{3/2} = \frac{n_\mu}{n_\rho} = n_\delta \quad (4.24)$$

És a dir que per que fossin proporcionals les forces de gravetat i les viscoses amb respecte a les d'inèrcia, necessariem models amb un fluid de viscositat  $\delta = \frac{\mu}{\rho}$  que complís l'equació anterior, sent  $n_L$  la relació existent entre les longituds del model i del prototip. Per exemple, amb una escala  $n_L = 1/10$  necessariem modelar un fluid de viscositat cinemàtica aproximadament 30 vegades menor a la del fluid del prototip. Assumint que el fluid del prototip és aigua no existeix cap fluid manejable que satisfaci aquesta condició.

Per aquest motiu, en funció de quines siguin les forces predominants per al fenomen considerat, partim de la conservació d'un o altre número: Froude, Reynolds o Weber (en models d'enginyeria portuària generalment és el de Froude), procurant que els inevitables efectes d'escala tinguin lloc per a aquelles forces la rellevància de les quals sigui menyspreable dins l'estudi. Extret de [1] i [11].

### Estudi del tipus d'escala condicionat pel canal hidràulic

Els assajos físics s'han realitzat al Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). En el present laboratori s'hi ha instal·lat darrerament el nou canal de generació d'onatge artificial a petita escala anomenat "CIEMito" (Canal d'Investigació i Experimentació Marítima) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).



Figura 17. Canal de simulació d'onatge regular CIEMito

El canal CIEMito disposa de 18 metres de longitud, 0,38 metres d'amplada i està dissenyat per treballar amb un calat de 35 centímetres. Té el fons i les parets transparents per poder treballar així amb tecnologia no intrusiva. Està equipat amb un generador d'onatge de tipus pistó.

Aquestes característiques geomètriques són determinants per construir el model ja que les dimensions del canal delimiten les dimensions dels models que s'hi poden assajar. L'ample màxim del calaix i el calat venen directament fixats per les dimensions del canal. Per tant l'escala serà el producte de la relació entre el nostre prototip i les mides màximes del CIEMito.

Per poder relacionar les variables d'estudi amb els paràmetres corresponents a l'onatge incident, s'ha utilitzat un algoritme de separació d'onatge incident reflectit segons el mètode Mansard i Funke (1980). L'explicació del mètode es troba més endavant, al capítol 6.

El calibratge diari dels sensors emprats al canal s'ha realitzat mitjançant l'ajust d'una funció lineal de la senyal rebuda amb diferents nivells d'aigua a través d'un oscil·loscopi.

## Estudi dels factors d'escala

Per a la realització dels assajos bidimensionals en els dos models reduïts s'ha emprat la similitud de Froude amb les dues escales sense distorsió. Aquestes escales permeten reproduir fidelment les característiques estructurals i hidrodinàmiques del dic conservant la similitud de Froude, que és la que resulta més rellevant per als fenòmens hidràulics condicionats fonamentalment per les forces d'inèrcia i gravetat.

Per la major part dels fenòmens associats als fluxos oscil·latoris de superfície lliure, com ara la refracció, la difracció i la reflexió, és més que adequada la similitud de Froude.

Per què els resultats dels models siguin vàlids, i no introdueixin possibles efectes d'escala, a part del número de Froude (semblança geomètrica), és necessari que els altres números adimensionals que no es conserven (Número de Reynolds i Número de Weber, per la semblança dinàmica) tinguin un ordre de magnitud que faci completament menyspreables les forces que representen (forces viscoses per Reynolds i forces de tensió superficial per a Webber).

Pel nostre cas, es demostra fàcilment que tant les forces viscoses com les de tensió superficial són menyspreables respecte les forces d'inèrcia i de gravetat, evitant així els possibles efectes d'escala en els resultats obtinguts.

Ambdós models reproduïxen un calaix perforat amb un sistema de pèndul a la zona oberta al mar. La modelització del pèndul s'ha realitzat conservant les característiques estructurals i hidrodinàmiques del dic en prototip (conservant la similitud de Froude),

essent important la reproducció acurada del pes i la distribució de masses per que el model reproduïxi correctament el moment d'inèrcia.

En algunes fases de l'estudi s'han reproduït coaccions del pèndul mitjançant molles. La correcta reproducció de la força elàstica de les coaccions ha de ser modelada mitjançant el criteri d'escala de Cauchy, qui estableix que la proporció entre les forces inercials i les forces elàstiques ha de ser igual en model i prototip. Tot i així s'ha optat per considerar les molles com un desplaçament unidireccional doncs el comportament elastoplàstic tridimensional de les molles no té un dimensionament trivial.

Per motius de confidencialitat no es poden donar les dades del prototip ni les escales a les que s'ha treballat. De totes formes els resultats se centraran en els models i per tant no es necessari conèixer aquestes dades per comprendre l'estudi.

## Dimensionament dels calaixos

S'han realitzat dos models diferents de calaixos perforats amb pèndul invertit per realitzar els assajos de reflexió. La raó és poder avaluar els comportaments que es produeixen en climes sensiblement diferents sobre diferents geometries. La major variabilitat dels paràmetres ens dona una visió més global del problema i ens permet ser més objectius. D'aquesta forma es pot apreciar quines variacions es produeixen tant en funció de diferents geometries com de diferents sol·licitacions mareomotrius.

Els dos models han estat construïts a les instal·lacions de l'empresa INHA pels seus tècnics. Per fer-ne les estructures s'ha emprat metacrilat per a les parets laterals i resina per a fer la berma de protecció. Les comportes s'han construït emprant diferents materials per així poder avaluar els diferents comportaments mecànics. Tant dels materials com de les dimensions de les diferents comportes utilitzades se'n parlarà en el pròxim apartat.

### Model 1

Ha estat dissenyat per a un clima mig entre mediterrani i atlàntic i per tant, la seva longitud de pati ve condicionada per aquest fet. La longitud de pati es dimensiona amb la condició de que sigui prou gran per que hi càpiga un quart de la longitud d'ona de l'ona incident. Com que la longitud d'ona és funció del període i s'assaja amb tres períodes diferents es va decidir construir el calaix amb tres longituds de pati diferents. La paret que separa els patis és una làmina mòbil de metacrilat opac que es pot canviar de posició manualment per realitzar els diferents assajos.

El model mesura 118,5 centímetres de longitud, 58 centímetres d'alçada i conta amb una banqueta de 3,5 centímetres d'alçada. Té tres longituds de pati diferents, de 54, de 82 i de 117 centímetres de longitud. En la següent figura es mostra un perfil longitudinal i un transversal del model. En el perfil longitudinal la part esquerra és la part on hi ha d'anar la comporta, la part en contacte directe amb l'onatge.



Figura 18. Pati llarg (esquerra), pati mig (centre) i pati curt (dreta) del Model 1

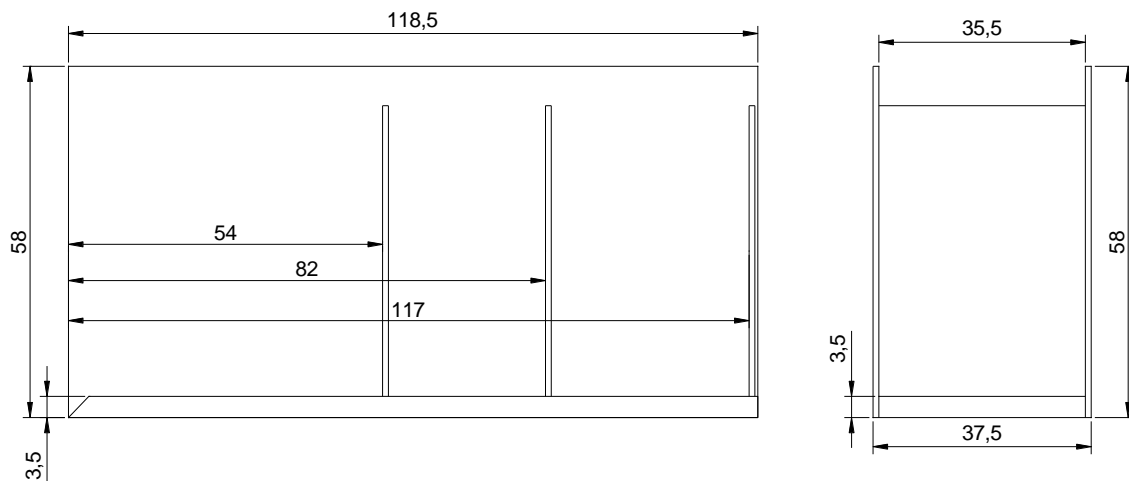


Figura 19. Secció longitudinal (esquerra) i transversal (dreta) del Model 1 (dades en centímetres)



Figura 20. Foto del perfil longitudinal del Model 1

Model 2

En aquest cas el model s'ha dissenyat per a un clima mediterrani. Com s'observa a la figura les longituds de pati només són dos tot i assajar amb tres períodes diferents. Es va optar per aquesta solució ja que la longitud de pati resultant del càlcul de la longitud d'ona major era massa gran. No es possible construir un calaix amb aquest pati a la realitat doncs no hi ha caixoners al país que construeixin calaixos d'aquestes dimensions. En aquest model la làmina que separa els patis també és mòbil així que es pot posar i treure en funció de si es vol assajar amb pati curt o llarg.

El model mesura 57,92 centímetres de longitud i 58 centímetres d'alçada. Té dues longituds de pati diferents, de 41,54 i de 56,92 centímetres de longitud. En les dues figures que es troben a continuació es mostra el perfil longitudinal i el transversal del model amb les comportes de radi curt i després amb les comportes de radi llarg. En el perfil longitudinal la part esquerra és la part en contacte directe amb l'onatge.

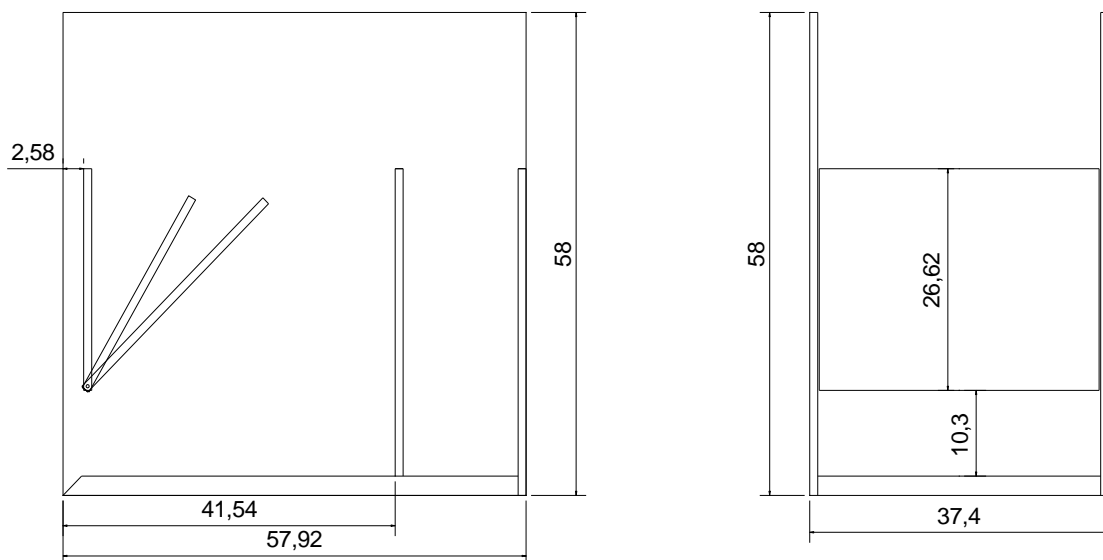


Figura 21. Secció longitudinal (esquerra) i transversal (dreta) del Model 2, amb les comportes de radi de gir curt (dades en centímetres)

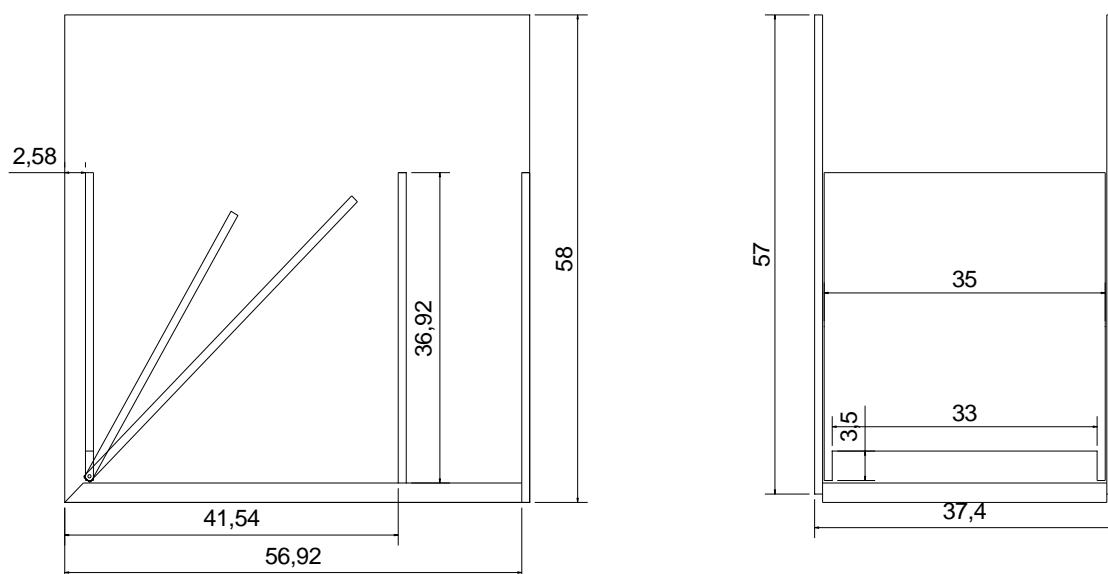


Figura 22. Secció longitudinal (esquerra) i transversal (dreta) del Model 2, amb les comportes de radi de gir llarg (dades en centímetres)

## Estudi dels diferents materials de la comporta

Quan es dissenya la comporta del dic es pensa en les diferents possibilitats que ofereixen els diferents materials davant de l'acció permanent de l'onatge. Cal un material resistent als impactes i a l'hora prou lleuger com per que es pugui moure amb la acció mareomotriu. Aquesta combinació d'aptituds fisico-mecàniques és la primera premissa per començar a triar possibles candidats. Es pensa en diferents opcions, basades sempre en els materials més comuns en el món de la construcció civil (formigó i acer). La motivació per usar aquests elements és que les seves propietats mecàniques són ja ben conegudes i per tant es pot deduir quin serà el seu comportament quant a resistència i funcionament.

Es busquen tres opcions diferents de comporta. Una a base de formigó en massa, una altra feta totalment d'acer, i una tercera que estigui construïda amb un material més lleuger. L'opció del formigó en massa és una opció lògica, doncs seria tal com es construiria el dic vertical perforat si fos un calaix tipus Jarlan, i per tant, per què no utilitzar el mateix material tot i que el parament exterior sigui mòbil en comptes de rígid, i funcioni com un pèndul invertit. L'opció de l'acer consisteix en una comporta buida per dins, amb cuirassa d'acer, i uns possibles compartiments interiors per ser reomplerts amb aigua de mar fins a aconseguir una inèrcia i una densitat desitjada. La opció del material lleuger, que funcioni com un flotador, s'utilitza per mostrar la importància del pes propi de la comporta quan al bon funcionament mecànic d'aquesta.

Per a construir els models de les diferents comportes del prototip s'han usat diferents materials. Per a fer el model de la comporta de formigó en massa s'ha utilitzat una resina especial per tal d'aconseguir la mateixa densitat que té el conjunt formigó en massa + armat mínim, i s'ha obtingut una resina de densitat  $2410 \text{ Kg/m}^3$ . Per a fer el model de l'acer s'ha utilitzat directament acer, amb densitat  $7665 \text{ Kg/m}^3$ . I per realitzar el model del material lleuger s'ha emprat una mescla de Pòrex + PVC que té una densitat de  $300 \text{ Kg/m}^3$ , la qual és notòriament inferior a les altres dues.

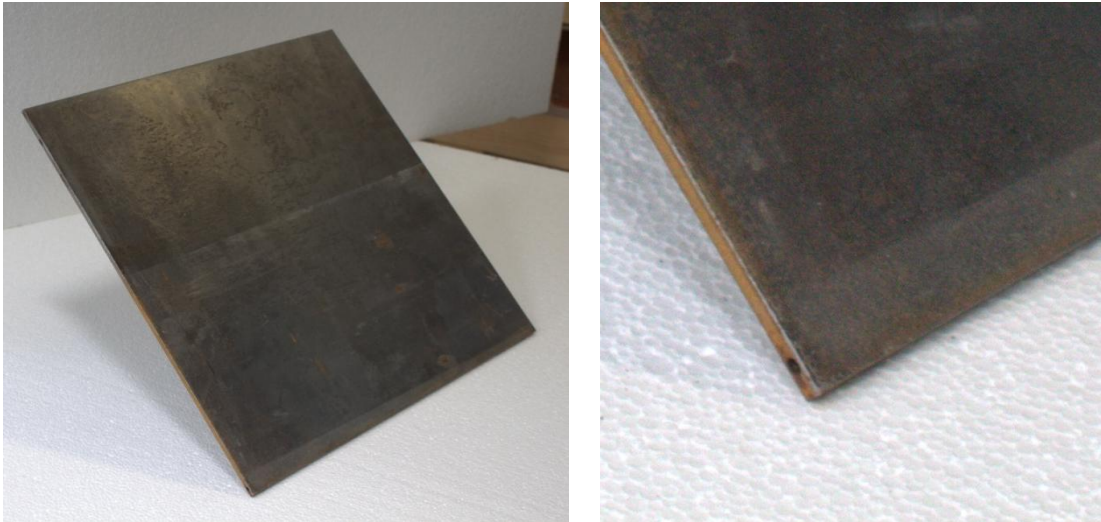
Les dimensions de les comportes han variat en funció del model i de la seva funcionalitat estructural. És a dir que a part de tenir una dimensió proporcional al model, s'han fet variacions segons el que s'espera del seu comportament. Així doncs s'ha desenvolupat el que hem anomenat longitud de radi (radi curt i radi llarg) i inclinació de la comporta (posició inicial mesurada en graus sexagesimals respecte la vertical en que la comporta se situa al començar l'assaig).

La longitud de radi és la obertura existent entre el llit del calaix i la part inferior de la comporta. Al variar la grandària de la obertura s'espera obtenir diferents resultats quant al comportament hidràulic dins del dic (agitació, sobreelevació de la làmina lliura, ultrapassament,...). En canvi la inclinació de la comporta va més enfocada cap al fenomen de la reflexió, doncs s'espera trobar una posició òptima per reflectir el menor onatge possible.

A continuació s'expliquen i es defineixen una per una les comportes utilitzades als assajos. Aquestes són diferents per a cada model, així que estan ordenades primer per un model i després per l'altre.

En el **Model 1**, s'empren tres tipus de comporta, dues d'acer (una de radi curt i una de radi llarg), i una de resina.

- \* La primera comporta d'acer és de radi llarg, mesura 34,5 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 0,5 centímetres de gruix. Pesa 4628 grams i s'ancora al model per la part inferior dels dos lloms laterals mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta.



*Figura 23. Primera comporta d'acer (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta)*

- \* La segona comporta d'acer és de radi curt, mesura 29,5 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 0,5 centímetres de gruix. Pesa 4049 grams i s'ancora al model per la part inferior dels dos lloms laterals mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta.



*Figura 24. Segona comporta d'acer (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta)*



Com es pot observar la diferència entre el radi curt i el radi llarg en aquest model és de 5 centímetres, el que equivaldria a més de 2,5 metres a la realitat, una diferència notable.

- \* La comporta de resina és també de radi curt, doncs mesura 29,5 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 1 centímetre de gruix. Pesa 2489 grams i s'ancora al model per la part inferior dels dos lloms laterals mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta.

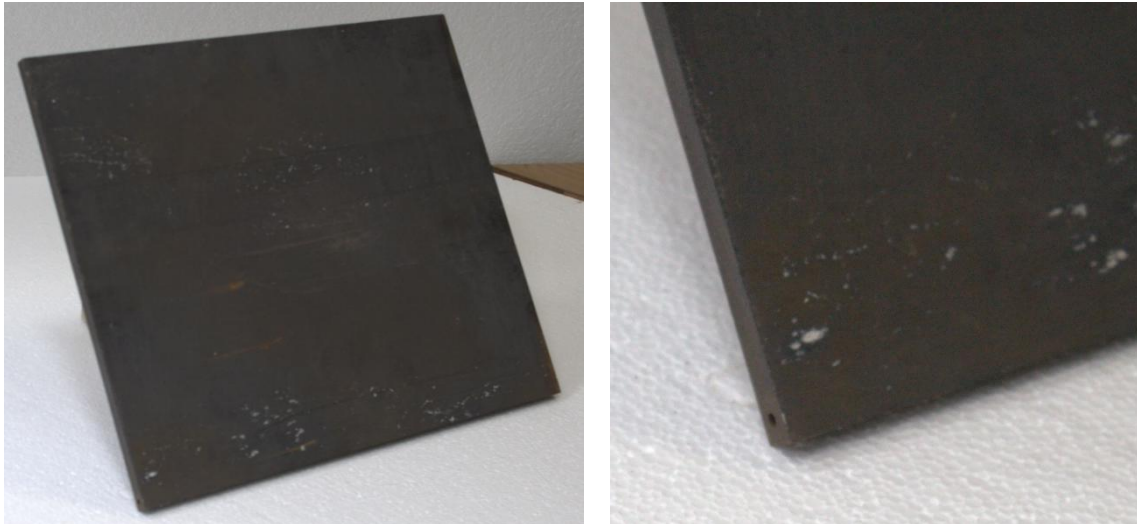


Figura 25. Comporta de resina (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta)

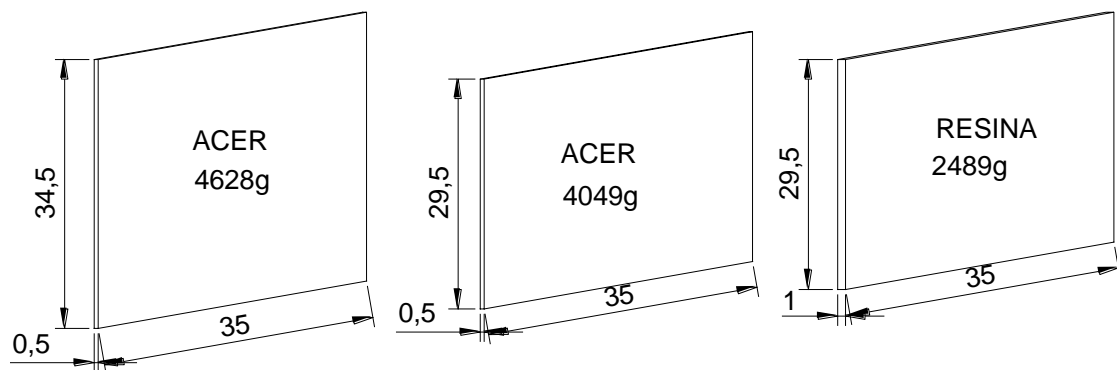


Figura 26. Comportes del Model 1 (dades en centímetres)

En el **Model 2**, s'empren vuit tipus de comporta, quatre de pòrex+PVC, i quatre de resina. De cada material n'hi ha dues de radi curt i dues de radi llarg, és a dir, dues que habiliten una obertura major entre el llit i la comporta i dues que només deixen una petita obertura. La raó per la qual n'hi ha dues de cada tipus és la inclinació inicial de la comporta.

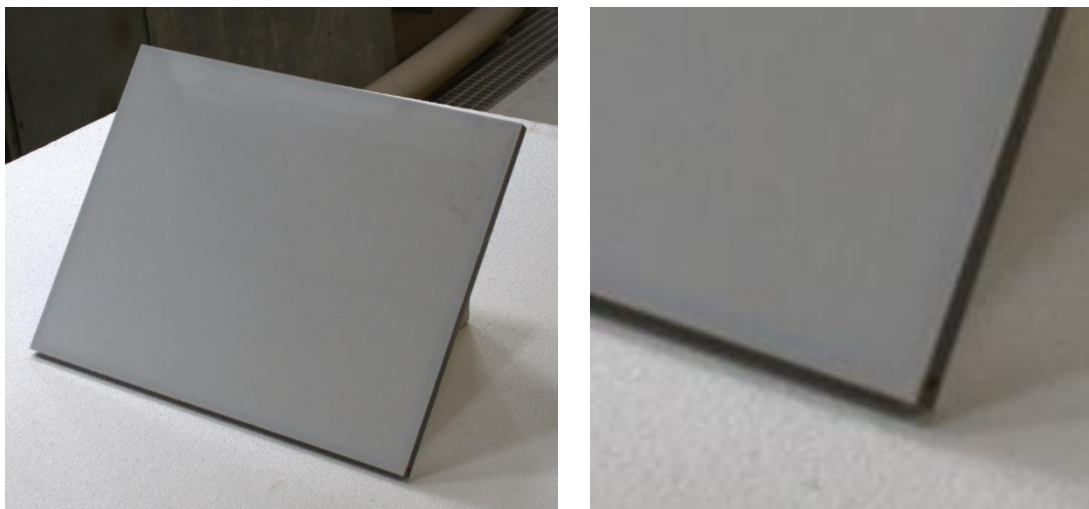
Les comportes se situen en una posició inicial de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  o  $45^\circ$  respecte la vertical. Les que se situen a  $45^\circ$  han de ser una mica més llargues que les de  $0^\circ$  i  $30^\circ$  per què per arribar a la mateixa cota necessiten ser més llargues, doncs estan collades en el mateix punt, però la pendent que formen amb la horitzontal és més suau.

- \* La primera comporta de Pòrex + PVC és de radi curt, mesura 32 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 1 centímetre de gruix. Pesa 378 grams i s'ancora al model per la part inferior dels dos lloms laterals mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta. Sempre es col·loca a 45° respecte l'horitzontal.



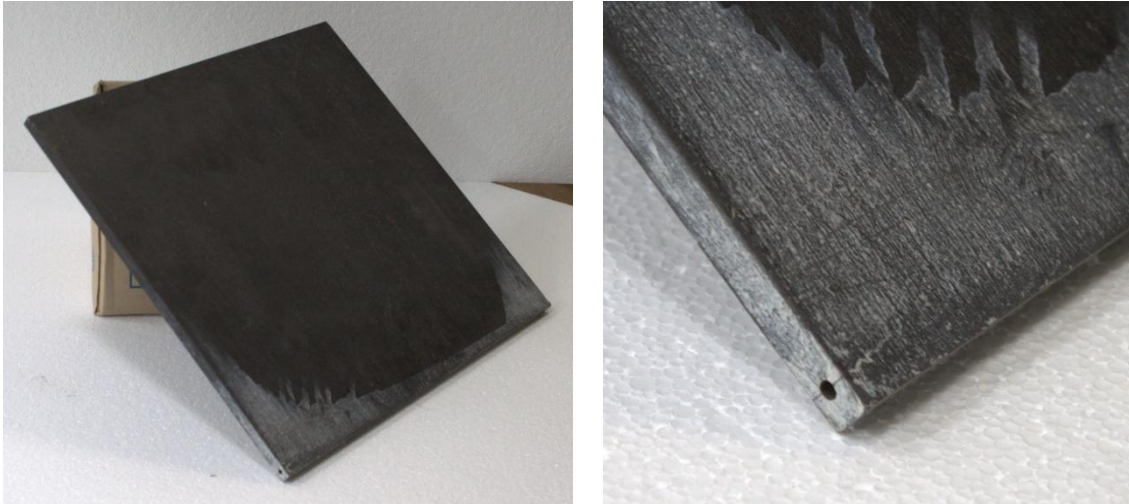
*Figura 27. Primera comporta de pòrex (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta)*

- \* La segona comporta de Pòrex + PVC és també de radi curt, mesura 26,62 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 1 mil·límetre de gruix. Pesa 320 grams i s'ancora al model per la part inferior dels dos lloms laterals mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta. Aquesta comporta es col·loca a 0° o 30° respecte la vertical i per això és més curta que l'anterior.



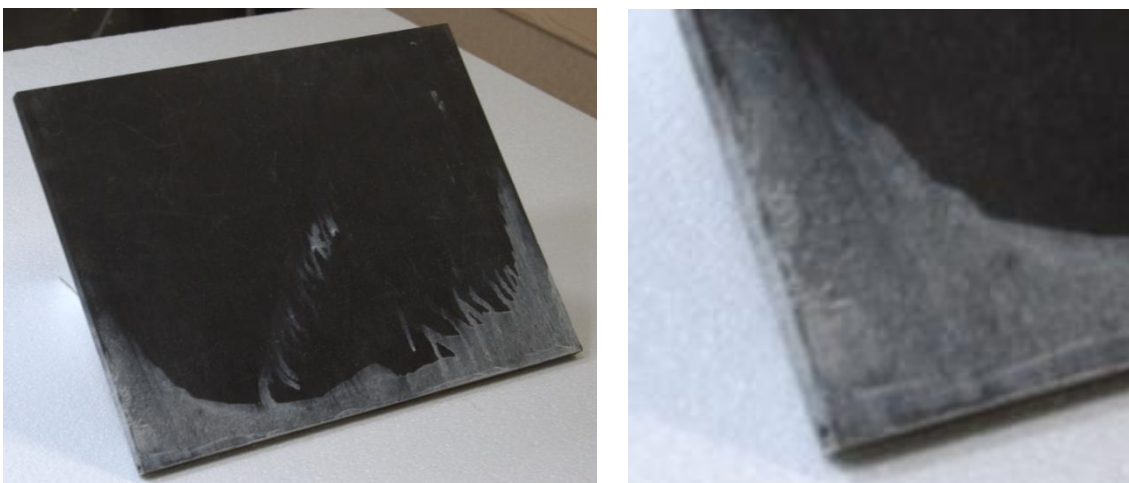
*Figura 28. Segona comporta de pòrex (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta)*

- \* La primera comporta de resina és de radi curt, mesura 32 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 0,5 centímetres de gruix. Pesa 2530 grams i s'ancora al model per la part inferior dels dos lloms laterals mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta. Sempre es col·loca a 45° respecte l'horitzontal.



*Figura 29. Primera comporta de resina (esquerra) i detall del lloc a la zona d'ancoratge (dreta)*

- \* La segona comporta de resina és també de radi curt, mesura 26,62 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 1 centímetre de gruix. Pesa 2074 grams i s'ancora al model per la part inferior dels dos lloms laterals mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta. Aquesta comporta es col·loca a 0° o 30° respecte la vertical i per això és més curta que l'anterior.



*Figura 30. Segona comporta de resina (esquerra) i detall del lloc a la zona d'ancoratge (dreta)*

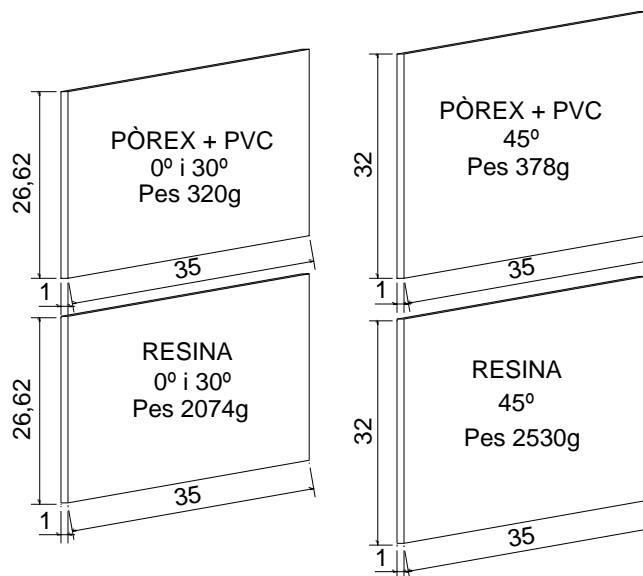


Figura 31. Comportes de radi curt del Model 2 (dades en centímetres)

- \* La tercera comporta de Pòrex + PVC és de radi llarg, mesura 47,2 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 1 centímetre de gruix. Té unes patilles de 3,5 centímetres de llarg i 1 centímetre d'ample l'extrem de les quals s'ancora al model mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta. Pesa 481,5 grams i sempre es col·loca a 45° respecte l'horitzontal.

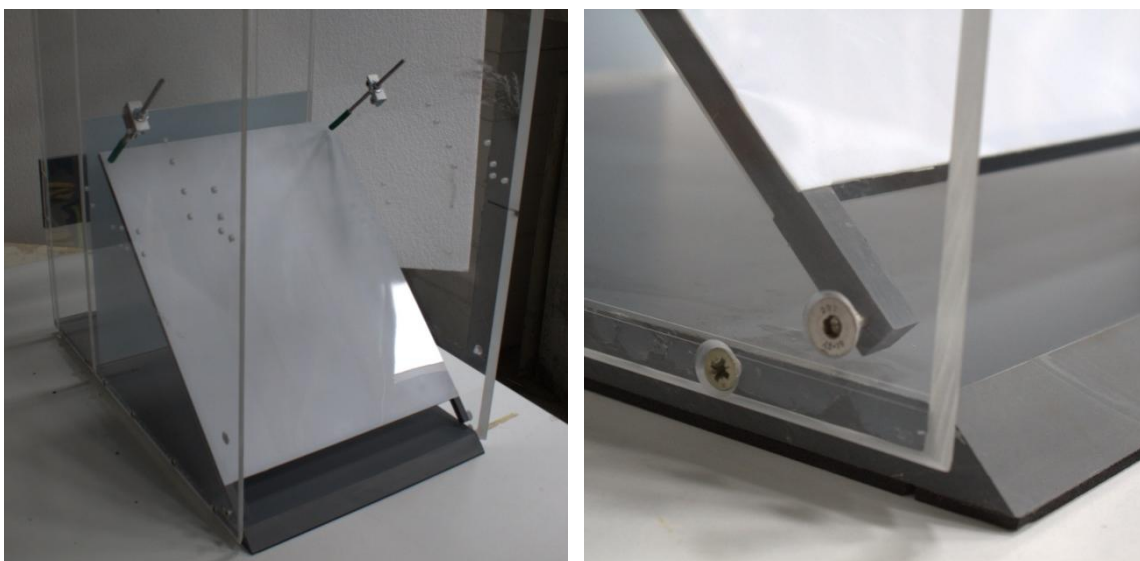


Figura 32. Tercera comporta de pòrex (esquerra) i detall del lloc a la zona d'ancoratge (dreta)

- \* La quarta comporta de Pòrex + PVC és també de radi llarg, mesura 36,92 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 1 centímetre de gruix. Té unes patilles de 3,5 centímetres de llarg i 1 centímetre d'ample l'extrem de les quals s'ancora al model mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta. Pesa 384 grams i es col·loca a 0° o 30° respecte la vertical i per això és més curta que l'anterior.

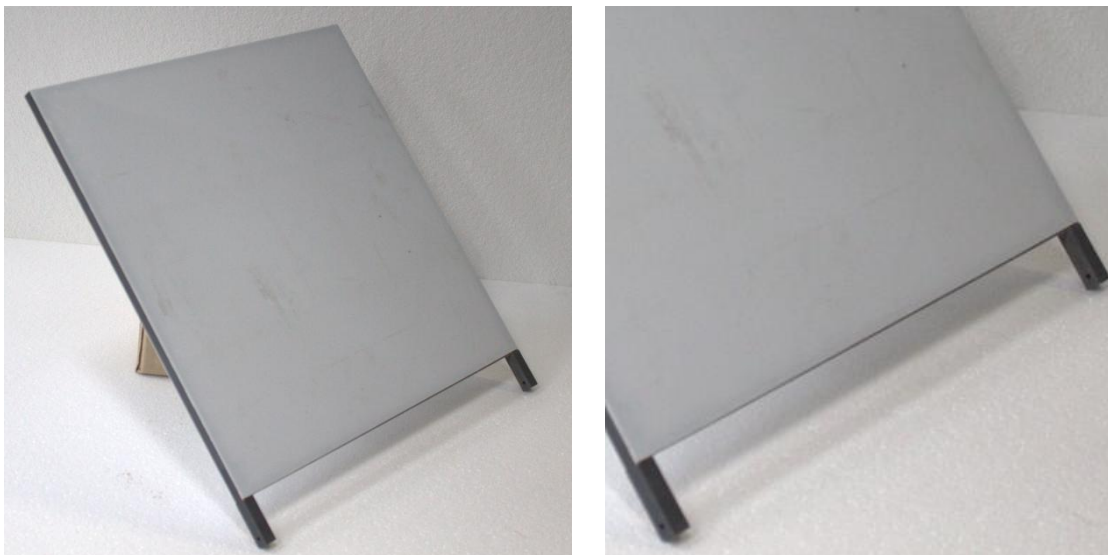


Figura 33. Quarta comporta de pòrex (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta)

- \* La tercera comporta de resina és de radi llarg, mesura 47,2 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 1 centímetre de gruix. Té unes patilles de 3,5 centímetres de llarg i 1 centímetre d'ample l'extrem de les quals s'ancora al model mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta. Pesa 3686 grams i sempre es col·loca a 45° respecte l'horitzontal.

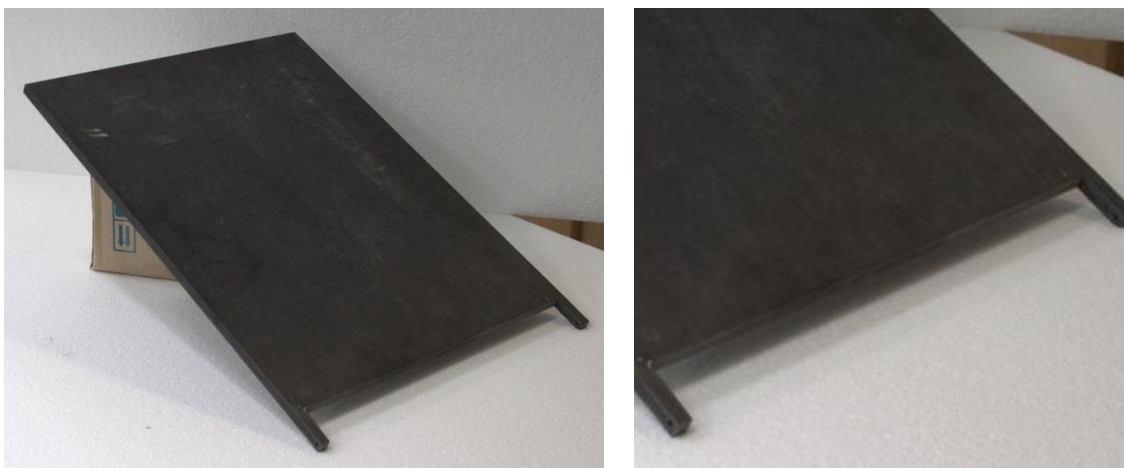


Figura 34. Tercera comporta de resina (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta)

- \* La segona comporta de resina és també de radi llarg, mesura 36,92 centímetres d'alçada, 35 centímetres d'ample i 1 centímetre de gruix. Té unes patilles de 3,5 centímetres de llarg i 1 centímetre d'ample l'extrem de les quals s'ancora al model mitjançant uns cargols que travessen la paret lateral i la collen a la comporta. Pesa 2701 grams i es col·loca a 0° o 30° respecte la vertical i per això és més curta que l'anterior.

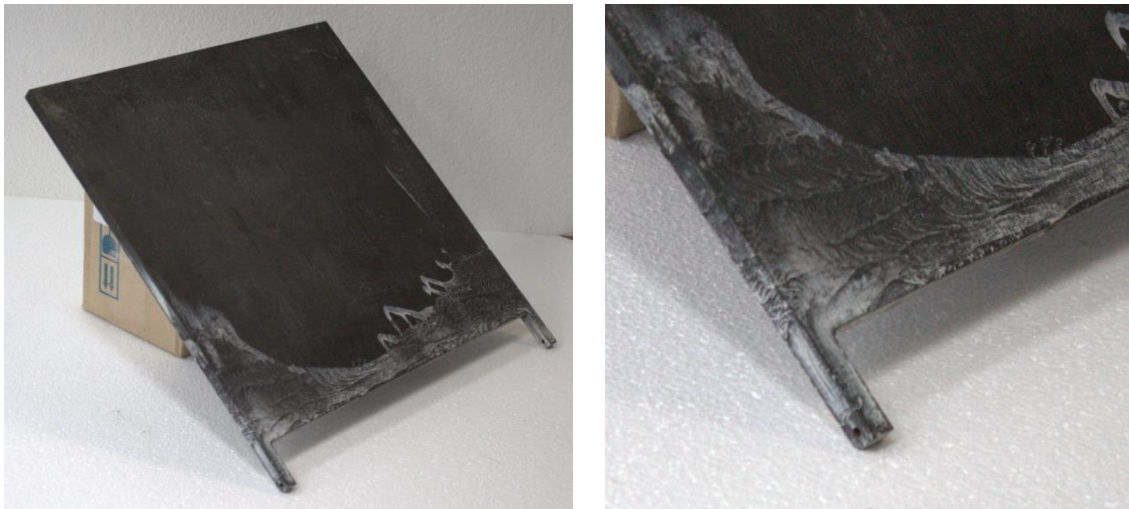


Figura 35. Quarta comporta de resina (esquerra) i detall del llom a la zona d'ancoratge (dreta)

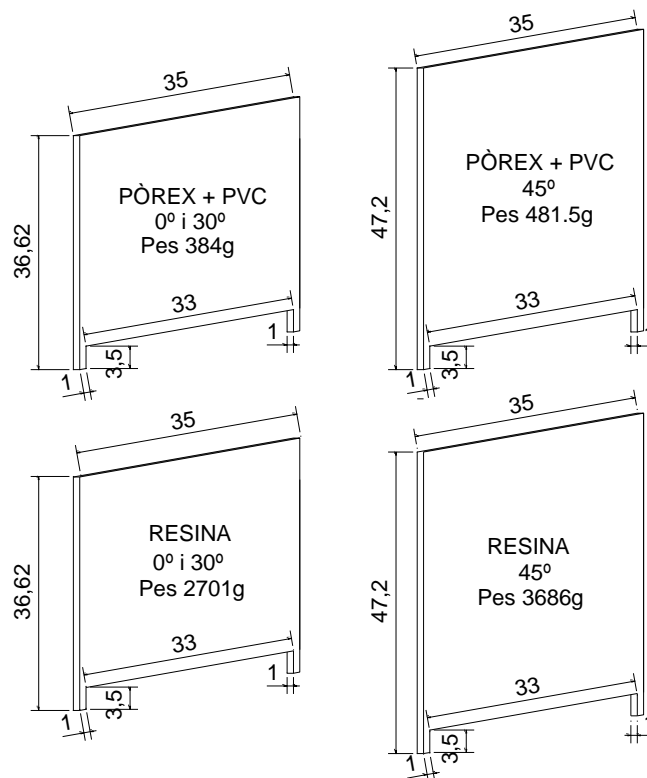


Figura 36. Comportes de radi llarg del Model 2 (dades en centímetres)

Les posicions inicials de les comportes són importants perquè influeixen clarament en la reflexió que produeixen. Tot i així hi ha un condicionant determinant quant a les comportes i el tipus de coacció que se li aplica. S'han realitzat assajos amb les comportes fixes, és a dir, amb coaccions rígides que impedeixen el seu moviment de pèndul, ja sigui a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  o  $45^\circ$ . Per altra banda s'han usat coaccions elàstiques que limiten el seu moviment i absorbeixen part de l'energia que l'aigua transmet a la comporta. S'ha assajat amb coaccions elàstiques en la cara interior i en les dues cares. Per a simular aquestes coaccions s'han usat molles de laboratori de diferent constant  $k$  de rigidesa.



**CAPÍTOL 5**

---





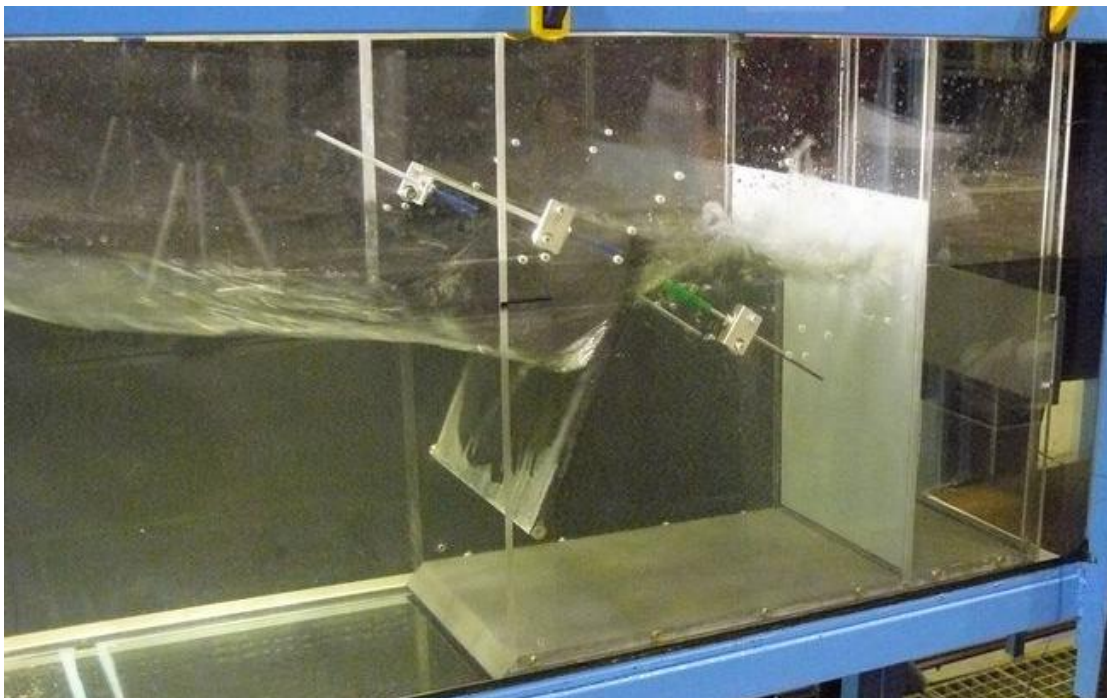
## Realització dels assajos en model físic

Els assajos realitzats consisteixen en sotmetre els models de dic pendular a una acció d'onatge regular predissenyat amb unes condicions de calat, alçada d'ona i període desitjades dins d'un canal d'onatge al laboratori. L'objectiu d'aquests assajos és avaluar el comportament hidrodinàmic dels models de dic vertical pendular front a aquestes sol·licitacions d'onatge per extreure'n conclusions de funcionalitat.

El procediment seguit és el següent:

1. Calibratge del canal d'assajos del LIM
2. Col·locació del model en la posició adequada per l'assaig dins del canal
3. Col·locació dels sensors d'alçada d'ona en la posició adequada per l'assaig dins del canal
4. Col·locació dels element d'enregistrament multimèdia en la posició adequada per la recopilació de dades visuals
5. Configuració de les propietats geomètriques i mecàniques del model per l'assaig corresponent
6. Realització de l'assaig
7. Observació de l'assaig i anotació de possibles incidències en la fitxa de l'assaig

Un cop acabat l'assaig es disposa una nova configuració de les propietats geomètriques i mecàniques al model (punt 5) i es procedeix a realitzar un nou assaig.



*Figura 37. Imatge d'un assaig del Model 2 al canal LIM*

A continuació s'explica amb detall com s'han realitzat els assajos i es descriu acuradament com són els models emprats.

## Emplaçament del model al canal

Els assajos del pèndul invertit s'han realitzat al canal CIEMito del LIM a la UPC a Barcelona. El LIM és el Laboratori d'Enginyeria Marítima de la UPC i es troba al Campus Nord, a l'edifici D1. Entre d'altres activitats s'hi realitza la recerca mitjançant l'experimentació amb models físics a escala dins de l'àmbit de l'Enginyeria Marítima i Costanera.

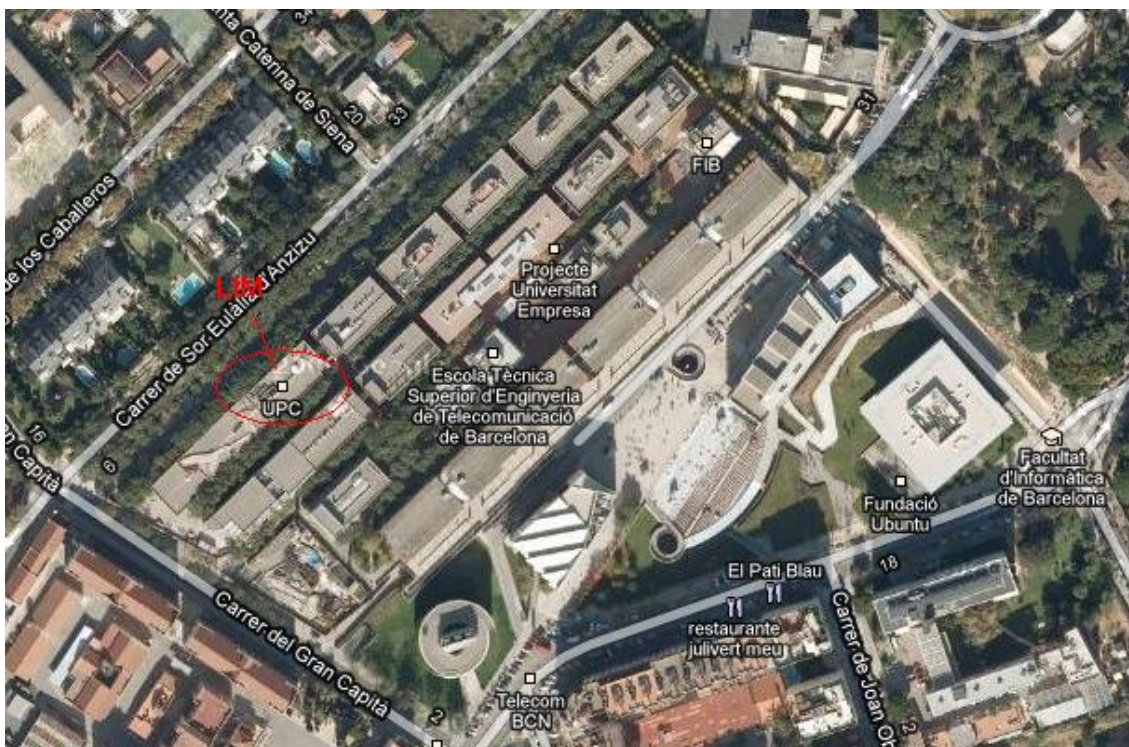


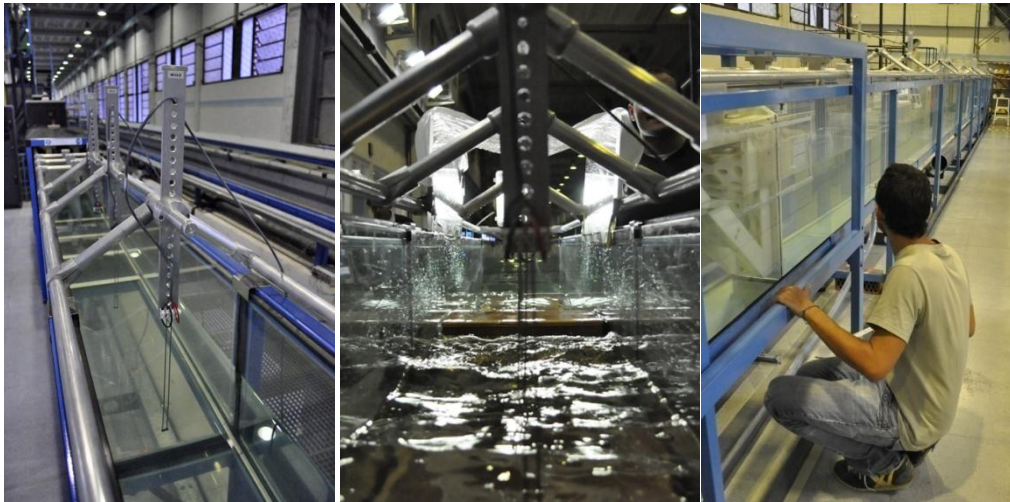
Figura 38. Situació del LIM al Campus Nord de la UPC

El canal CIEMito té una longitud total de  $18m$ , amb una secció útil de  $0,38m$  d'ample i  $0,56m$  d'alt i un calat màxim de  $0,36m$ . L'estructura de suport està formada per perfils metàl·lics de secció quadrada laminats en fred, les parets i el fons són de vidre trempat de  $5 + 5mm$  de gruix.

Per a facilitar-ne la seva operació, en ambdós extrems hi ha disposats pous de  $0,20m$  de diàmetre, que permeten tant l'ompliment i el buidat així com la recirculació controlada d'aigua mitjançant el sistema de generació de corrents. Igualment disposa d'un dipòsit de  $3m^3$  i un sistema de bombeig i filtrat propi a fi de mantenir la seva autonomia d'ús de la resta de les instal·lacions.

La generació del onatge es realitza mitjançant una pala del tipus pistó, a on el moviment es proporciona per un actuator lineal de  $1m$  de carrera màxima i una velocitat de resposta de  $1.6m/s$ . La capacitat teòrica màxima per un calat de  $0.36m$  correspon a una onada de  $1.7s$  de període i  $0.28m$  d'alçada. El software de generació emprat ha estat desenvolupat al LIM/UPC i permet la generació d'onatge regular, irregular i reproducció de sèries temporals.

Durant l'assaig, els tècnics del LIM s'encarreguen de generar l'onatge regular i de calibrar el sistema de generació de l'onatge. Mentrestant es munten els diferents models al canal i es preparen per a ser assajats.



*Figura 39. Canal CIEMito. Diferents perspectives amb sensors d'alçada d'ona*

El LIM emmagatzema les dades de la làmina lliure mitjançant els sensors d'alçada d'ona dels que es parla més endavant.

L'assaig consisteix en mesurar l'alçada d'ona en diferents punts del canal durant el temps en que aquest dura. Així s'obtenen sèries de dades discretes en el temps que permeten una descripció bastant acurada del comportament de la làmina lliure del canal durant l'assaig.

Gràcies a la propietat transparent del vidre de les parets del CIEMito i del metacrilat de les parets del model, es pot observar a ull nu el procés hidrodinàmic que succeeix tant dins del canal com del model en sí. Aquesta apreciació és bastant rellevant perquè ens permet aportar una apreciació qualitativa als assajos. Si no poguéssim observar el procés de manera visual hauríem de conformar-nos amb les dades quantitatives procedents dels sensors. Al poder realitzar una doble apreciació (qualitativa i quantitativa) les conclusions són més complertes.

Entre assaig i assaig es canvien algunes propietats del model, com la longitud de pati, la comporta o les coaccions de la comporta. Es realitzen tres assajos amb les mateixes propietats geomètriques del dic, només variant el període del tren d'ones incident. Cada tres sèries de trens d'ona es varia alguna de les propietats esmentades i es torna assajar. Dades extretes de [12].

### Ubicació dels sensors

Per a la medició de la reflexió durant els assajos es van col·locar diversos sensors d'alçada d'ona al llarg del canal. Se'n van col·locar tres prop de la pala generadora i quatre o cinc prop del dic (depenent de l'assaig) per mesurar l'onatge reflectit. Aquests sensor mesuren la sobrelevació de la làmina lliure cada 0,05 segons (una freqüència de 20Hz) i l'enregistren per una posterior avaluació.

Els sensors d'alçada d'ona estan formats per dues varetes d'acer inoxidable que actuen com elèctrodes d'una resistència. Mitjançant un mecanisme electrònic, el valor de la resistència varia inversament amb la profunditat d'immersió dels elèctrodes.

El seu funcionament està basat en la variació de la conductivitat deguda als canvis de nivell de la làmina lliure, la qual produeix variacions en la resistència i per tant variacions de tensió en funció de l'alçada d'ona.



Figura 40. Sensor d'alçada d'ona (fotografia)

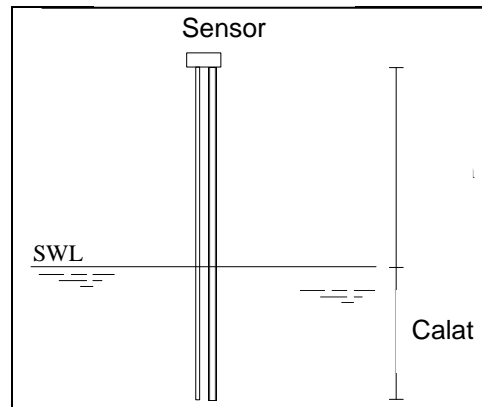


Figura 41. Sensor d'alçada d'ona (esquema)

La manera de col·locar els sensors no és mai aleatòria, sempre s'han de complir unes condicions de distància entre ells i de longitud d'ona per tal d'aconseguir dades fiables. Si es tenen tres sensors mesurant un tren d'ones i aquests estan separats entre sí una distància de  $\frac{L}{2}$  ó  $\frac{L}{4}$  ó  $\frac{L}{8}$  (amb  $L \sim$  longitud d'ona), quant un node passi per un d'ells també passarà pels altres, i les dades seran inservibles per al seu anàlisi. En canvi si s'assegura que no es compleixi aquesta proporció (normalment s'imposa una distància de  $\frac{3L}{16}$  ó  $\frac{5L}{16}$ ), sempre hi haurà com a mínim dos sensors que aportaran dades aprofitables quant un dels tres estigui en un node.

Tot i que la lectura dels sensors és fiable i imprescindible per l'estudi, els propis sensors introdueixen petites distorsions en el registre de dades ja que la seva presència al canal modifica en part el comportament hidràulic i influeix en el resultat. De totes formes aquest fenomen es prou petit com per menysprear-lo i s'accepta un marge d'error.

Per a cada un dels dos models utilitzats als assajos es va emprar una configuració diferent quant a la col·locació dels sensors. Els dos models tenien diferents dimensions i condicions hidrodinàmiques diferents i per tant els factors condicionants variaven.

En els dos esquemes les S1, S2, ..., S8 són els sensors d'alçada d'ona i s'hi pot apreciar la distància que els separa i la longitud del canal emprada per l'assaig, així com la profunditat dels models.

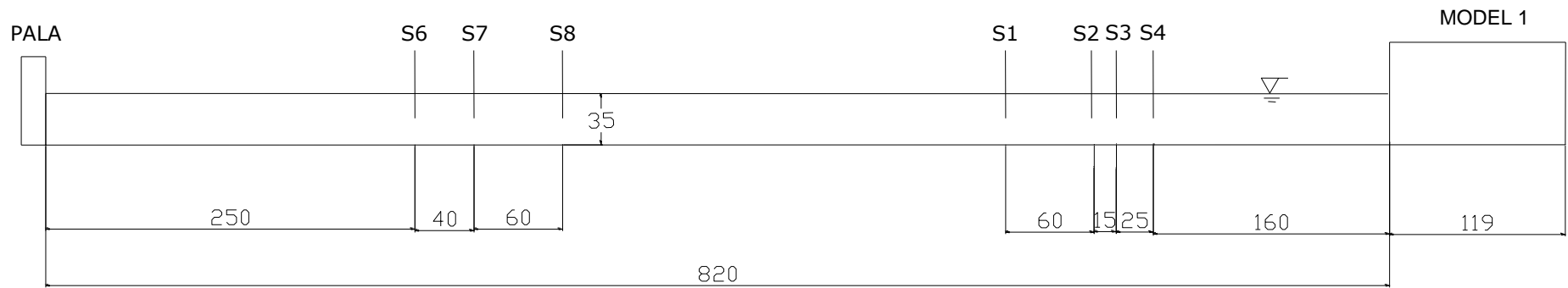


Figura 42. Esquema longitudinal del canal CIEMito amb el Model 1 (dades en centímetres)

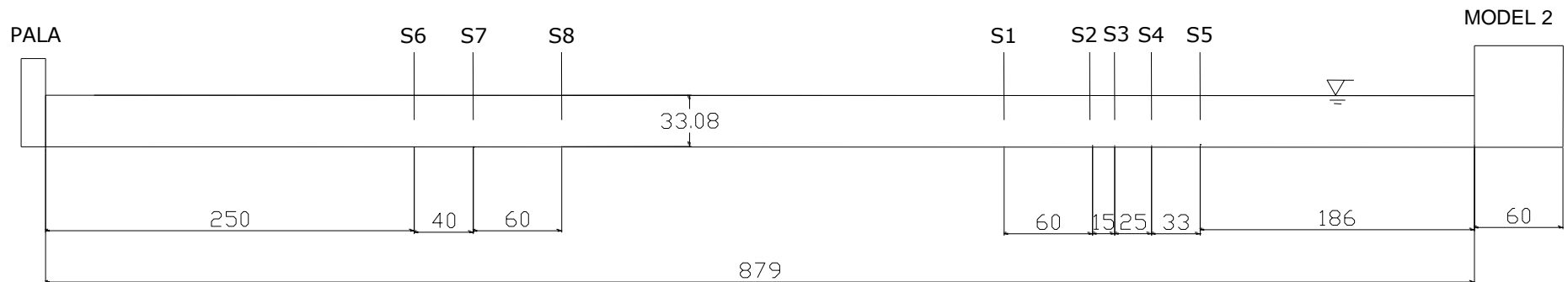


Figura 43. Esquema longitudinal del canal CIEMito amb el Model 2 (dades en centímetres)

## Assajos realitzats

Per realitzar aquest estudi s'han realitzat els assajos descrits en les següents dues taules, cadascuna correspon a un dels models. Cada fila descriu les propietats d'un assaig. Les columnes donen informació sobre una propietat concreta:

- \* La columna "Material" explica quin és el material per construir la comporta.
- \* La columna "Radi de gir" fa referència a la longitud vertical de la obertura entre el llit del dic i la comporta.
- \* La columna "Pati" ens dona informació sobre quina és la longitud de pati, doncs cada model disposa de més d'una.
- \* La columna "Angle" ens indica quina és la posició inicial de la comporta en graus sexagesimals respecte la vertical.
- \* La columna "Coaccions" ens dona informació referent a les limitacions de moviment de la comporta, si aquesta està coaccionada o no.
- \* La columna "T (s)" ens diu quin és el període de l'onatge regular emprat en aquest assaig.

### (A) Assajos amb el Model 1:

*Pati Curt: 54mm      Pati Mig: 82mm      Pati Llarg: 117mm*

Assaig	Material	Pati	Angle	Coaccions	T (s)
1	Acer	curt	0	si	1,13
2	Acer	curt	0	si	1,41
3	Acer	curt	0	si	1,70
4	Acer	mig	0	si	1,13
5	Acer	mig	0	si	1,41
6	Acer	mig	0	si	1,70
7	Acer	llarg	0	si	1,13
8	Acer	llarg	0	si	1,41
9	Acer	llarg	0	si	1,70
10	Acer	curt	30	si	1,13
11	Acer	curt	30	si	1,41
12	Acer	curt	30	si	1,70
13	Acer	mig	30	si	1,13
14	Acer	mig	30	si	1,41
15	Acer	mig	30	si	1,70
16	Acer	llarg	30	si	1,13
17	Acer	llarg	30	si	1,41
18	Acer	llarg	30	si	1,70
19	Resina + flotador	curt	30	si	1,13
20	Resina + flotador	curt	30	si	1,41
21	Resina + flotador	curt	30	si	1,70

22	Resina + flotador	mig	30	si	1,13
23	Resina + flotador	mig	30	si	1,41
24	Resina + flotador	mig	30	si	1,70
25	Resina + flotador	curt	30	si	1,13
26	Resina + flotador	curt	30	si	1,41
27	Resina + flotador	curt	30	si	1,70
28	Resina + flotador	mig	30	si	1,13
29	Resina + flotador	mig	30	si	1,41
30	Resina + flotador	mig	30	si	1,70
31	Resina + flotador	llarg	30	si	1,13
32	Resina + flotador	llarg	30	si	1,41
33	Resina + flotador	llarg	30	si	1,70
34	Resina	curt	30	si	1,13
35	Resina	curt	30	si	1,41
36	Resina	curt	30	si	1,70
37	Resina	mig	30	si	1,13
38	Resina	mig	30	si	1,41
39	Resina	mig	30	si	1,70
40	Resina	llarg	30	si	1,13
41	Resina	llarg	30	si	1,41
42	Resina	llarg	30	si	1,70
43	Acer	curt	30	si	1,13
44	Acer	curt	30	si	1,41
45	Acer	curt	30	si	1,70
46	Acer	mig	30	si	1,13
47	Acer	mig	30	si	1,41
48	Acer	mig	30	si	1,70
49	Acer	llarg	30	si	1,13
50	Acer	llarg	30	si	1,41
51	Acer	llarg	30	si	1,70
52	Acer	curt	30	si	1,13
53	Acer	curt	30	si	1,41
54	Acer	curt	30	si	1,70
55	Acer	mig	30	si	1,13
56	Acer	mig	30	si	1,41
57	Acer	mig	30	si	1,70
58	Acer	llarg	30	si	1,13
59	Acer	llarg	30	si	1,41
60	Acer	llarg	30	si	1,70
61	Acer	mig	30	si	1,13
62	Acer	mig	30	si	1,41
63	Acer	mig	30	si	1,70
64	Acer	llarg	30	si	1,13
65	Acer	llarg	30	si	1,41
66	Acer	llarg	30	si	1,70

Figura 44. Taula d'assajos realitzats amb el Model 1

**(B) Assajos amb el Model 2:***Pati Curt: 41,54mm Pati Llarg: 57,92mm*

Assaig	Material	Radi de gir	Pati	Angle	Coaccions	T (s)
1	Resina	curt	curt	0	no	0,74
2	Resina	curt	curt	0	no	0,99
3	Resina	curt	curt	0	no	1,47
4	Resina	curt	llarg	0	no	0,74
5	Resina	curt	llarg	0	no	0,99
6	Resina	curt	llarg	0	no	1,47
7	Resina	curt	llarg	0	sí	0,74
8	Resina	curt	llarg	0	sí	0,99
9	Resina	curt	llarg	0	sí	1,47
10	Resina	curt	curt	30	sí	0,74
11	Resina	curt	curt	30	sí	0,99
12	Resina	curt	curt	30	sí	1,47
13	Resina	curt	llarg	30	sí	0,74
14	Resina	curt	llarg	30	sí	0,99
15	Resina	curt	llarg	30	sí	1,47
16	Resina	curt	curt	45	sí	0,74
17	Resina	curt	curt	45	sí	0,99
18	Resina	curt	curt	45	sí	1,47
19	Resina	curt	llarg	45	sí	0,74
20	Resina	curt	llarg	45	sí	0,99
21	Resina	curt	llarg	45	sí	1,47
22	Resina	llarg	curt	0	no	0,74
23	Resina	llarg	curt	0	no	0,99
24	Resina	llarg	curt	0	no	1,47
25	Resina	llarg	llarg	0	no	0,74
26	Resina	llarg	llarg	0	no	0,99
27	Resina	llarg	llarg	0	no	1,47
28	Resina	llarg	curt	0	sí	0,74
29	Resina	llarg	curt	0	sí	0,99
30	Resina	llarg	curt	0	sí	1,47
31	Resina	llarg	llarg	0	sí	0,74
32	Resina	llarg	llarg	0	sí	0,99
33	Resina	llarg	llarg	0	sí	1,47
34	Resina	llarg	curt	30	sí	0,74
35	Resina	llarg	curt	30	sí	0,99
36	Resina	llarg	curt	30	sí	1,47
37	Resina	llarg	llarg	30	sí	0,74
38	Resina	llarg	llarg	30	sí	0,99
39	Resina	llarg	llarg	30	sí	1,47
40	Resina	llarg	curt	45	sí	0,74
41	Resina	llarg	curt	45	sí	0,99
42	Resina	llarg	curt	45	sí	1,47
43	Resina	llarg	llarg	45	sí	0,74
44	Resina	llarg	llarg	45	sí	0,99



45	Resina	llarg	llarg	45	sí	1,47
46	Pòrex	curt	curt	0	no	0,74
47	Pòrex	curt	curt	0	no	0,99
48	Pòrex	curt	curt	0	no	1,47
49	Pòrex	curt	llarg	0	no	0,74
50	Pòrex	curt	llarg	0	no	0,99
51	Pòrex	curt	llarg	0	no	1,47
52	Pòrex	curt	curt	0	sí	0,74
53	Pòrex	curt	curt	0	sí	0,99
54	Pòrex	curt	curt	0	sí	1,47
55	Pòrex	curt	llarg	0	sí	0,74
56	Pòrex	curt	llarg	0	sí	0,99
57	Pòrex	curt	llarg	0	sí	1,47
58	Pòrex	curt	curt	30	sí	0,74
59	Pòrex	curt	curt	30	sí	0,99
60	Pòrex	curt	curt	30	sí	1,47
61	Pòrex	curt	llarg	30	sí	0,74
62	Pòrex	curt	llarg	30	sí	0,99
63	Pòrex	curt	llarg	30	sí	1,47
64	Pòrex	curt	curt	45	sí	0,74
65	Pòrex	curt	curt	45	sí	0,99
66	Pòrex	curt	curt	45	sí	1,47
67	Pòrex	curt	llarg	45	sí	0,74
68	Pòrex	curt	llarg	45	sí	0,99
69	Pòrex	curt	llarg	45	sí	1,47
70	Pòrex	llarg	curt	0	no	0,74
71	Pòrex	llarg	curt	0	no	0,99
72	Pòrex	llarg	curt	0	no	1,47
73	Pòrex	llarg	llarg	0	no	0,74
74	Pòrex	llarg	llarg	0	no	0,99
75	Pòrex	llarg	llarg	0	no	1,47
76	Pòrex	llarg	curt	0	sí	0,74
77	Pòrex	llarg	curt	0	sí	0,99
78	Pòrex	llarg	curt	0	sí	1,47
79	Pòrex	llarg	llarg	0	sí	0,74
80	Pòrex	llarg	llarg	0	sí	0,99
81	Pòrex	llarg	llarg	0	sí	1,47
82	Pòrex	llarg	curt	30	sí	0,74
83	Pòrex	llarg	curt	30	sí	0,99
84	Pòrex	llarg	curt	30	sí	1,47
85	Pòrex	llarg	llarg	30	sí	0,74
86	Pòrex	llarg	llarg	30	sí	0,99
87	Pòrex	llarg	llarg	30	sí	1,47
88	Pòrex	llarg	curt	45	sí	0,74
89	Pòrex	llarg	curt	45	sí	0,99
90	Pòrex	llarg	curt	45	sí	1,47
91	Pòrex	llarg	llarg	45	sí	0,74
92	Pòrex	llarg	llarg	45	sí	0,99
93	Pòrex	llarg	llarg	45	sí	1,47

Figura 45. Taula d'assajos realitzats amb el Model 2

## Recull de dades quantitatives i qualitatives

Com s'ha comentat en anteriors apartats, l'objectiu fonamental dels assajos hidràulics al canal d'onatge del LIM és el d'analitzar la reflexió que produeix la comporta del dic i comparar el resultat de les diferents combinacions geomètriques i mecàniques. Per aconseguir aquests objectius, durant els assajos es recullen diferents tipus de dades. Es recullen tant dades quantitatives com qualitatives i així s'aconsegueix estudiar els següents aspectes:

- \* La funcionalitat del pèndol, mitjançant la medició de la sobreelevació de la làmina lliure a la proximitat de la comporta.
- \* L'agitació dins del calaix, produïda pel moviment de la comporta i condicionada també per la longitud del pati.
- \* L'ultrapassament i les esquitxades produïdes per l'agitació al pati i que afecten al trasdós de l'estructura
- \* La ressonància que es pot produir a partir de la unió entre l'onatge incident i el reflectit per la comporta en les proximitats del dic.

Els instruments i mitjans d'observació instal·lats al canal de les instal·lacions CIEM, per a l'adquisició de les dades corresponents, ha estat:

- \* Set sensors d'alçada d'ona: tres situats davant la pala generadora d'onatge i quatre davant el dic per als assajos amb el primer model.
- \* Vuit sensors d'alçada d'ona: tres situats davant la pala generadora d'onatge i cinc davant el dic per als assajos amb el segon model.
- \* Dues càmeres de vídeo fixes: una captant imatges a llarg de l'eix longitudinal del canal i l'altra captant imatges des d'un dels laterals, obtenint imatges del perfil.
- \* Una càmera fotogràfica accionada de forma manual.
- \* Un ordinador per a la presa de dades i per la generació de l'onatge controlat per part dels tècnics del LIM.
- \* Una fitxa tècnica per a cada assaig que recull tota la informació pertinent (dades de l'onatge, dades de la composició mecànica i geomètrica del model en el assaig concret, observacions de comportaments anòmals o incidències, i una fotografia per deixar constància visual de l'assaig), com es mostra a la següent figura.

Les càmeres de vídeo serveixen per deixar constància de tots els assajos realitzats i poder així visualitzar posteriorment qualsevol tipus d'incidència si s'escau. Quant a la càmera fotogràfica, aquesta s'ha emprat per enregistrar diferents imatges de certs moments dels assajos per obtenir un testimoni digital de les fulles de registre de cada assaig.

Un monitor ha estat connectat a la càmera de vídeo per visualitzar en tot moment les incidències de l'assaig des de la posició del controlador de les paletes. El PC, que té instal·lada una targeta d'adquisició de dades, rep i emmagatzema totes les senyals d'entrada adquirides pels sensors descrits anteriorment.

ENSAYO	ARCHIVO	FECHA	HORA	MODELO	ESCALA
083	251109_43	25/11/2009	18:31	2	

MODELO		
H (cm)	T (s)	h (cm)
7.69	0.99	33.08

OBSERVACIONES	
MATERIAL	Resina
RADIO DE GIRO	Corto
ÁNGULO INICIAL	30°
COACCIÓN INTERIOR	Elástico (k2)
COACCIÓN EXTERIOR	Elástico (k1) (40 mm)
PATIO	Largo
OTRAS	



Figura 46. Fitxa de seguiment d'un assaig





**CAPÍTOL 6**

---





Un cop acotat el registre de dades es procedeix a analitzar-les amb el programa *Lasa*. Aquest programa processa les taules de dades modificades i les característiques del canal com ara la pendent, la separació entre sensors, la distància al parament exterior del dic, així com la freqüència de l'onatge, i ens retorna l'onatge separat en onatge incident i onatge reflectit. *Lasa* analitza l'onatge punt per punt i el separa en onatge incident i reflectit les dades de cada sensor. Aquest procediment és realitza per una sèrie d'aproximacions mitjançant Mínims Quadrats amb el mètode de *Mansard* i *Funke*, el qual s'explica en el següent apartat.

*Lasa* és un programa de separació d'onatge creat per la Universitat Politècnica de València. Com s'observa en la següent figura en cada apartat del programa s'hi concreten certes dades i aquest les processa fins a obtenir la separació de l'onatge.

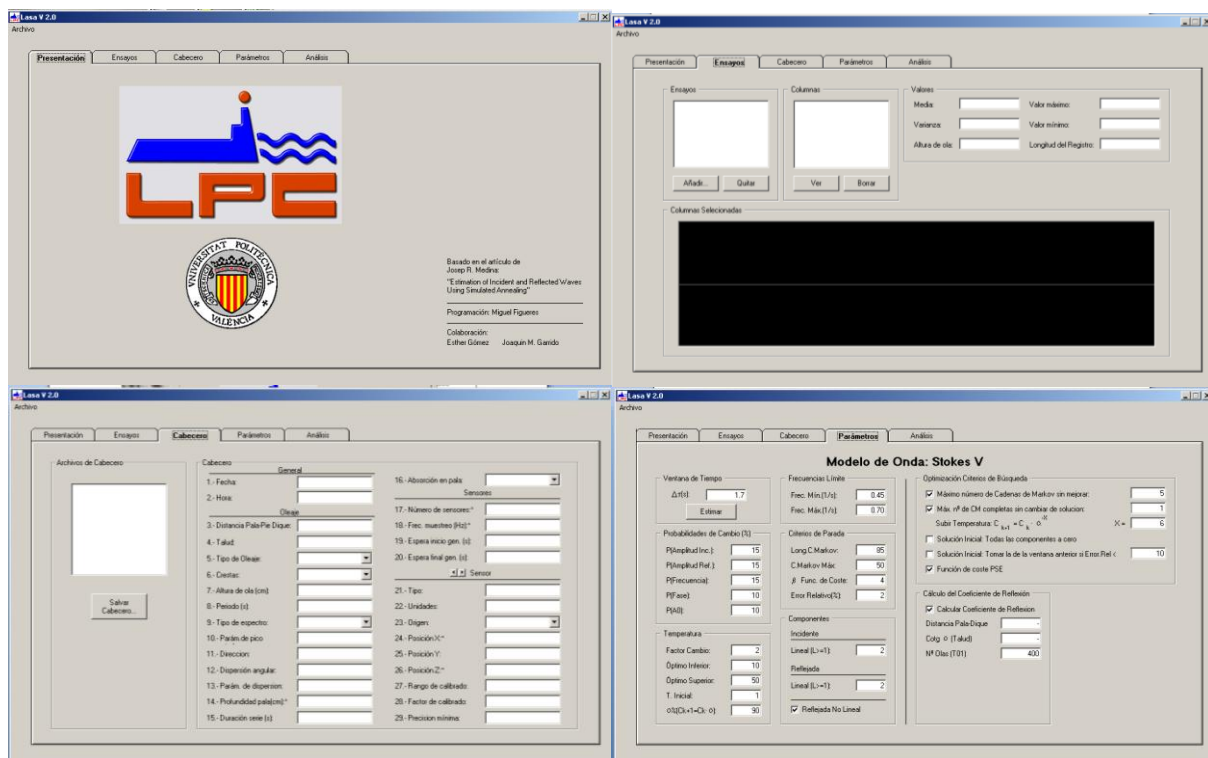


Figura 49. Imatges del programa *Lasa*

*Lasa* ens retorna uns arxius que estan formats per unes taules on cada registre d'ona de cada sensor està separat en onatge incident i reflectit.

Un cop s'ha realitzat l'anàlisi de dades es classifiquen tots els resultats en unes taules que facilitin la comprensió d'aquestes i la seva comparació quantitativa. En aquestes taules s'hi explicita el nom de l'assaig, el període al pic, l'alçada d'ona incident, l'alçada d'ona reflectida i el coeficient de reflexió. S'ha de tenir sempre en comte que les comparacions quantitatives han d'anar sempre acompanyades de comparacions qualitatives per evitar errors, doncs es pot donar el cas que el coeficient de reflexió tingui un valor acceptable però que el comportament mecànic de la comporta no sigui l'adequat.



## Mètode de Mansard i Funke

Al 1980 Mansard i Funke van presentar un mètode basat en Mínims Quadrats utilitzant tres sensors de superfície. Al 1992 Zelt i Skjelbreia van estendre aquest mètode introduint un algoritme aplicable a un nombre arbitrari de sensors. A continuació es presenta el mètode estès per Zelt i Skjelbreia que en el cas particular de tres sensors és el mateix algoritme que el presentat per Mansard i Funke al 1980.

Aquest mètode pressuposa la medició simultània en  $M$  punts coneguts durant un temps  $T$ , tal que  $0 \leq t \leq T$ . La novetat d'aquest mètode recau en la introducció d'una variable error. Llavors s'obté el valor de la reflexió que minimitza l'error mitjançant l'aplicació de la Teoria de Mínims Quadrats.

L'objectiu és obtenir l'espectre d'energia a partir de les dades proporcionades pels sensors, tot atribuint a una funció determinada les dades discretes proporcionades pel sensor. Per a que les dades siguin atribuïbles a una funció és necessari aplicar un anàlisi de Fourier discret. Per propietats de la descomposició de Fourier qualsevol funció pot ser expressada de la forma següent:

$$f(t_i) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ A_n \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \right] \quad (6.1)$$

Troba  $A_0$ ,  $A_n$  i  $B_n$  a partir de les fórmules:

$$A_0 = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \Delta t \quad (6.2)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (6.3)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (6.4)$$

La diferència entre el mètode de Goda i el de Mansard comença en una reformulació de la sèrie de Fourier de la expressió (6.1). Aquesta fórmula pot ser expressada de forma més compacta mitjançant una amplitud i una fase de la forma següent:

$$f(t_i) = \frac{E}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T} - \alpha_n\right) \quad (6.5)$$

$$E_n = (A_n^2 + B_n^2)^{1/2} \quad (6.6)$$

$$\alpha_n = \tan^{-1}\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (6.7)$$

Igual que en el cas de  $A_0$ ,  $E_0$  ha de ser nul ja que l'onatge  $f(t)$  generat utilitza com pas per zero el nivell mig de l'aigua. Per tant les àrees positives i negatives de la funció  $f(t)$  han de compensar-se (integral de  $f(t)$  nula). Per tant podem expressar el registre mitjançant la funció contínua següent:

$$f(t_i) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T} - \alpha_n\right) \quad (6.8)$$

De la qual es poden calcular els valors de  $E_n$  i  $\alpha_n$  a partir de les equacions (6.6) i (6.7).

S'ha de recordar que en aquest cas hi ha una limitació. La funció ha de tenir un període constant  $T$ . Una funció no periòdica  $f(t)$  encara pot ser representada per sèries de Fourier definides amb la fórmula anterior, però amb una validesa limitada al rang on la funció no periòdica és definida.

Formació per la descomposició de l'onatge incident i reflectit:

L'equació d'un onatge irregular (registrada per un sensor  $p$ ) pot expressar-se com el sumatori d'un seguit d'ones regulars de la forma següent:

$$\eta_p(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin\left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi x}{L_n} + \varepsilon_{p,n}\right) \quad (6.9)$$

Per tant, considerant un sensor  $p$  situat a la posició  $x = X1$ , es pot expressar el registre degut a la superposició d'un onatge irregular amb el seu reflectit de la següent manera:

$$\begin{aligned} \eta_{p=1}(x = X1, t) &= \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} a_{In} \sin\left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(X1)}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right) \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} a_{Rn} \sin\left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(X1 + 2XR1)}{L_n} + \varepsilon_{1,n} + \gamma_{1,n}\right) + \Omega_1(t) \end{aligned} \quad (6.10)$$

On  $\Omega_1(t)$  representa les interferències, possibles errors de la fórmula; i  $XR1$  la distància del sensor al punt en que reflexa l'onatge.

Tenint en compte altres sensors  $p$  en la posició  $x = X1 + X1P$ , l'onatge que tindrà que observar aquest nou sensor ve donat per:

$$\begin{aligned} \eta_{p=1}(x = X1 + X1P, t) &= \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} a_{In} \sin\left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(X1 + X1P)}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right) + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} a_{Rn} \sin\left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(X1 + 2XR1 - X1P)}{L_n} + \varepsilon_{1,n} + \gamma_{1,n}\right) + \Omega_1(t) \end{aligned} \quad (6.11)$$

És obvi que la superfície lliure obtinguda pels sensor i expressada per la equació (6.9) hauria de coincidir amb la formulació teòrica (superposició d'un onatge incident amb un

de reflectit) expressada mitjançant l'equació (6. 10) o (6. 11). Per tant es procedeix a igualar les formulacions.

Per a un primer sensor:

$$a_{I,n} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(X1)}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right) + a_{I,n} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(X1 + X1P)}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right) + \Omega_1(t) = A_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T} + \alpha_n\right) \quad (6. 12)$$

Per un altre sensor  $p$ :

$$\begin{aligned} & a_{I,n} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(X1 + X1P)}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right) + \\ & + a_{I,n} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(X1 + 2XR1 - X1P)}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right) + \Omega_1(t) \\ & = A_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T} + \alpha_n\right) \end{aligned} \quad (6. 13)$$

Si s'expressa en forma polar i s'eliminen els termes iguals en les dues igualtats ens queda que:

$$B_{1,n} = \underbrace{a_{I,n} e^{i\left(\frac{2\pi(X1)}{L_n} + i\varepsilon_{1,n}\right)}}_{Z_{I,n}} + \underbrace{a_{R,n} e^{i\left(\frac{2\pi(X1+2XR1)}{L_n} + i(\varepsilon_{1,n} + \gamma_{1,n})\right)}}_{Z_{R,n}} + \underbrace{Y_{1,n} \cdot e^{i\rho_{1,n}}}_{Z_{error,1,n}} \quad (6. 14)$$

$$B_{p,n} = \underbrace{a_{I,n} e^{i\left(\frac{2\pi(X1)}{L_n} + i\varepsilon_{p,n}\right)}}_{Z_{I,n}} + \underbrace{a_{R,n} e^{i\left(\frac{2\pi(X1+2XR1-X1P)}{L_n} + i(\varepsilon_{p,n} + \gamma_{p,n})\right)}}_{Z_{R,n}} + \underbrace{Y_{p,n} \cdot e^{i\rho_{1,n}}}_{Z_{error,1,n}} \quad (6. 15)$$

Sent  $B_n = -A_n \cdot e^{\alpha_n}$

Agrupant els termes s'arriba a l'expressió següent:

$$B_{1,n} = Z_{I,n} + Z_{R,n} + Z_{error,1,n} \quad (6. 16)$$

$$B_{p,n} = Z_{I,n} \cdot e^{\frac{i2\pi(X1P)}{L_n}} + Z_{R,n} \cdot e^{\frac{i2\pi(X1P)}{L_n}} + Z_{error,1,n} \quad (6. 17)$$

De la que es coneix  $B_n$  a partir de les dades dels sensors seguint el procés descrit. Les dues últimes equacions (6. 16) i (6. 17) poden ser reescrites mitjançant la simplificació següent:

$$\psi_{p,n} = \frac{2\pi(X1P)}{L_n} = k_n(X1P) \quad (6. 18)$$

I d'això resulta que:

$$Z_{I,n} \cdot e^{i\psi_{1,n}} + Z_{R,n} \cdot e^{i\psi_{1,n}} - B_{1,n} = -Z_{error,1,n}, \text{ per al primer sensor}$$

$$Z_{I,n} \cdot e^{i\psi_{p,n}} + Z_{R,n} \cdot e^{i\psi_{p,n}} - B_{p,n} = -Z_{error,p,n}, \text{ per a qualsevol altre sensor}$$

Ara s'aplica els Mínims Quadrats per trobar els valors de  $Z_{I,n}$  i  $Z_{R,n}$  pels quals la suma del quadrats de  $Z_{error,p,n}$  sigui mínima.

$$\sum_{p=1}^m (-Z_{error,p,n}) = \text{mínim} \quad (6.19)$$

Per trobar el valor de  $Z_{I,n}$  i  $Z_{R,n}$  per Mínims Quadrats s'ha de resoldre el sistema d'equacions expressat de forma matricial com  $Z_n = Y_n \cdot D_n$ :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \sum_{p=1}^M B_{p,n} \cdot e^{-i\psi_{p,n}} \\ \sum_{p=1}^M B_{p,n} \cdot e^{i\psi_{p,n}} \end{pmatrix}}_{Y_n} = \underbrace{\begin{pmatrix} M & \sum_{p=1}^M e^{-2i\psi_{p,n}} \\ \sum_{p=1}^M e^{2i\psi_{p,n}} & M \end{pmatrix}}_{D_n} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} Z_{I,n} \\ Z_{R,n} \end{pmatrix}}_{Z_n} \quad (6.20)$$

La solució del qual és:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} Z_{I,n} \\ Z_{R,n} \end{pmatrix}}_{Z_n} = \underbrace{\frac{1}{M^2 - [\sum_{p=1}^M e^{2i\psi_{p,n}} \cdot \sum_{p=1}^M e^{-2i\psi_{p,n}}]}}_{D_n^{-1}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} M & -\sum_{p=1}^M e^{-2i\psi_{p,n}} \\ -\sum_{p=1}^M e^{2i\psi_{p,n}} & M \end{pmatrix}}_{D_n^{-1}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \sum_{p=1}^M B_{p,n} \cdot e^{-i\psi_{p,n}} \\ \sum_{p=1}^M B_{p,n} \cdot e^{i\psi_{p,n}} \end{pmatrix}}_{Y_n} \quad (6.21)$$

$Z_{I,n}$  i  $Z_{R,n}$  representen el moviment de la superfície de l'aigua de l'onatge incident  $\eta_I(x = X1, t)$  i reflectit  $\eta_R(x = X1, t)$  per qualsevol  $f_n$  i permet calcular l'espectre d'onatge incident i reflectit.

Limitacions del mètode:

Les limitacions d'aquest mètode venen per una part per l'ús de la teoria lineal de l'onatge. Per altra banda Zelt i Skjelbreia (1992) ja van demostrar que a l'augmentar el nombre de sensors millorava l'exactitud del mètode, el que implica que l'error va disminuint. A més el fons hauria de ser horitzontal i la aparició de l'onatge transversal i altres perturbacions al canal, com les produïdes pels propis sensors de superfície poden falsificar les dades.

El bon funcionament del mètode està condicionat, com en el cas de Goda, per la posició dels sensors. El fet d'emprar més d'un sensor per la obtenció de la reflexió fa que el mètode sigui susceptible a errors produïts per onatges parcialment estacionaris.

Per altra banda el càlcul emprat per minimitzar un nombre complet no és estrictament correcte. De totes formes és acceptat doncs, tot i que sigui inexacte s'apropa suficientment al valor adequat.

Per que el mètode funcioni correctament és necessari que la distància entre sensor compleixi unes condicions determinades. En concret el mètode de Mansard i Funke perd precisió quan la separació entre sensors  $\Delta x$  és tal que  $2 \cdot \Delta x / L = n$ , sent  $n = 0, 1, 2 \dots$  ja que llavors  $M^2 = \left[ \sum_{p=1}^M e^{2i\psi_{p,n}} \cdot \sum_{p=1}^M e^{-2i\psi_{p,n}} \right]$  (6. 21). Extret de [13].

## Comparació de resultats segons models i característiques

En aquest apartat s'exposen els resultats dels anàlisis de les dades procedents dels assajos. A partir d'aquests resultats es poden extreure certes conclusions que permeten definir un model definitiu, un model eficient per a certes sol·licitacions de període i alçada d'ona en un clima mediterrani.

La metodologia seguida és la tria d'aquelles propietats que es consideren més favorables per al funcionament del dic mitjançant la comparació de resultats. S'està cercant els paràmetres més dissipadors i no un resultat estadístic dels assajos, doncs, com ja s'ha comentat en apartats anteriors, l'objectiu de la tesina és trobar un model òptim i no simplement analitzar el comportament dels dos models objectes d'estudi.

Per obtenir una visió clara dels resultats es decideix començar per comparar el coeficient de reflexió ( $Kr$ ), doncs és un dels paràmetres més significatius del bon o mal funcionament del model. D'aquesta forma es pot apreciar quins assajos han tingut un comportament més dissipatiu i quins menys, i comparar-los de forma quantitativa.

El càlcul experimental del coeficient de reflexió consisteix en obtenir la relació entre les altures d'ona significants espectrals incident i reflectida a la zona d'estudi, després d'haver realitzat la corresponent separació del registre de l'onatge.

$$Kr = \frac{H \text{ reflectida}}{H \text{ incident}} \quad (6. 22)$$

S'han realitzat tres grups en funció del paràmetre  $Kr$ :  $Kr < 40$ ,  $40 \leq Kr \leq 60$ , o  $60 < Kr$ , i s'han descartat directament aquells resultats amb un  $Kr > 60$ , doncs se'ls ha considerat inacceptables pel que fa a la dissipació d'energia i reducció d'alçada d'ona reflectida. A més també s'han separat els resultats per tipus de model, doncs els dos models són mecànica i geomètricament diferents i estan exposats a diferents sol·licitacions mareomotrius, per tant les seves dades només es poden comparar qualitativament.

És rellevant indicar que a més s'han descartat tots aquells assajos que responien a les sol·licitacions amb un comportament hidràulic o mecànic inadequat. Així doncs s'han descartat aquells assajos en els que es produïa un ultrapassament excessiu, aquells en els que es detectava el fenomen de ressonància dins del pati, o aquells en que el funcionament de la comporta era inexistent, com per exemple quan el moviment de la comporta se solapava amb el del tren d'ones i per tant era com si aquesta no existís.

Cal apuntar que els únics mesuraments quantitius realitzats durant els assajos han estat els mesuraments de l'alçada d'ona. Per tant, tots aquests fenòmens que s'esmenten al paràgraf anterior s'han identificat de forma qualitativa, ja sigui in situ de forma visual, o a posteriori visualitzant el registre multimèdia del assaig (recordar que es va gravar cada assaig amb dues càmeres de vídeo i es va fotografiar també tots els assajos en diferents instants de temps).

Així doncs, els resultats de l'anàlisi de les dades dels assajos que han obtingut una reflexió acceptable ( $Kr < 60\%$ ) i a més no se n'ha observat cap fenomen impropedent durant l'assaig són els següents:

Assaig	$Kr$ (%)	T (s)	Material	Pati	Angle Inicial	
171109_17	36,44	1,70	Acer	Mig	30°	$Kr < 40\%$
171109_20	35,63	1,70	Acer	Curt	30°	
171109_26	33,21	1,70	Resina	Mig	30°	
171109_32	37,39	1,70	Resina	Mig	30°	
171109_35	31,07	1,70	Resina	Curt	30°	
171109_38	31,38	1,70	Resina	Curt	30°	
171109_41	35,43	1,70	Resina	Mig	30°	
181109_5	38,08	1,70	Acer	Mig	30°	
181109_11	37,15	1,70	Acer	Curt	30°	
181109_20	34,93	1,70	Acer	Mig	30°	
171109_16	54,74	1,41	Acer	Mig	30°	$40\% < Kr < 60\%$
171109_19	40,58	1,41	Acer	Curt	30°	
171109_34	46,43	1,41	Resina	Curt	30°	
171109_37	45,48	1,41	Resina	Curt	30°	
181109_7	47,22	1,41	Acer	Curt	30°	
181109_8	49,95	1,70	Acer	Curt	30°	
181109_10	46,46	1,41	Acer	Curt	30°	
181109_14	42,05	1,70	Acer	Mig	30°	
181109_22	50,95	1,41	Acer	Curt	30°	
181109_23	40,27	1,70	Acer	Curt	30°	

Figura 51. Dades del Model 1

Assaig	$Kr$ (%)	T (s)	Material	Pati	Angle inicial	Radi de Gir	
241109_15	29,46	1,48	Resina	Llarg	30°	Curt	$Kr < 40\%$
241109_19	30,16	1,48	Resina	Curt	30°	Curt	
251109_2	35,03	1,48	Resina	Llarg	30°	Curt	
251109_35	33,79	1,48	Resina	Llarg	30°	Llarg	
251109_41	31,26	1,48	Resina	Curt	30°	Curt	
251109_44	34,84	1,48	Resina	Llarg	30°	Curt	
251109_38	49,61	1,48	Resina	Curt	30°	Llarg	$40\% < Kr < 60\%$

Figura 52. Dades del Model 2

Com es pot observar, de la gran quantitat d'assajos realitzats (veure els annexes d'assajos) els resultats interessants es redueixen a menys d'una trentena. Això és degut a que es van realitzar una gran quantitat d'assajos que van resultar poc complaents, ja sigui per un alt coeficient de reflexió com per un comportament hidràulic i/o mecànic inadequat.

L'alta quantitat d'assajos amb mals resultats és atribuïble a la dificultat inherent a la predicció dels possibles comportaments de les múltiples combinacions de propietats entre models (longituds de pati, dimensions), comportes (materials, radis de gir, dimensions, coaccions, angle inicial) i característiques marítimes (períodes).

Si analitzem al detall les dues taules anteriors es poden extreure diverses conclusions tant a nivell de característiques marítimes com a nivell mecànic o geomètric. El primer aspecte que salta a la vista és la influència positiva dels períodes llargs (cal recordar que els períodes que s'utilitzaren en els assajos foren de 1,13 a 1,70 segons en el Model 1 i de 0,74 a 1,48 segons en el Model 2). S'observa que els resultats més favorables es produeixen quan els models estan sota l'efecte d'onades amb els períodes més llargs (1,48s o 1,70s). Així que la primera conclusió s'entreu fàcilment.

A més, en tots els assajos que han resultat tenir un  $Kr < 60\%$  la comporta estava situada en posició inicial de  $30^\circ$ . Això ens indica que aquesta premissa és essencial a l'hora de poder dissipar energia amb uns certs resultats. Així que aquesta serà una característica segura en el disseny definitiu del dic.

Un cop copsades les característiques comuns més evidents, procedim a un anàlisi exhaustiu dels resultats per intentar treure el major nombre de conclusions possibles d'aquestes dades seleccionades. Així doncs, per continuar amb l'anàlisi organitzem les dades anteriors des d'un altre punt de vista: el material de la comporta del model (resina, acer o pòrex+pvc), i estudiem la qüestió des d'un nou prisma. Això ens permetrà copsar altres propietats i, en conseqüència, obtenir noves conclusions.

Un cop feta aquesta nova classificació de les dades s'observa que el material Pòrex+PVC no té cap resultat acceptable en quant a  $Kr$ , i que no hi ha cap dels assajos amb aquest tipus de comporta en els resultats seleccionats ( $Kr < 60\%$ ). Així doncs es descarta el model amb un sistema de comporta + flotador, que és el que representaven aquestes comportes de Pòrex+PVC. Aquesta opció tenia l'objectiu d'introduir una major mobilitat de la comporta per poder-la aprofitar per generar energia elèctrica. S'anirà veient durant el procés d'anàlisi de resultats i conclusions que aquesta opció no és viable.

Per altra banda, tant l'acer com la resina, ambdós materials es troben en el grup de dades seleccionades com a dades acceptables de coeficient de reflexió. Així que per analitzar-les amb criteri i objectivitat, se separen les dades en dos grups per avaluar-ne el pes específic que tenen els materials vers el bon funcionament de la comporta.

Les dades que hi ha a continuació són agrupades per materials de comporta però no estan separades per models perquè es vol identificar la seva incidència independentment de la geometria restant del calaix. Així doncs es pot apreciar el pes específic del material de la comporta amb més independència dels altres factors.

En aquestes taules s'hi afegeix també la característica mecànica de les coaccions. S'explicita si el model té coaccions interiors o no (coacció anomenada  $k_2$  als assajos). Aquest és un fet important, doncs aporta una limitació al moviment de la comporta, així com una transició esmorteïda de la comporta de l'estat mòbil a l'estat en repòs i viceversa.

RESINA			ACER		
Assaig	Kr (%)	k2	Assaig	Kr (%)	k2
171109_26	33,21	no	171109_17	36,44	no
171109_32	37,39	si	171109_20	35,63	no
171109_35	31,07	si	181109_5	38,08	si
171109_38	31,38	si	181109_11	37,15	si
171109_41	35,43	si	181109_20	34,93	si
171109_34	46,43	si	171109_16	54,74	no
171109_37	45,48	si	171109_19	40,58	no
241109_15	29,46	si	181109_7	47,22	si
241109_19	30,16	si	181109_8	49,95	si
251109_2	35,03	si	181109_10	46,46	si
251109_35	33,79	si	181109_14	42,05	si
251109_41	31,26	si	181109_22	50,95	si
251109_44	34,84	si	181109_23	40,27	si
251109_38	49,61	si			

Figura 53. Comparació de les dades en funció del material de la comporta

Al analitzar aquestes taules s'obté una conclusió interessant: la coacció interior de la comporta és un fet rellevant quant a la reflexió. De les catorze dades de d'assajos amb comporta de resina, i amb una reflexió que oscil·la entre el 30% i el 50% de l'onatge incident, tretze contenen amb un sistema d'esmoreïment al parament interior de la comporta.

Aquest fet no pot ser passat per alt, doncs amb les comportes d'acer succeeix quelcom similar: de les tretze dades dels assajos amb comportes d'acer que oscil·len entre un 35% i un 55% de reflexió de l'onatge incident, nou estan equipats també amb coacció elàstica al parament interior de la comporta.

Això ens aporta que un 93% dels casos en comporta de resina que compleixen uns criteris acceptables de reflexió contenen amb un sistema elàstic de coacció del moviment en el parament interior de la comporta. I un 70% dels assajos amb comporta d'acer que compleixen amb els criteris acceptables de reflexió també contenen amb un sistema elàstic de coacció del moviment en el parament interior de la comporta. És a dir, un 81,5% dels resultats que han tingut un  $Kr < 55\%$  contenen amb un sistema elàstic de coacció del moviment en el parament interior de la comporta.

Per tant tot sembla indicar que la elecció d'un model amb coaccions interiors és més que recomanada. Així que descartem els pocs resultats amb  $Kr < 60\%$  sense coaccions interiors i seguim analitzant els resultats dels assajos restants per filar més prim en les conclusions. A mida que un paràmetre que queda estudiat el model final es va perfilant més.

Si es vol aconseguir una combinació encara més dissipadora no n'hi ha prou amb el criteri  $Kr < 60\%$  perquè ja hi ha diversos dics verticals perforats que aconseguen un coeficient de reflexió menor. Per tant no té massa sentit construir un prototip amb un mecanisme més costós o complicat si no s'aconsegueixen uns resultats millors.



Així doncs es procedeix a analitzar ara el grup d'assajos amb un  $Kr < 40\%$ , un cop descartats ja els tres casos d'aquest grup en els quals no hi ha coaccions elàstiques interiors.

	<b>Assaig</b>	<b>Kr (%)</b>	<b>T (s)</b>	<b>Material</b>	<b>Pati</b>	<b>Radi de Gir</b>
<b>MODEL 1</b>	171109_32	37,39	1,70	Resina	Mig	Curt
	171109_35	31,07	1,70	Resina	Curt	Curt
	171109_38	31,38	1,70	Resina	Curt	Curt
	171109_41	35,43	1,70	Resina	Mig	Curt
	181109_5	38,08	1,70	Acer	Mig	Curt
	181109_11	37,15	1,70	Acer	Curt	Curt
	181109_20	34,93	1,70	Acer	Mig	Curt
<b>MODEL 2</b>	241109_15	29,46	1,48	Resina	Llarg	Curt
	241109_19	30,16	1,48	Resina	Curt	Curt
	251109_2	35,03	1,48	Resina	Llarg	Curt
	251109_35	33,79	1,48	Resina	Llarg	Llarg
	251109_41	31,26	1,48	Resina	Curt	Curt
	251109_44	34,84	1,48	Resina	Llarg	Curt

Figura 54. Taula de dades amb  $Kr < 40\%$

En aquesta nova taula s'observen interessants propietats tant hidrodinàmiques com de geometria i mecànica, com pel que fa als materials de construcció de la comporta. Quant a les propietats hidrodinàmiques s'observa que tots els períodes corresponen als valors més alts de les sèries, els períodes més llargs amb els que s'ha assajat en cada model. Per tant queda ratificada la apreciació realitzada anteriorment referent a que els períodes llargs afavoreixen que el sistema de pèndol invertit esmorteït dissipï més energia.

Quant a les propietats mecàniques i geomètriques s'observa que tots els radis de gir menys un són curts. El radi de gir curt aporta una superfície major del parament exterior on es produeix el flux lliure d'aigua entre l'interior i l'exterior del dic. Aquesta superfície contribueix a reduir les agitacions i turbulències produïdes dins del pati, i per tant té sentit que a major superfície (radi curt) major dissipació d'energia i menor reflexió (comportament de dic perforat).

Pel que fa al material de la comporta s'observa que tots els assajos excepte tres utilitzen una pala de resina, la qual representa el formigó en massa. Aquesta dada també és rellevant, tot i que no és totalment determinant perquè en el segon model no es va emprar l'acer com a material de comporta i per tant no es pot saber si hagués donat també bons resultats o no.

Per últim s'ha d'analitzar la longitud de pati. S'observa que en el Model 1 els resultats són bons tant en pati curt com pati mig, però en canvi no n'hi ha cap de pati llarg. Això pot indicar que el pati llarg no és necessari és. Per altra banda, en el Model 2 no es va construir el que se suposava seria el pati llarg per raons constructives de prototip (hauria mesurat 40 metres a escala real). Per tant es va fer només dos patis, el curt i el mig, però que al només haver-hi dos se'ls van anomenar curt i llarg respectivament. Així doncs, tot i que la longitud de pati no quedi totalment definida amb les dades obtingudes pels assajos, si que es pot observar un funcionament correcte del dic sense la necessitat d'un pati llarg.

## Combinació dels factors més dissipadors

En aquest apartat s'exposa la combinació o combinacions més interessants que s'han obtingut durant tot l'estudi. Mitjançant els assajos i els seus anàlisis s'han arribat a certes conclusions sobre la configuració del prototip. Tenint en compte totes les dades anteriorment exposades es deixa entreveure un model que pot aportar unes qualitats dissipatives de l'onatge que satisfacin l'objectiu principal de l'estudi.

La combinació de factors més dissipadora després de l'estudi de tots els resultats i de la tria d'aquests amb criteri objectiu és la següent:

- \* Material de la comporta → Resina o acer
- \* Longitud del radi de gir de la comporta → Curt
- \* Angle de la posició inicial de la comporta respecte la vertical → 30°
- \* Coacció interior de la comporta → Sí
- \* Coacció exterior de la comporta → Sí
- \* Longitud de pati → Curt o mig

Tot i que el model que es proposa té com a material de comporta la resina o l'acer, podríem decantar-nos per la resina perquè s'ha assajat més vegades amb aquest tipus de comporta. Per altra banda, que l'acer hagi sigut sotmès a una quantitat menor d'assajos no indica que els seus resultats no siguin vàlids, però sí que poden ser poc representatius del seu comportament real.

Si ens posem del costat de la seguretat, agafarem la comporta de resina (que representa formigó en massa), perquè el seu comportament ha quedat més ben definit al llarg de l'estudi.

La combinació d'aquestes característiques va acompanyada de les dades que s'han prefixat en un inici com són l'ample del dic de 37,5 cm. S'opta per un calat de 36,4 cm metres (35 cm en el Model 1 i 33,08 cm en el Model 2), i una cota de coronació de 5,5 cm. Una longitud de pati de 43,6 cm com fruit de l'igualtat  $B/L = 0,2$ , vista a l'apartat *Comportament del fenomen de reflexió* del Capítol 3.

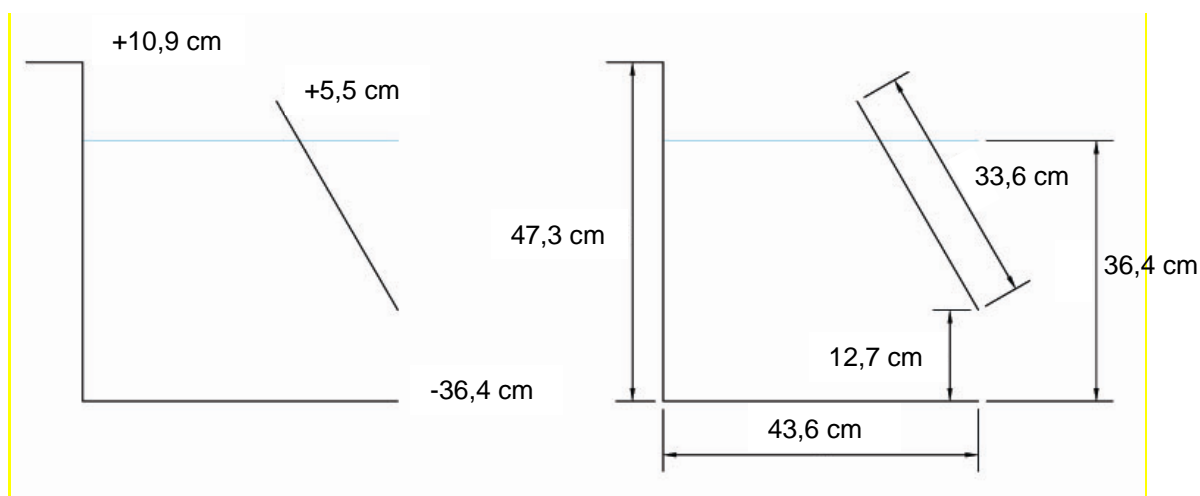


Figura 55. Perfil longitudinal del nou prototip, (esquerra) dades de calat i coronació i (dreta) dimensions (en metres)

El model que s'acaba de descriure és el producte d'aquest estudi, i el seu àmbit d'aplicació és la façana mediterrània. Aquests models han estat sotmesos a condicions marítimes que coincideixen i descriuen de forma estadística el caràcter mareomotriu de la zona del Mediterrani. Així doncs el model hauria de ser assajat en aquestes condicions, i no s'assegura que es pugui utilitzar eficaçment en altres condicions marítimes que representin altres punts del planeta.

Tot i així no es descarta que es pugui construir un prototip semblant i més eficaç que el que es proposa. Aquest ha estat el resultat de les múltiples combinacions realitzades a l'estudi, però és evident que sempre es poden trobar altres solucions i que la ciència i la tecnologia viuen permanentment en el progrés i en l'avanç dels coneixements.





**CAPÍTULO 7**

---



## Conclusions

Els calaixos perforats són una construcció bastant nova (Jarlan, 1965) i estan encara en vies de desenvolupament. Constantment es construeixen noves variacions d'aquest tipus d'obra i es milloren les seves propietats i els seus comportaments. Tot indica que encara queda un gran camí que recórrer per aprofitar al màxim les possibilitats que ens ofereixen aquest tipus de construccions.

A més no es coneixen exactament, o no se saben predir d'una forma exacta, les possibles pressions internes que pot patir un dic perforat. Actualment hi ha diferents formulacions però cap d'elles és exacte. La recerca és el camí a seguir per poder arribar a comprendre i dominar el comportament exacte d'aquestes estructures, les quals són cada dia de més utilitat.

Aquest estudi ha aportat llum sobre nous aspectes poc estudiats fins ara. L'ús de mecanismes a la enginyeria marítima és minoritari. Normalment s'usen mecanismes per a recollir l'energia mareomotriu, però mai com a element de contenció, i menys com a element dissipatiu d'energia.

És una idea innovadora i que pot tenir una sortida real al mercat si se segueix treballant sobre ella. De moment es troba en un estat embrionari, però és una porta a grans possibilitats. La possible combinació de funcions (obra d'abric + obra d'aprofitament d'energia) és actualment irrealitzable, però més real que temps ençà.

Els resultats aconseguits són bastant acceptables, tot i que faltaria poder construir un prototip real i veure com es comporta. Actualment aquesta investigació segueix en curs i en els pròxims mesos és possible que es publiquin nous resultats.

Les conclusions sobre els models utilitzats durant els assajos realitzats i les seves propietats s'exposen a continuació:

- \* La comporta inclinada  $30^\circ$  com a posició inicial dona uns resultats molt més favorables que les comportes a  $0^\circ$  o  $45^\circ$  pel que fa a la dissipació d'energia (veure annexes de resultats). Donat que els resultats amb la paret a  $30^\circ$  són millors que els resultats amb la paret a  $0^\circ$ , tenim una millora substancial de la geometria dels calaixos perforats si la comparem amb les versions clàssiques de calaix vertical perforat.
- \* Els materials de baixa densitat no poden ser usats per construir una comporta perquè el seu comportament mecànic desapareix. El moviment de la comporta se solapa amb el de l'onatge i només es mou al ritme d'aquest sense infligir cap tipus de dissipació d'energia. Podria ser usat com a instrument per recollir energia perquè l'absorbeix ràpidament i treballa al ritme de l'onatge.
- \* El dic perforat de pèndul invertit necessita un radi curt per poder funcionar correctament. D'aquesta forma les seves característiques geomètriques són més semblants a les d'un dic perforat amb finestres. Sembla ser que l'espai que deixa la comporta al moure's no és suficient per dissipar l'agitació dins del pati i l'energia acumulada. Així que es mostra com a necessària la finestra sota el pèndul per dissipar l'energia de forma més eficaç.

- \* El formigó torna a ser material que millor funciona com a element constructiu dels tres assajats. Això reforça la llarga trajectòria d'ús del formigó en la construcció civil. Tot i així s'han obtingut resultats interessants amb l'acer i no s'ha de descartar aquest com a material possible de comporta. Es requereixen més assajats per poder decidir sobre aquest material.

Els assajos de laboratori són sempre una aproximació de la realitat, i se'ls ha de tractar com a tals. S'ha de prendre distància entre el que succeeix durant un assaig i el que es pot produir a la realitat. Als assajos tots els paràmetres estan mesurats i calculats. tot el que succeeix és intencionat, i tot i així es produeixen fenòmens inesperats. La realitat és més complexa i aquests experiments serveixen per tenir una referència, però no es poden prendre al peu de la lletra.

Els resultats obtinguts són satisfactoris pel que fa a la reflexió. S'han aconseguit resultats amb uns valors de Kr que oscil·len entre el 30% i el 38% per a la combinació més òptima d'elements estructurals (períodes llargs, resina per la comporta, angle inicial 30°, coaccions elàstiques al moviment, radi de gir curt):

	Assaig	Kr (%)	T (s)	Material	Angle	Coaccions	Radi de Gir
<b>MODEL 1</b>	171109_32	37,39	1,70	Resina	30°	si	Curt
	171109_35	31,07	1,70	Resina	30°	si	Curt
	171109_38	31,38	1,70	Resina	30°	si	Curt
	171109_41	35,43	1,70	Resina	30°	si	Curt
<b>MODEL 2</b>	241109_15	29,46	1,48	Resina	30°	si	Curt
	241109_19	30,16	1,48	Resina	30°	si	Curt
	251109_2	35,03	1,48	Resina	30°	si	Curt
	251109_41	31,26	1,48	Resina	30°	si	Curt
	251109_44	34,84	1,48	Resina	30°	si	Curt

Figura 56. Taula de resultats òptims. Resum de les millors propietats

Tot i així s'hauria de seguir investigant en aquesta direcció per perfeccionar el model i per això s'ha proposat en l'apartat anterior un nou model per continuar investigant (veure Figura 55).

Tot sembla indicar que no es pot utilitzar aquest mecanisme per adquirir energia del mar perquè el recorregut realitzat per aquelles comportes que funcionen correctament en temes de dissipació d'energia no són massa llargs. Per tant l'ús d'aquestes comportes com a element de captació d'energia queda de moment descartat.

De totes maneres aquest estudi no té perquè ser definitiu, doncs si es perfecciona el calaix en un futur, aquest tindrà moviment i aquest es pot intentar modificar per obtenir resultats també acceptables quant a la recollida d'energia provinent del mar i no tan sols com a element de contenció i dissipació d'energia.

Aquest dic pot aportar grans avantatges en les bocanes dels ports i fer més fàcil la navegació i la maniobrabilitat en aquestes zones portuàries. A més gràcies al seu element dissipatiu es poden rebaixar les cotes de coronació i d'aquesta forma es poden reduir els impactes sobre el medi ambient. És una bona opció per reduir l'impacte paisatgístic i preservar el nostre litoral que ja està prou afectat per totes les obres portuàries existents.





# CAPÍTOL 8



## Referències

- [1] Galmés, J. L. Diseño innovador de diques verticales con geometrías cilíndricas. Tesina d'especialitat ETSECCPB-UPC, 2005
- [2] Grupo de Investigación del Medio Marino, Costero y Portuario y otras Áreas Sensibles. Proyecto de Investigación DILAPE. Informe nº1, 2009.
- [3] Corps of engineers (1984), U.S. Shore Protection Manual
- [4] Gracia, V. (2004) Apuntes de Ingeniería Marítima. Universitat Politècnica de Catalunya. ETSECCPB
- [5] Corps of engineers (2002), U.S. Army, Coastal Engineering Manual
- [6] Negro, V. et al. Diseño de Diques Verticales
- [7] Bélouregy, M., Rousset, J.M., et al. Perforated caisson breakwaters: Wave loads and hydraulic performance. Coastal Structures '99, Losada Ed.
- [8] Ageschou, H. et al. Planning and Design of Ports and Marine Terminals 1983
- [9] Bergmann H., Oumeraci H., Wave Loads on Perforated Caisson Breakwaters. Coastal Engineering 2000 Vol.2
- [10] Grupo de Investigación del Medio Marino, Costero y Portuario y otras Áreas Sensibles. Proyecto de Investigación DILAPE. Informe nº2, 2009.
- [11] Informe d'assajos de l'empresa INHA.
- [12] Pàgina web del CIEMLAB, <http://ciemlab.upc.edu/instalaciones/ciemit0>
- [13] Fontroig, B. H. Calibración del canal de oleaje CIEM para un ensayo de estabilidad de dique en talud. Tesina d'especialitat ETSECCPB-UPC 2004





**CAPÍTOL 9**

---



## Agraïments

M'agradaria agrair a totes les persones que m'han donat un cop de mà durant el procés de creació d'aquesta tesina:

- \* Gràcies a tots els companys de l'empresa INHA: L'Olaya, la Marta, la Mònica, la Vanessa, el Manuel, els Danis i la Júlia.
- \* També vull agrair el suport de la meva família, en especial els meus pares, que sempre m'han recolzat i animat a seguir.
- \* Els companys de classe, amb els que he compartit moltes hores d'estudi i amb els quals sempre és més fàcil treballar.
- \* El Professor Dr. Eng. José Luis Monsó de Prat per donar-me l'oportunitat de participar en un projecte tan interessant.

Sense l'ajut de totes aquestes persones aquesta tesina no hauria pogut ser realitzada.







**CAPÍTOL 10**

---



## Annexes

En aquest apartat es presenten les dades obtingudes dels assajos al canal CIEMito del LIM de la UPC. Estan ordenats per conjunt de propietats geomètriques i mecàniques, així que a cada pàgina hi ha un bloc d'assajos de les mateixes característiques físiques, on els paràmetres que hi varien són la longitud de pati i els períodes de l'onatge.

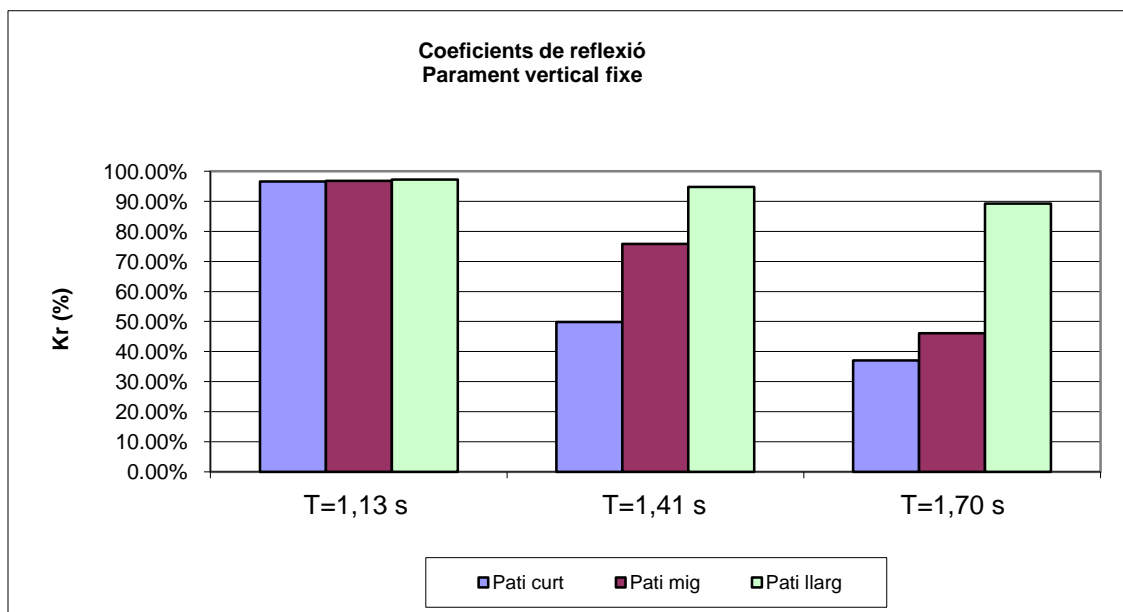
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** ACER  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 0°  
**Coacció interior de la comporta:** FIXE  
**Coacció exterior de la comporta:** FIXE  
**Model:** 1

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
171109_0	1,13	Curt	96,63%
171109_1	1,41	Curt	49,79%
171109_2	1,70	Curt	37,02%
171109_3	1,13	Mig	96,84%
171109_4	1,41	Mig	75,83%
171109_5	1,70	Mig	46,07%
171109_6	1,13	Llarg	97,25%
171109_7	1,41	Llarg	94,74%
171109_8	1,70	Llarg	89,26%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



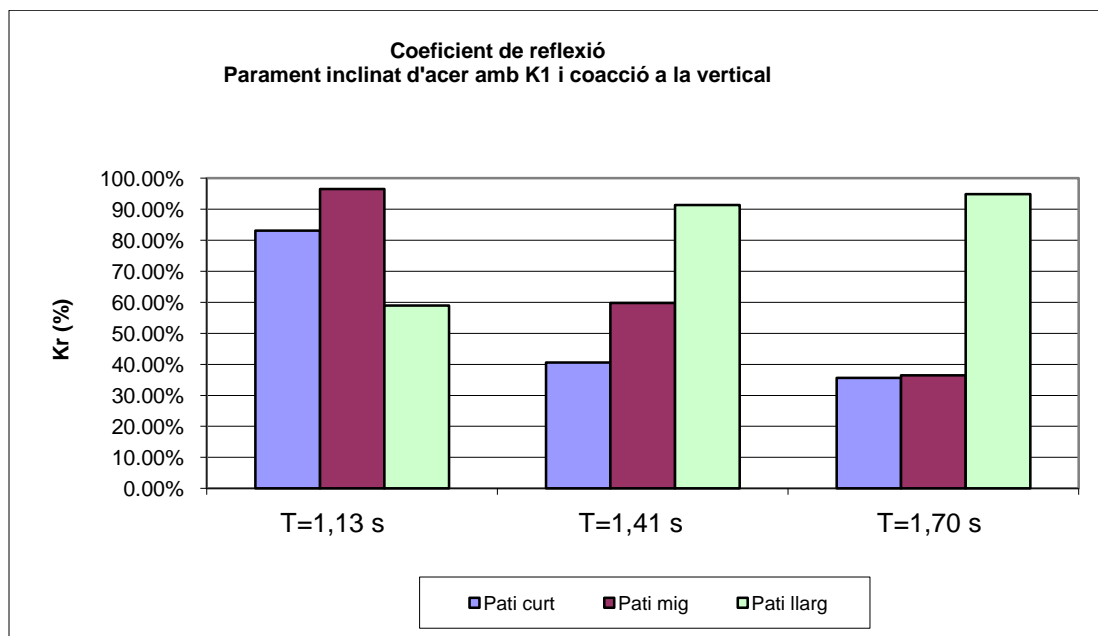
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** ACER  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K1 tocant la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** Coacció vertical  
**Model:** 1

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
171109_18	1,13	Curt	83,14%
171109_19	1,41	Curt	40,58%
171109_20	1,70	Curt	35,63%
171109_15	1,13	Mig	96,51%
171109_16	1,41	Mig	59,74%
171109_17	1,70	Mig	36,44%
171109_12	1,13	Llarg	59,00%
171109_13	1,41	Llarg	91,36%
171109_14	1,70	Llarg	94,87%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



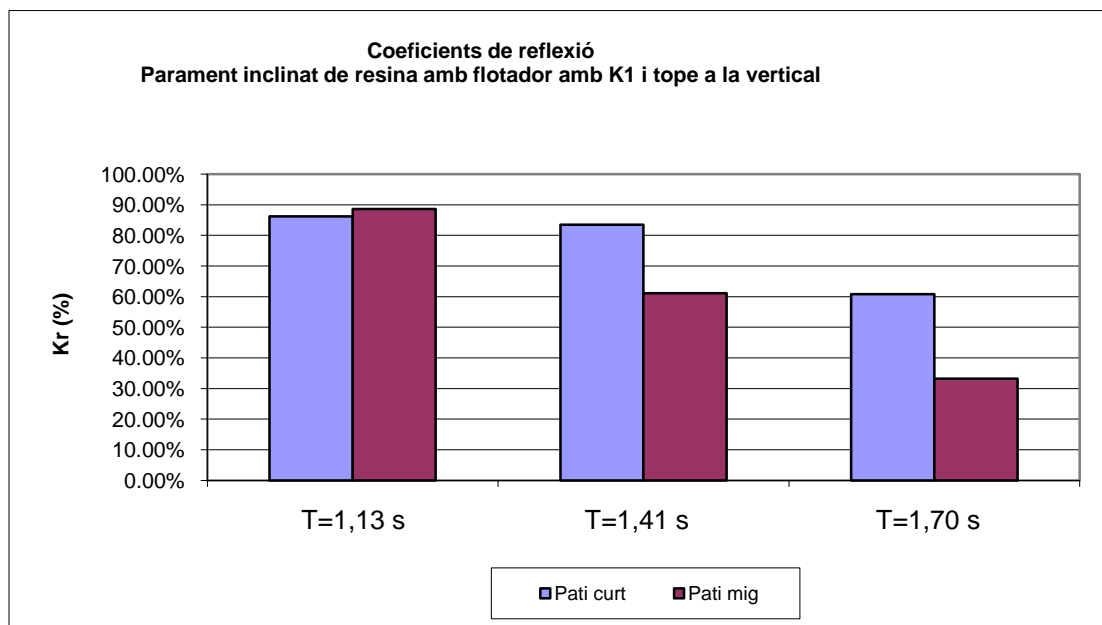
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

<b>Material de la comporta:</b>	RESINA AMB FLOTADOR
<b>Radi de gir de la comporta:</b>	CURT
<b>Angle inicial de la comporta:</b>	30°
<b>Coacció interior de la comporta:</b>	K1 tocant amb la comporta
<b>Coacció exterior de la comporta:</b>	Coacció vertical
<b>Model:</b>	1

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
171109_21	1,13	Curt	86,16%
171109_22	1,41	Curt	83,47%
171109_23	1,70	Curt	60,82%
171109_24	1,13	Mig	88,64%
171109_25	1,41	Mig	61,12%
171109_26	1,70	Mig	33,21%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



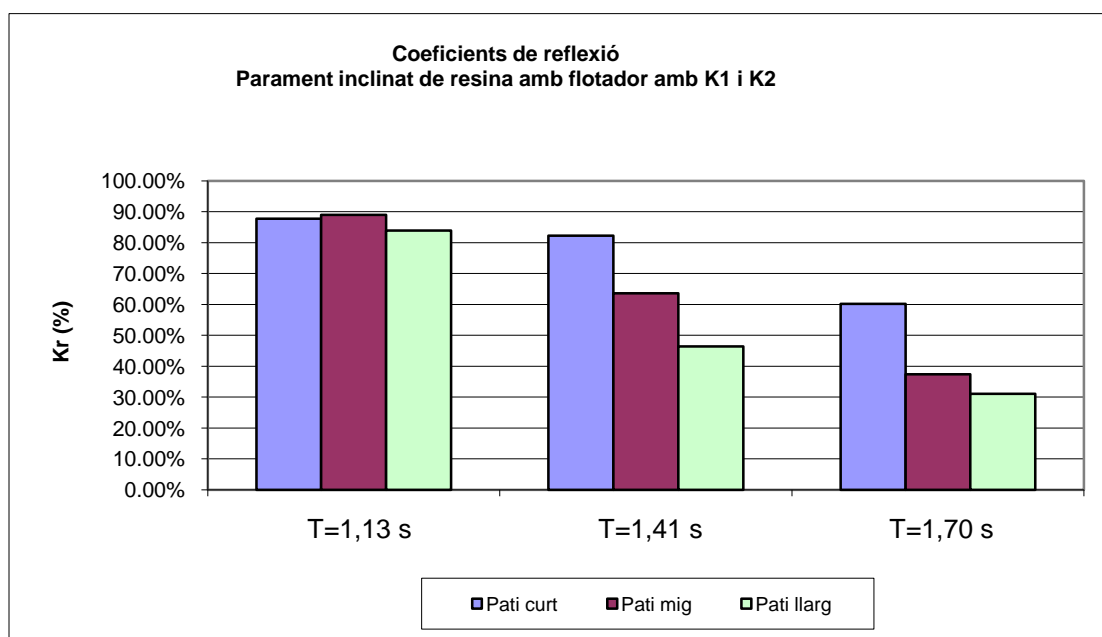
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** RESINA AMB FLOTADOR  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K1 tocant amb la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** K2 sense tocar amb la comporta  
**Model:** 1

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
171109_27	1,13	Curt	87,77%
171109_28	1,41	Curt	82,20%
171109_29	1,70	Curt	60,17%
171109_30	1,13	Mig	88,92%
171109_31	1,41	Mig	63,63%
171109_32	1,70	Mig	37,39%
171109_33	1,13	Llarg	83,90%
171109_34	1,41	Llarg	46,43%
171109_35	1,70	Llarg	31,07%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



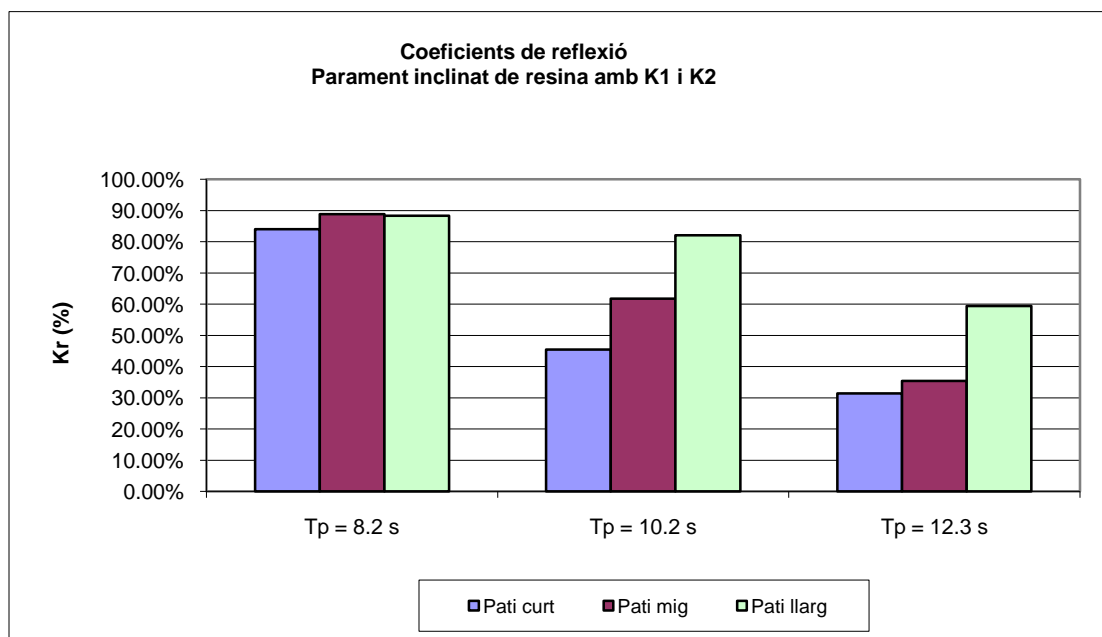
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** RESINA  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K1 tocant amb la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** K2 sense tocar amb la comporta  
**Model:** 1

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
171109_36	1,13	Curt	84,04%
171109_37	1,41	Curt	45,48%
171109_38	1,70	Curt	31,38%
171109_39	1,13	Mig	88,80%
171109_40	1,41	Mig	61,76%
171109_41	1,70	Mig	35,43%
171109_42	1,13	Llarg	88,37%
171109_43	1,41	Llarg	82,06%
171109_44	1,70	Llarg	59,39%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



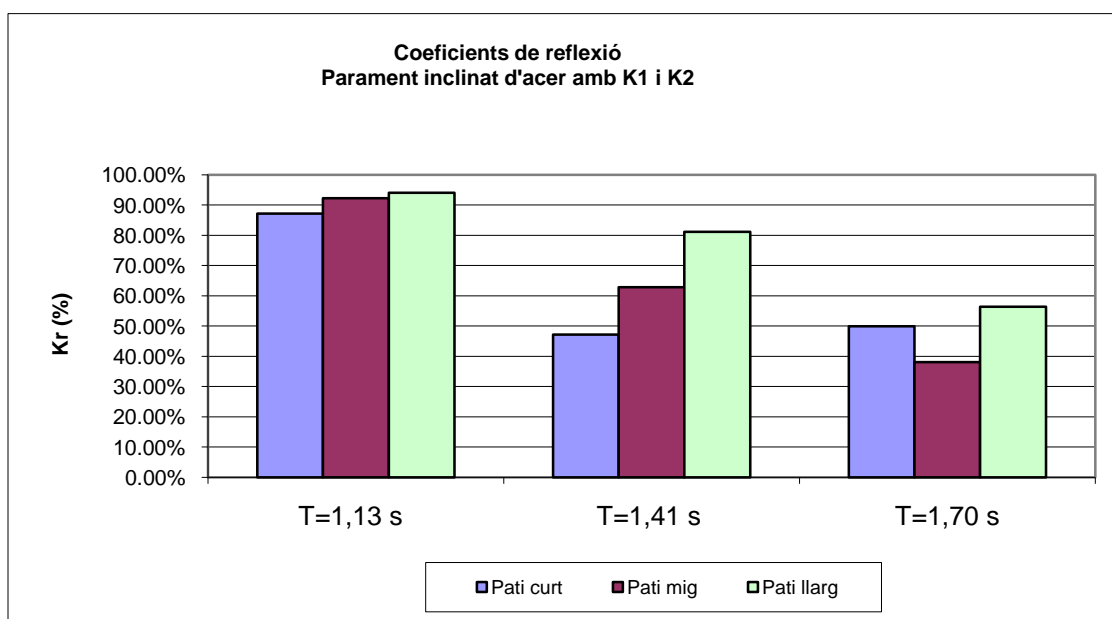
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** ACER  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K1 tocant amb la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** K2 sense tocar amb la comporta  
**Model:** 1

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
181109_6	1,13	Curt	87,23%
181109_7	1,41	Curt	47,22%
181109_8	1,70	Curt	49,95%
181109_3	1,13	Mig	92,29%
181109_4	1,41	Mig	62,81%
181109_5	1,70	Mig	38,08%
181109_0	1,13	Llarg	94,05%
181109_1	1,41	Llarg	81,10%
181109_2	1,70	Llarg	56,40%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:





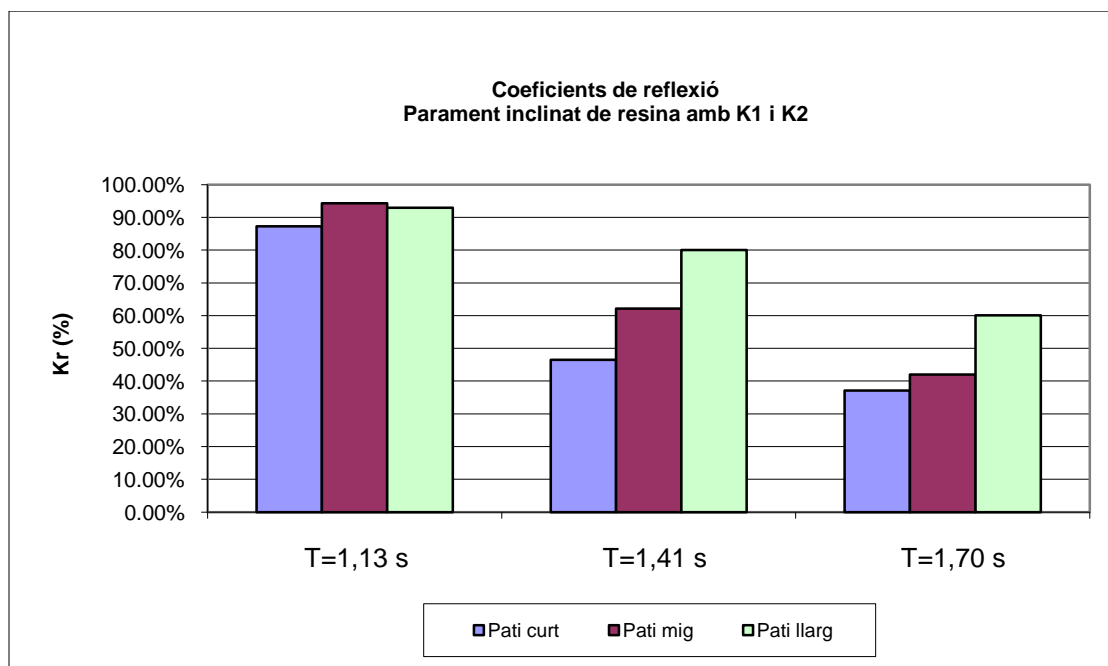
\* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** ACER  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K1 tocant amb la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** K2 tocant amb la comporta  
**Model:** 1

\* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
181109_9	1,13	Curt	87,26%
181109_10	1,41	Curt	46,46%
181109_11	1,70	Curt	37,15%
181109_12	1,13	Mig	94,26%
181109_13	1,41	Mig	62,16%
181109_14	1,70	Mig	42,05%
181109_15	1,13	Llarg	92,88%
181109_16	1,41	Llarg	80,06%
181109_17	1,70	Llarg	60,12%

\* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



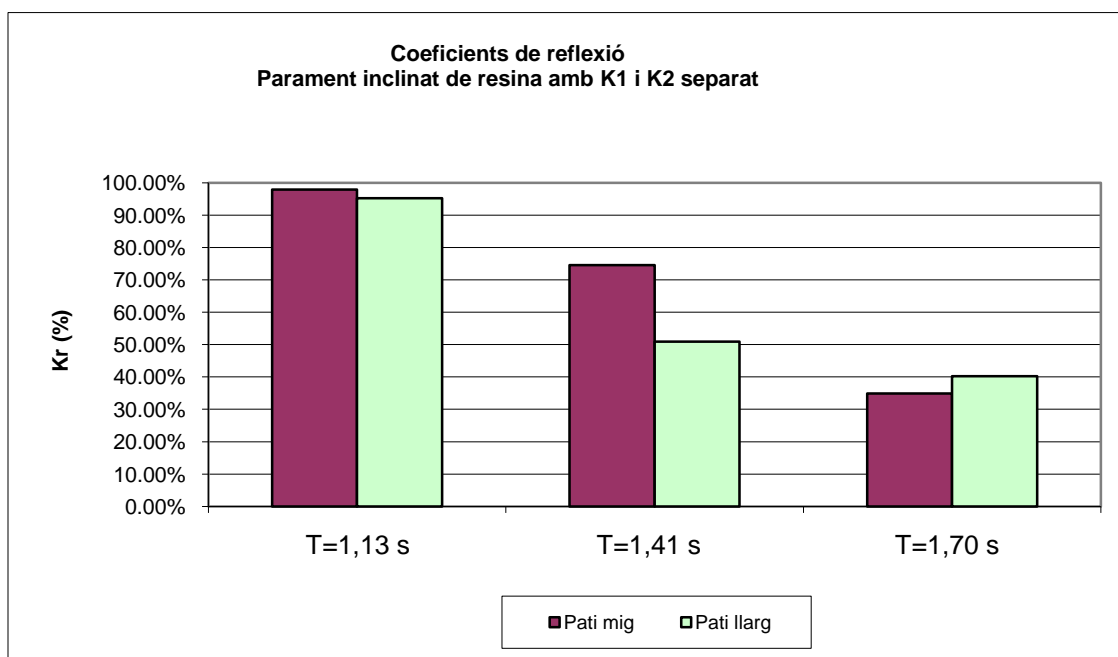
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** ACER  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K1 a 13mm de la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** K2 tocant amb la comporta  
**Model:** 1

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
181109_18	1,13	Mig	97,86%
181109_19	1,41	Mig	74,53%
181109_20	1,70	Mig	34,93%
181109_21	1,13	Llarg	95,20%
181109_22	1,41	Llarg	50,95%
181109_23	1,70	Llarg	40,27%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



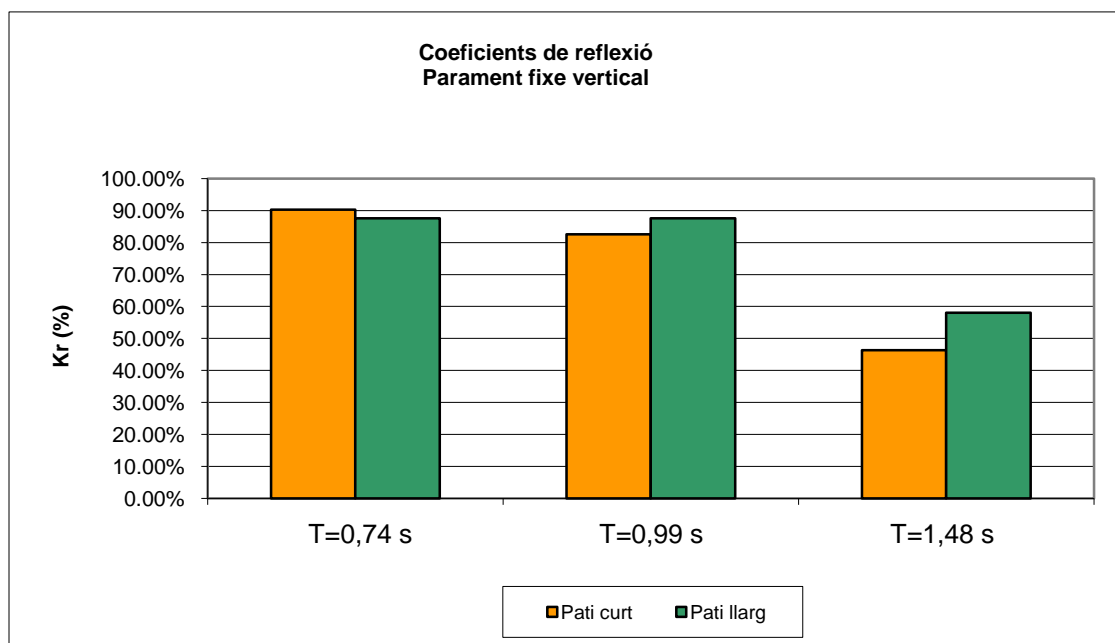
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** RESINA  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 0°  
**Coacció interior de la comporta:** FIXE  
**Coacció exterior de la comporta:** FIXE  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
241109_1	0,74	Curt	90,29%
241109_2	0,99	Curt	82,61%
241109_3	1,48	Curt	46,29%
241109_4	0,74	Llarg	87,54%
241109_5	0,99	Llarg	87,60%
241109_6	1,48	Llarg	58,08%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



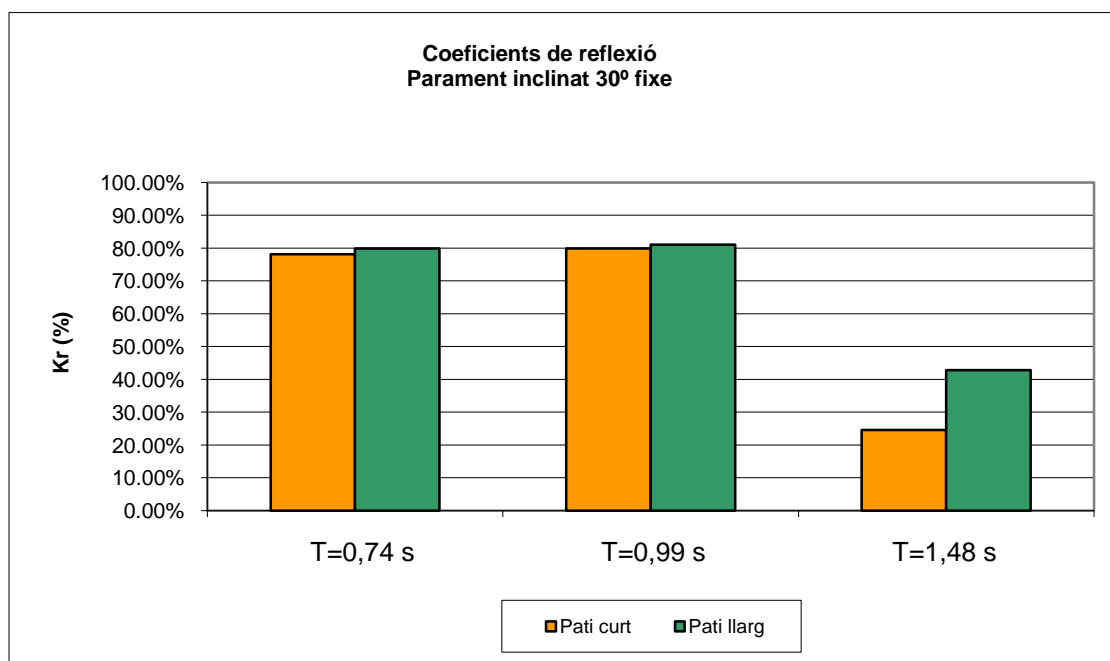
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** RESINA  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** FIXE  
**Coacció exterior de la comporta:** FIXE  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
241109_7	0,74	Curt	78,16%
241109_8	0,99	Curt	79,94%
241109_9	1,48	Curt	24,59%
241109_10	0,74	Llarg	79,93%
241109_11	0,99	Llarg	81,06%
241109_12	1,48	Llarg	42,84%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



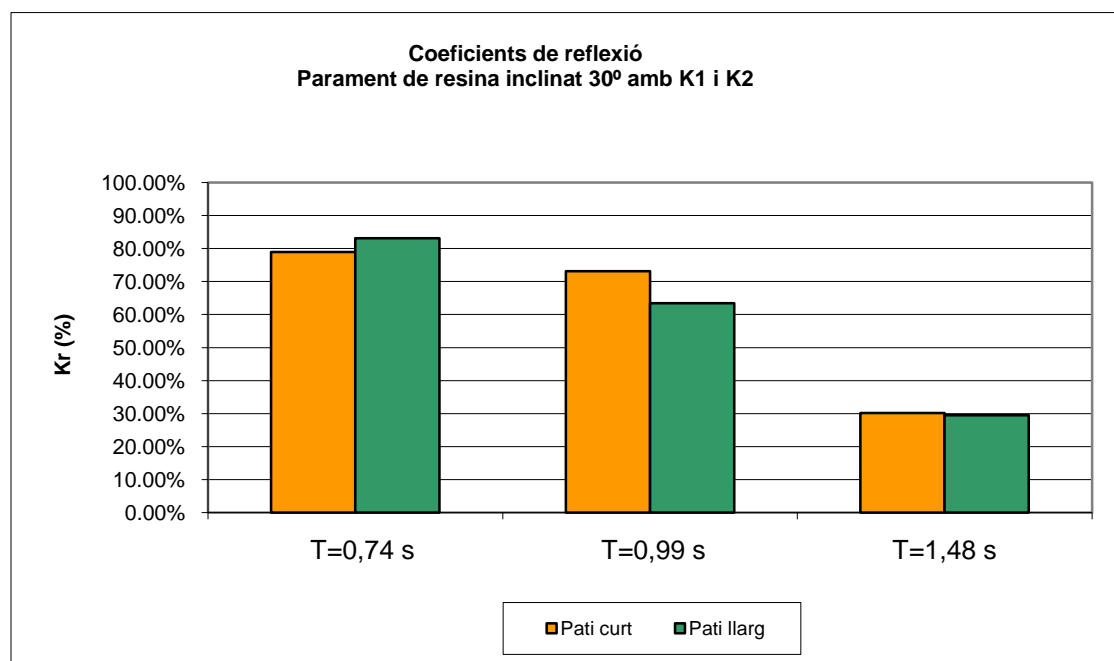
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** RESINA  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K1 tocant amb la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** K2 tocant amb la comporta  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
241109_17	0,74	Curt	78,89%
241109_18	0,99	Curt	73,10%
241109_19	1,48	Curt	30,16%
241109_13	0,74	Llarg	83,14%
241109_14	0,99	Llarg	63,43%
241109_15	1,48	Llarg	29,46%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



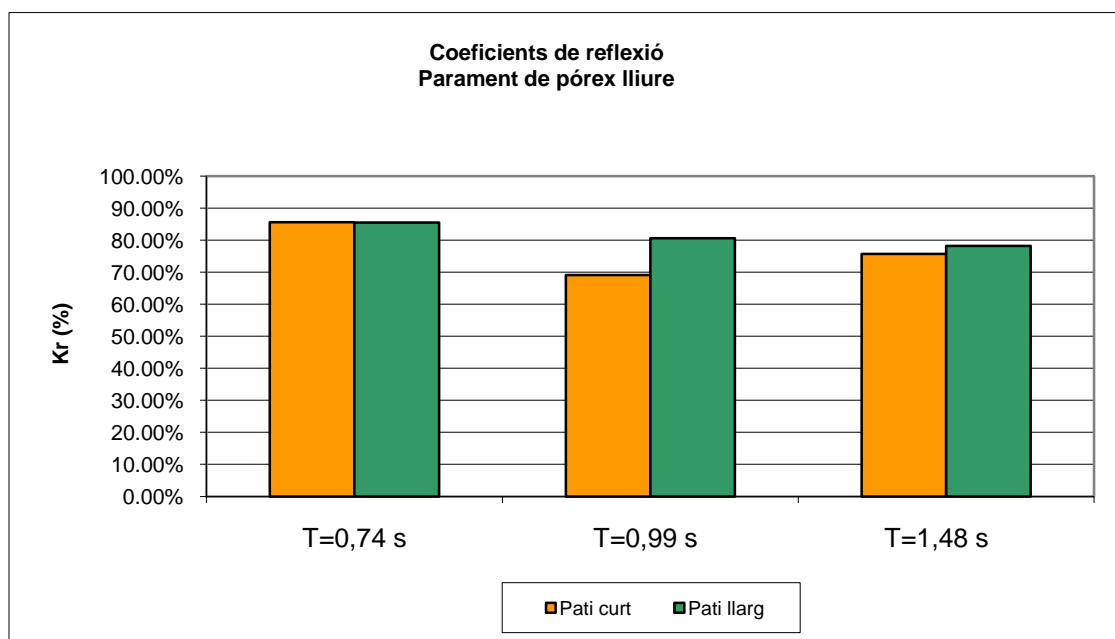
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** POREX  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 0°  
**Coacció interior de la comporta:** LLIURE  
**Coacció exterior de la comporta:** LLIURE  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
241109_20	0,74	Curt	85,59%
241109_21	0,99	Curt	69,06%
241109_22	1,48	Curt	75,74%
241109_23	0,74	Llarg	85,51%
241109_24	0,99	Llarg	80,58%
241109_25	1,48	Llarg	78,22%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



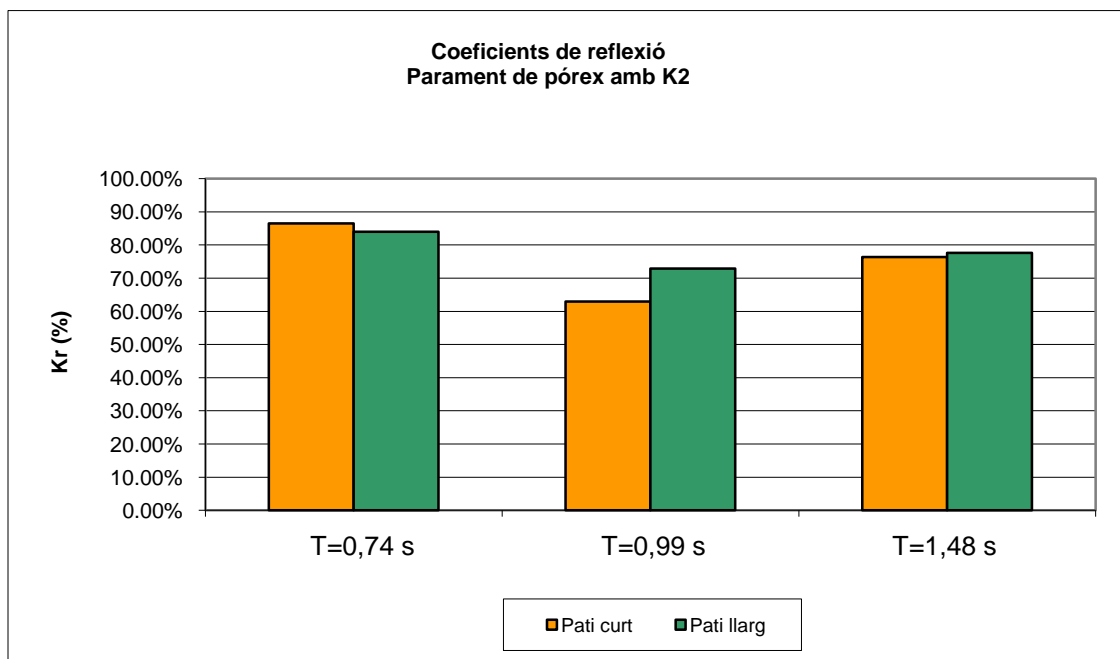
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** POREX  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 0°  
**Coacció interior de la comporta:** LLIURE  
**Coacció exterior de la comporta:** K2 tocant amb la comporta  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
241109_29	0,74	Curt	86,54%
241109_30	0,99	Curt	62,98%
241109_31	1,48	Curt	76,37%
241109_26	0,74	Llarg	84,04%
241109_27	0,99	Llarg	72,88%
241109_28	1,48	Llarg	77,60%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



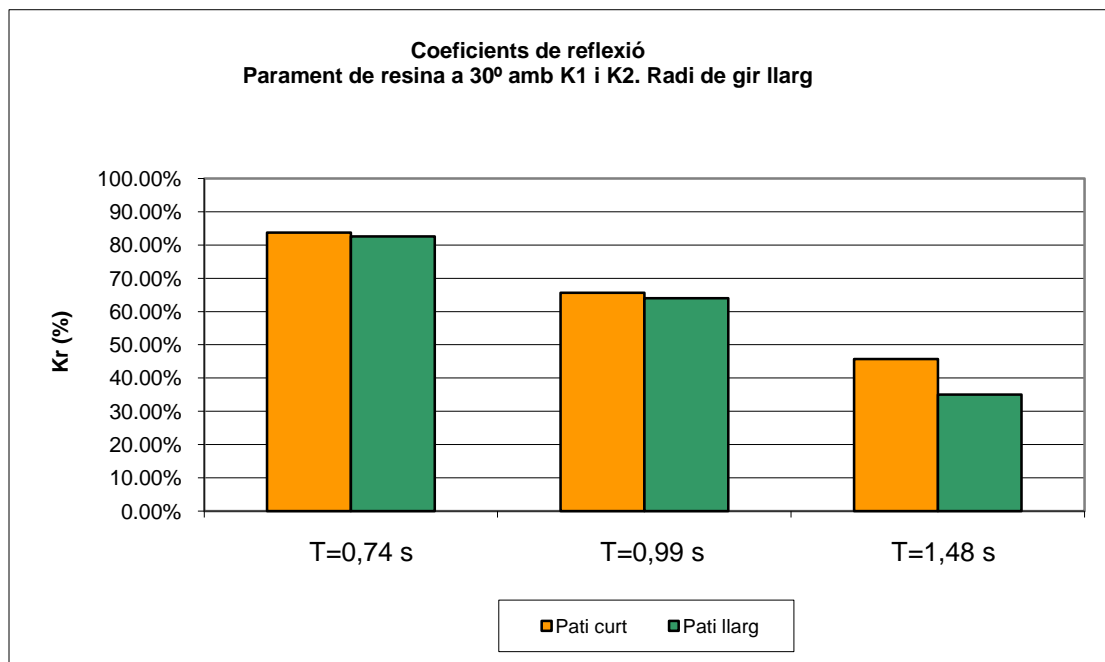
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** RESINA  
**Radi de gir de la comporta:** LLARG  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K1 tocant amb la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** K2 tocant amb la comporta  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
241109_35	0,74	Curt	83,71%
241109_36	0,99	Curt	65,60%
241109_37	1,48	Curt	45,68%
251109_0	0,74	Llarg	82,61%
251109_1	0,99	Llarg	63,98%
251109_2	1,48	Llarg	35,03%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:





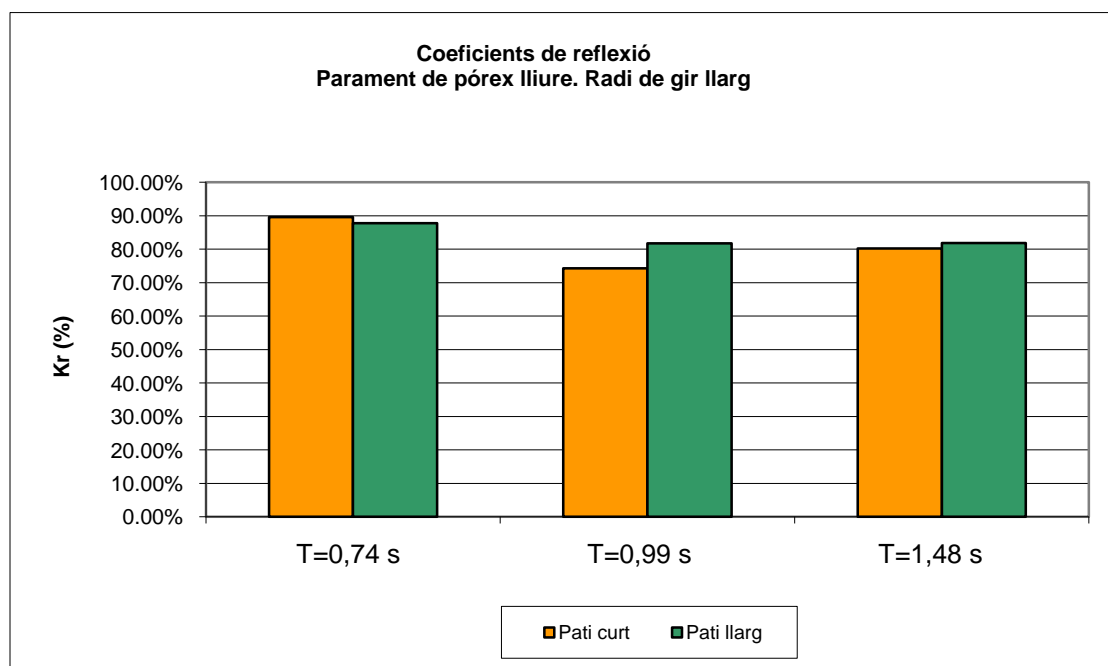
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** POREX  
**Radi de gir de la comporta:** LLARG  
**Angle inicial de la comporta:** 0°  
**Coacció interior de la comporta:** LLIURE  
**Coacció exterior de la comporta:** LLIURE  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
251109_3	0,74	Curt	89,60%
251109_4	0,99	Curt	74,28%
251109_5	1,48	Curt	80,16%
251109_6	0,74	Llarg	87,76%
251109_7	0,99	Llarg	81,71%
251109_8	1,48	Llarg	81,88%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



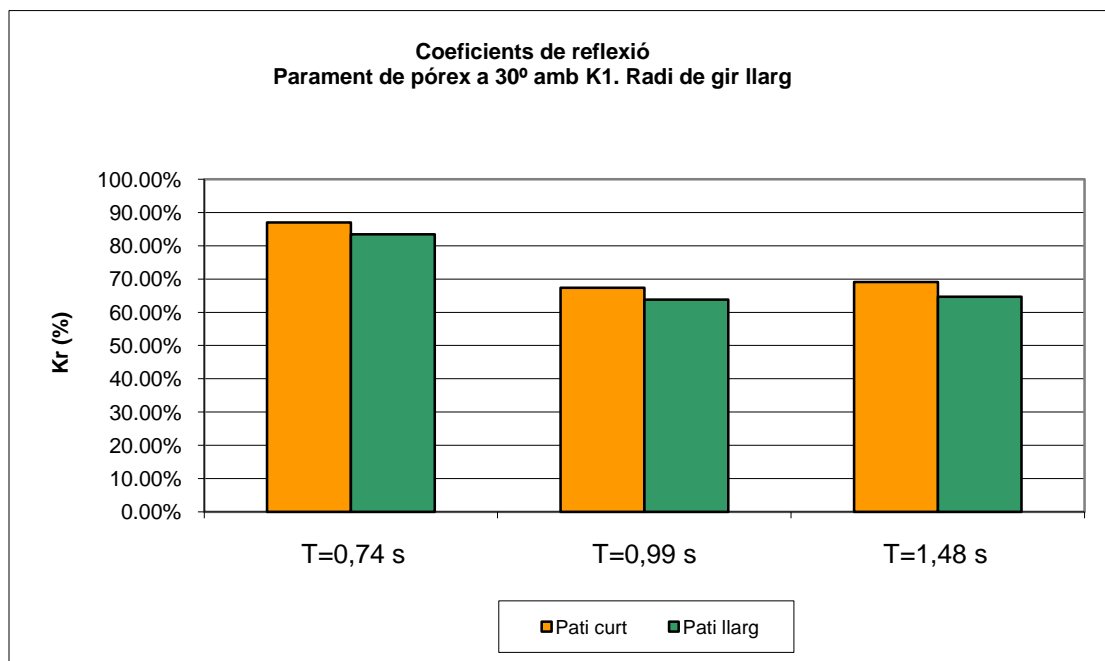
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** POREX  
**Radi de gir de la comporta:** LLARG  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K1 tocant amb la placa  
**Coacció exterior de la comporta:** LLIURE  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
251109_9	0,74	Curt	86,96%
251109_10	0,99	Curt	67,32%
251109_11	1,48	Curt	69,05%
251109_12	0,74	Llarg	83,44%
251109_13	0,99	Llarg	63,80%
251109_14	1,48	Llarg	64,63%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



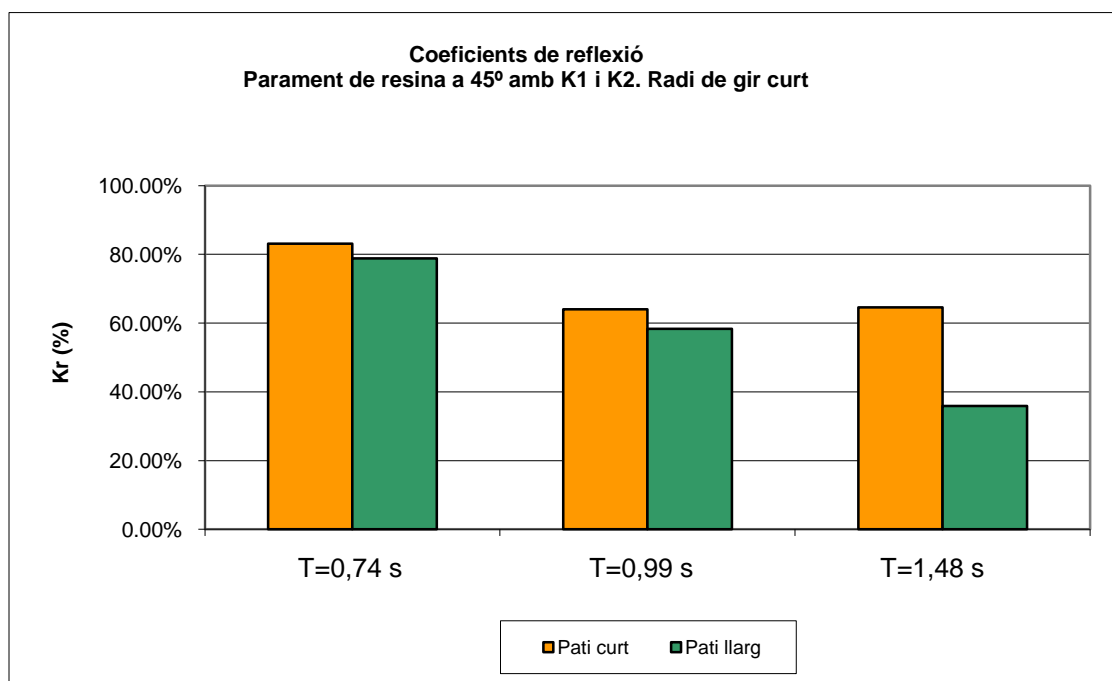
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** RESINA  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 45°  
**Coacció interior de la comporta:** K1 tocant amb la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** K2 sense tocar amb la comporta  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
251109_18	0,74	Curt	83,13%
251109_19	0,99	Curt	64,06%
251109_20	1,48	Curt	64,53%
251109_15	0,74	Llarg	78,81%
251109_16	0,99	Llarg	58,34%
251109_17	1,48	Llarg	35,92%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



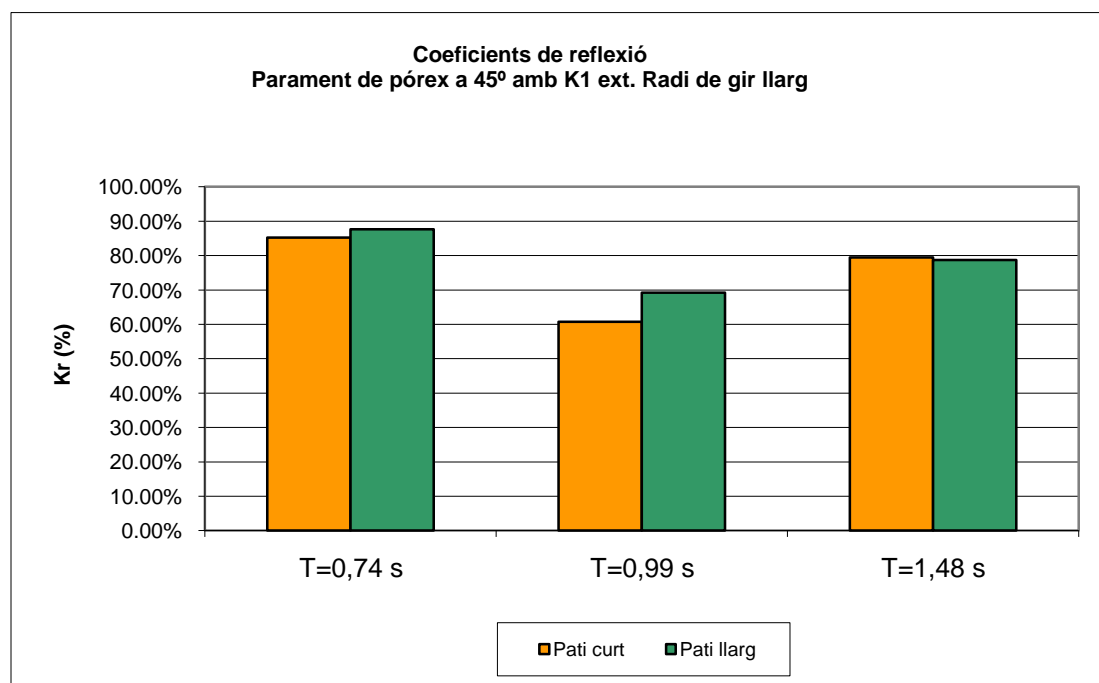
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** PÒREX  
**Radi de gir de la comporta:** LARG  
**Angle inicial de la comporta:** 45°  
**Coacció interior de la comporta:** LLIURE  
**Coacció exterior de la comporta:** K1 tocant amb la comporta  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
251109_48	0,74	Curt	85,22%
251109_49	0,99	Curt	60,74%
251109_50	1,48	Curt	79,45%
251109_45	0,74	Llarg	87,68%
251109_46	0,99	Llarg	69,19%
251109_47	1,48	Llarg	78,72%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



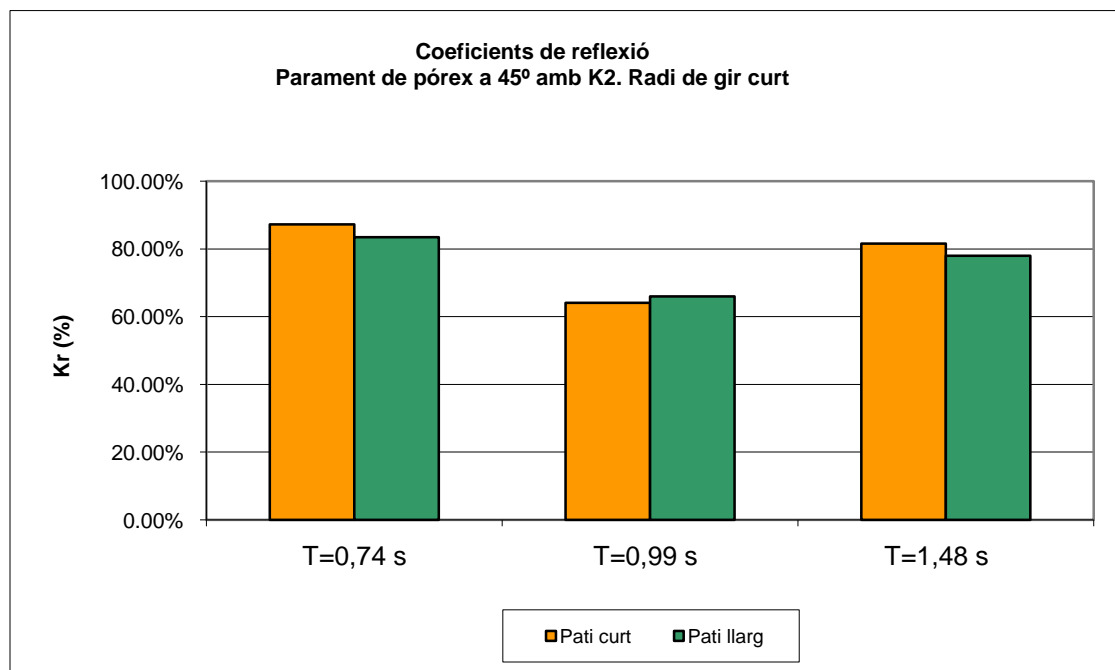
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** PÒREX  
**Radi de gir de la comporta:** LARG  
**Angle inicial de la comporta:** 45°  
**Coacció interior de la comporta:** LLIURE  
**Coacció exterior de la comporta:** K2 tocant amb la comporta  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
251109_21	0,74	Curt	87,21%
251109_22	0,99	Curt	64,10%
251109_23	1,48	Curt	81,52%
251109_24	0,74	Llarg	83,49%
251109_25	0,99	Llarg	65,92%
251109_26	1,48	Llarg	77,94%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



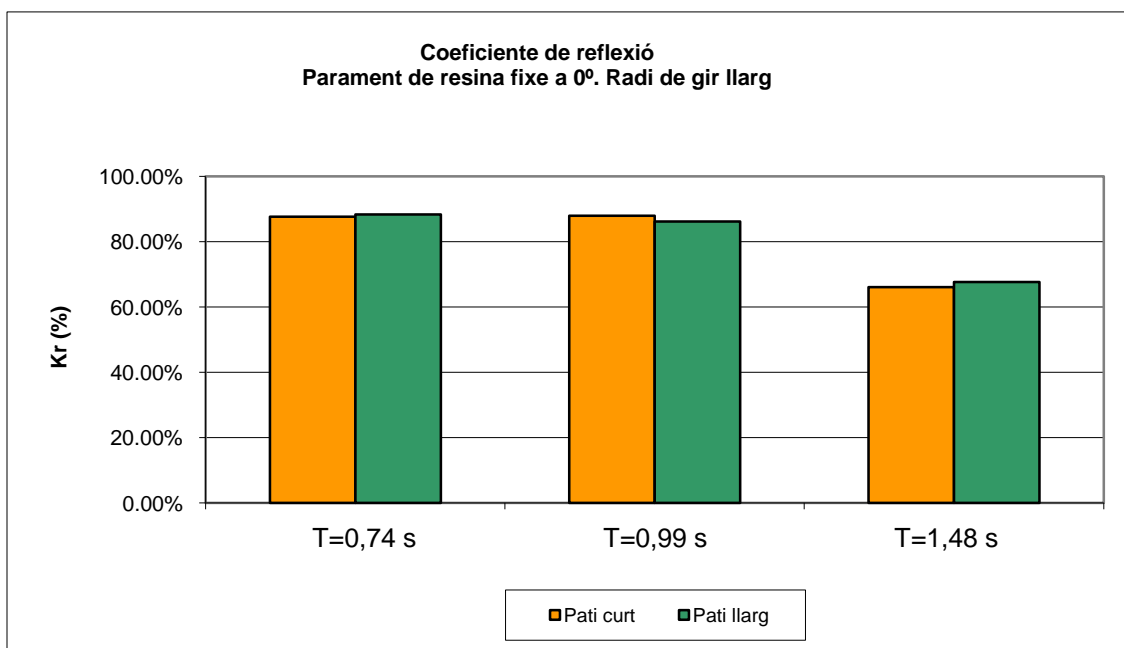
- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** RESINA  
**Radi de gir de la comporta:** LLARG  
**Angle inicial de la comporta:** 0°  
**Coacció interior de la comporta:** FIXE  
**Coacció exterior de la comporta:** FIXE  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
251109_27	0,74	Curt	87,65%
251109_28	0,99	Curt	87,92%
251109_29	1,48	Curt	66,04%
251109_30	0,74	Llarg	88,30%
251109_31	0,99	Llarg	86,19%
251109_32	1,48	Llarg	67,60%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



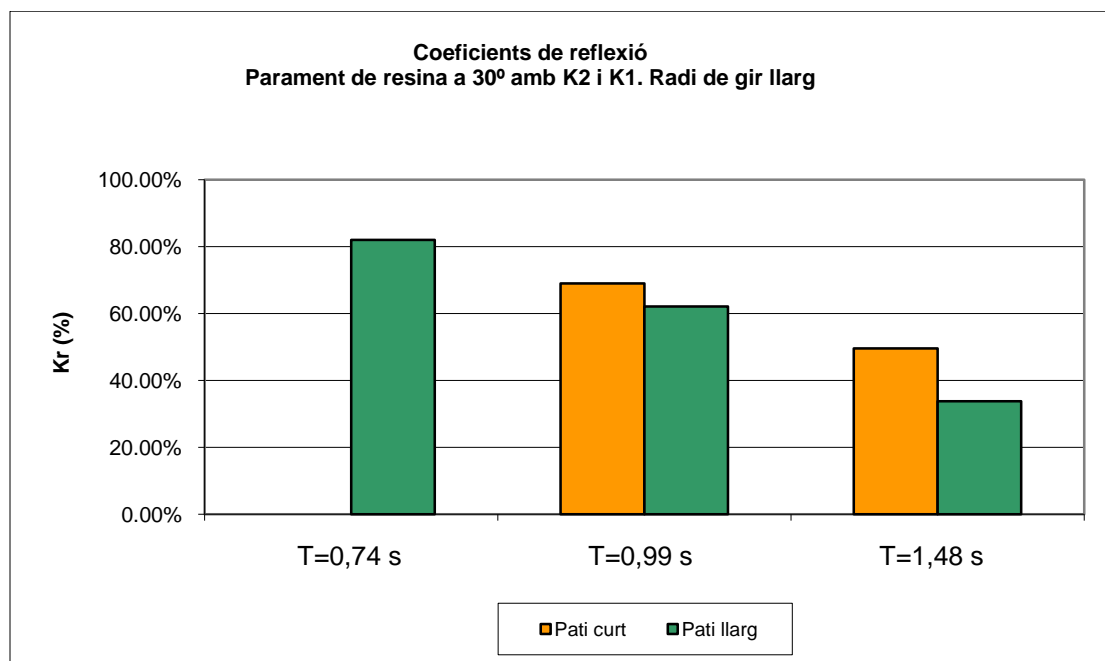
\* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** RESINA  
**Radi de gir de la comporta:** LLARG  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K2 tocant amb la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** K1 a 40mm de la comporta  
**Model:** 2

\* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
251109_37	0,99	Curt	68,98%
251109_38	1,48	Curt	49,61%
251109_33	0,74	Llarg	82,02%
251109_34	0,99	Llarg	62,16%
251109_35	1,48	Llarg	33,79%

\* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:



- \* Descripció de les propietats geomètriques i mecàniques de l'assaig:

**Material de la comporta:** RESINA  
**Radi de gir de la comporta:** CURT  
**Angle inicial de la comporta:** 30°  
**Coacció interior de la comporta:** K2 tocant amb la comporta  
**Coacció exterior de la comporta:** K1 a 40mm de la comporta  
**Model:** 2

- \* Nom de l'assaig, longitud de pati del model, període de l'onatge i resultats del coeficient de reflexió:

Assaig	T (s)	Pati	Kr (%)
251109_39	0,74	Curt	78,45%
251109_40	0,99	Curt	71,91%
251109_41	1,48	Curt	31,26%
251109_42	0,74	Llarg	84,54%
251109_43	0,99	Llarg	71,94%
251109_44	1,48	Llarg	34,84%

- \* Expressió gràfica de la taula anterior per a una millor comprensió dels resultats:

