



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

## **Evolució d'ultrapassament en un dic en talús al llarg d'un temporal amb eines experimentals**

Treball realitzat per:

**Damià Tohà Vilanova**

Dirigit per:

**Andrea Marzeddu i Xavier Gironella Cobos**

Grau en:

**Enginyeria Tècnica d'Obres Públiques**

Barcelona,

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental,  
Secció d'Enginyeria Hidràulica Marítima i Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**

## RESUM

L'ultrapassament d'aigua provocat per les tempestes marines és un dels grans problemes que es té avui en dia en el camp de l'enginyeria marítima. La predicció del cabal que pot assumir una estructura portuària a causa de les tempestes és un dels factors més importants a l'hora de dissenyar i projectar una nova obra marítima. El camp de recerca sobre l'Overtopping (ultrapassament en anglès) està cada cop més a la Vanguardia dels laboratoris que es dediquen a l'estudi de l'enginyeria marítima. El canvi climàtic està fent que es generin cada cop condicions més desfavorables a llocs on mai abans s'havien produït, i si a això se li suma que la força de les onades del mar és inesgotable, s'acaba arribant a la conclusió que és de primera necessitat investigar sobre aquest tema per donar llum a incògnites que ara per ara no poden ser resoltes.

La millor manera de preveure quin serà aquest ultrapassament d'aigua, és generar gran multitud d'assajos, ja sigui en un laboratori o al camp, per a poder tenir les màximes alternatives possibles i poder generar models empírics que s'ajustin al màxim a la realitat. La present tesina té com a objectiu generar una sèrie d'assajos a partir d'una tempesta tipus (Tempesta produïda el dia 26 de desembre del 2008, a Blanes), per a després poder veure el cabal per metre lineal que sobrepassa una estructura i entendre quins són els motius perquè determinats factors influeixin en l'ultrapassament i quins són més determinants a l'hora que el fenomen s'esdevé.

## ABSTRACT

The overtopping discharge coming from sea storms is starting to be the main problem that we are having nowadays on the marine engineering camp. Predicting the discharge caused by storms that an structure is able to assume is becoming more important everyday and is maybe the most important thing that is need to know while calculating or projecting a new maritime work. The research over the overtopping is about to arrive to the first position in the scale of importance while speaking about marine engineering. The climate change is changing the weather conditions, thing that is creating worse conditions in places ever seen before. In addition the strength of the waves is something that we have always had and we will always have. Those are the reasons why we have the necessity of bringing light into that shadow that overtopping prediction is.

Best way of predicting the overtopping discharge is generating amounts of trials in labs and on the field to recollect the maximum data storage possible to generate new empirical models adjusted to the real conditions. The objective of this thesis is to generate few of this trials using as base one storm ( storm occured in Blanes, 12-26-2008 ) and other theorical storms created from this one, to see what happens with the overtopping discharge and understand which parameters are more important in the cause of this overtopping discharge.

## AGRAÏMENTS

En primer lloc m'agradaria agrair a l'Andrea Marzeddu i al Xavier Gironella tot el suport i ajut prestat durant aquest any i mig que fa que estem en contacte per la realització del meu Treball de Final de Grau. Han estat molts mesos de canvis de plantejaments i de projecte que han fet que al final tot s'hagi allargat d'una manera desmesurada. Gràcies per la paciència i pel suport que m'han donat en moments clau. Agrair també l'acollida rebuda per tot l'equip del CIEMLAB, al Quim, a l'Ivan, al Jose, al Jordi, a l'Oscar i a la resta de l'equip per fer que l'estada al laboratori hagi estat molt més que amena.

M'agradaria agrair també als cambrers del bar de camins la seva alegria cada matí durant tants mesos, destacant al Jordi, que porta al meu costat els 9 anys de carrera, i al qual trobaré molt a faltar.

D'altra banda donar les gràcies a la Gemma Garcia i al David Boix, companys meus de la carrera i sense els quals no hagués pogut acabar aquest treball i provablement els estudis. Gràcies.

Agrair també a l'Ivan Herrera el seu suport incondicional i els ànims rebuts per part seva en els moments més durs de tot el procés. Les hores a altes hores de la matinada compartides en sales d'estudi i els descansos inacabables que han fet molt més fàcil de suportar la càrrega de feina. Sense un company així no seria possible estar escrivint aquestes línies.

I ja per finalitzar donar les gràcies a la meva família. Al meu tiet Joan que m'ha servit de consultor en els moments de dubtes i inestabilitat, ha sigut un suport inexpugnable a l'hora de motivar-me i m'ha ajudat en gran manera a prendre la decisió de no deixar estar els estudis i acabar aquest grau.

I a les meves noies. El meu gran suport vital en tot, i com no podia ser menys, aquí també han estat presents. La meva germana Carla amb els seus discursos que toquen la fibra, deixant clar que em coneix millor que ningú i que entre germans, els pels a la llengua sobren. Ha sigut capaç de donar-me els cops d'atenció necessaris quan tocava i la motivació extra quan ja no en quedava. T'ho agraeixo de tot cor. I a la meva mare, aquella persona constant que està sempre present de tot, només amb ganes d'ajudar i fer que les coses siguin més senzilles. Gràcies per suportar els meus canvis d'humor i les meves empenyades en els moments difícils, gràcies, com sempre, per tot.

## ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ.....	6
2	OBJECTIUS .....	8
3	ESTAT DE L'ART .....	9
3.1	INTRODUCCIÓ A L'ULTRAPASSAMENT O OVERTOPPING.....	9
3.1.1	L'ULTRAPASSAMENT O OVERTOPPING .....	9
3.1.2	DIFERENTS TIPOLOGIES D'ULTRAPAPASSAMENT O OVERTOPPING .....	11
3.1.3	PARAMETRES QUE INFLUEIXEN EN L'OVERTOPPING.....	13
3.2	ENQUADRAMENT DE L'ANÀLISIS DE L'ULTRAPASSAMENT O OVERTOPPING ACTUAL18	
3.2.1	DIFERENTS FORMES DE CALCULAR L'ULTRAPASSAMENT .....	18
3.2.2	TASSES D'ULTRAPASSAMENT ADMISIBLES .....	18
3.2.3	PREDICCIÓ DE L'ULTRAPASSAMENT I FÒRMULES EMPÍRIQUES RELACIONADES	22
4	METODOLOGIA DE L'ASSAIG D'ESTUDI .....	31
4.1	MODELATGE FÍSIC APLICAT A L'OVERTOPPING .....	31
4.1.1	FACTORS D'ESCALA .....	31
4.1.2	TRACTAMENT DE LES DADES OBTINGUDES EN UN LABORATORI.....	34
4.2	CAS D'ESTUDI .....	36
4.2.1	PRESTACIONS CIEMITO [ 11 ] .....	36
4.2.2	DADES TEMPESTES .....	39
4.2.3	CREACIÓ TEMPESTES TEÒRIQUES: TRAPEZOIDAL, TRIANGULAR I DE METODOLOGIA CLÀSSICA.....	42
4.2.4	CÀLCUL I DISSENY DEL DIC SOTMÈS A ASSAIGS .....	48
4.2.5	DISSENY AMB AUTOCAD DE L'ESTRUCTURA.....	51
4.2.6	REALITZACIÓ ASSAJOS .....	57
4.2.7	PROGRAMACIÓ EN MATLAB PER AL PROCESSAMENT DE DADES .....	63
5	OBTENCIÓ DE DADES A PARTIR DELS ASSAJOS REALITZATS .....	66
5.1	OBTENCIÓ DE DADES ASSAJOS TEMPESTA REAL .....	67
5.2	OBTENCIÓ DE DADES ASSAJOS TEMPESTA TRIANGULAR .....	70
5.3	OBTENCIÓ DE DADES ASSAJOS TEMPESTA TRAPEZOIDAL .....	73
5.4	OBTENCIÓ DE DADES ASSAJOS METODOLOGIA CLÀSSICA .....	76
6	ANÀLISI I COMPARACIÓ DELS RESULTATS.....	79
6.1	ANÀLISI I COMPARACIÓ DE RESULTATS EN QUANT A LA RIGUROSITAT DE L'ASSAIG	80

6.1.1	ANALISI I COMPARACIÓ DE RESULTATS A PARTIR DE LES ALÇADES D'ONA SIGNIFICANT .....	80
6.1.2	ANALISI I COMPARACIÓ DE RESULTATS A PARTIR DELS PERÍODES MITJOS.....	87
6.2	ANÀLISI SOBRE LA QUANTITAT D'AIGUA ULTRAPASSADA.....	94
6.2.1	ANALISI I COMPARACIÓ DE RESULTATS A PARTIR DELS VOLUMS ACUMULATS.	94
6.2.2	ANALISI I COMPARACIÓ DE RESULTATS A PARTIR DELS CABALS PER METRE LINEAL.....	97
7	CONCLUSIONS .....	101
8	BIBLIOGRAFIA.....	103
9	ANNEXES .....	104
9.1	ANNEX 1: OBTENCIÓ DE DADES .....	104
9.2	ANNEX 2: CÈL·LULES DE CÀRREGA .....	122

## 1 INTRODUCCIÓ

Avui en dia, i com sempre des que la raça humana es va començar a civilitzar, una gran part de l'activitat mundial es situa al voltant de les costes, ja sigui per motius lúdics o econòmics. En un intent desesperat per guanyar per força al mar, l'espècie humana porta segles construint estructures marítimes de tot tipus per a aconseguir que el mar deixi de guanyar terreny a la terra[1]. Només Europa té uns 68000 km de longitud de costes ( 1,5 vegades la longitud perimetral de l'equador ) per tant, la relació entre els humans i el mar és de naturalesa forçada.

És per aquest motiu que les estructures marítimes han agafat tanta importància, al final no deixen de ser els escuts que els éssers humans han anat desenvolupant durant segles davant la lluita constant que es manté front al mar.



FIGURA 1: Overtopping produint-se a San Remo, Itàlia [3]

La situació actual que es viu avui en dia comença a ser preocupant, ja que s'està produint un augment notable del nivell de les aigües del mar. Hi ha moltes zones, sobretot en països que tenen regions per sota el nivell del mar ( Països Baixos, Alemanya, regne Unit... ) que veuen com àrees molt extenses dels seus territoris corren el risc de quedar parcial o totalment inundades. Si aquí se li suma l'augment de temperatura a nivell global, el gran increment de tempestes a nivell mundial, la pujada de velocitat dels vents creats pels corrents càlids... tot porta a pensar que un futur no tant llunyà seran necessàries noves estructures marítimes per a defensar cada cop extensions de terreny més grans i, en conseqüència, a moltes més persones i béns materials.

Per altra banda, també s'ha de tenir clar que la força de l'aigua és inexpugnable i incansable, i que tota tempesta porta inclosa una erosió de la costa. Naturalment cada any es van perdent metre a metre, quilòmetre a quilòmetre, part de la nostra costa. I aquest fenomen cada cop anirà a més.

Inevitablement això farà que cada cop cobrin més importància les construccions marítimes. Entendre els futurs canvis, la dinàmica que està agafant el canvi climàtic, l'envergadura dels projectes que es duen a terme i la necessitat dels mateixos serà la clau per a poder seguir

defensant-se del mar i dels canvis que venen, els quals, per força, tocarà viure a la societat actual.

Quan una estructura és dissenyada, el primer que s'ha de fer és relacionar-la amb un període de retorn, i mai no és suficient en saber quin és el nivell del mar a la zona on volem construir, ni l'onatge irregular al qual serà sotmesa, sinó que s'han de tenir en compte molts altres factors que en el transcurs de la present tesina es comentaran, però un dels més importants és l'històric de tempestes de la zona. D'aquí es pot extreure una informació valuosíssima sobre les alçades màximes d'onada en front les quals l'estructura haurà de lluitar i per les qual, de manera inevitable, es veurà sobrepassada en alguns moments.

Aquí apareix un concepte nou, que correspon a aquest ultrapassament de l'estructura quan l'altura d'onada de disseny és inferior a l'altura d'onada màxima d'una tempesta. Aquest fenomen és conegut com a Overtopping o ultrapassament, concepte que també es definirà més endavant.

Com a conseqüència de tot això que s'ha explicat s'arriba a la conclusió de que avui en dia una estructura marítima ( com podria ser un dic d'abric en un port ) ha cobrat una gran importància en àmbits tant econòmics com socials. Trobar l'equilibri entre les dues ( optimitzar-la ) ha passat a ser també la feina dels dissenyadors/engineyers de l'estructura.

L'impacte social derivat d'una obra marítima va lligat pràcticament en la seva totalitat a l'impacte visual que aquesta obra tindrà, i és per aquest motiu que les estructures marítimes es dissenyen amb una cota de coronació lo més baixa possible dins de la seguretat. No obstant això, si li donem massa importància a l'impacte visual, la possibilitat de ser sobreexides acaba sent bastant alta.

Per contra, es veu que és de sentit comú que, per entrar dins dels paràmetres d'un impacte econòmic baix, no és possible construir aquella estructura la qual serà totalment impossible de revessar durant tota la seva vida útil.

En resum, cada estructura és un món, i hi ha multitud de possibles solucions a escollir, que, aplicades a cada situació singular, donen infinitat de possibilitats. Amb això arribem a la conclusió de que no hi ha cap fórmula empírica per a determinar quina és la millor solució a adoptar.

En el desenvolupament de la present tesina s'estudiarà el concepte de l'Overtopping o ultrapassament, quines són les seves possibles causes i quan es desenvolupa en més quantia. Tot això es farà per a poder donar una miqueta de llum a totes les incògnites que sorgeixen a l'hora de dissenyar les tant importants estructures marítimes.

## 2 OBJECTIUS

Els objectius marcats dins de la present tesina es poden enumerar de la següent manera:

1. Aplicar una tempesta real tipus sobre una estructura prèviament dissenyada i analitzar quan, quant i perquè es produeix Overtopping.
2. Aplicar una sèrie de de tempestes teòriques generades a partir de les dades de la mateixa tempesta real tipus, sobre la mateixa estructura, analitzar quan, quant i perquè es produeix Overtopping.
3. Analitzar i comparar els resultats obtinguts entre la tempesta real tipus i les altres tempestes teòriques aplicades.
4. Decidir si la metodologia emprada és la correcta.
5. Proposar, en cas de que sigui possible, possibles millores en futures línies d'investigació que estiguin dins del mateix camp.

PER A PODER COMPLIR TALS OBJECTIUS, S'ESTRUCTURARÀ EL PROJECTE DE LA SEGÜENT MANERA:

- Al capítol 1 es farà una introducció sobre la importància de les estructures marítimes i s'introduirà el fenomen de l'OVERTOPPING.
- Al capítol 2 s'enumeraran els objectius de la present tesina.
- Al capítol 3 es desenvoluparà l'Estat de l'art, on s'explicarà el fenomen de l'ultrapassament en termes generals i s'estudiarà quins són els paràmetres físics que poden provocar-lo, s'enumeraran les diferents tipologies d'estructures i s'explicaran les diferents fórmules empíriques que s'han desenvolupat al llarg del temps per a poder calcular l'overtopping quan es dissenya estructures.
- Al capítol 4 s'explicarà la metodologia d'estudi seguida, quins són els materials i els mètodes emprats per a l'estudi de l'ultrapassament sobre l'estructura dissenyada i com s'ha dimensionat. S'abordarà amb detall el model físic plantejat alhora que es descriuran les tècniques i procediments d'assaig duts a terme.
- Al capítol 5 es detallaran les dades obtingudes als assajos
- Al capítol 6 s'analitzaran els resultats obtinguts als assajos realitzats tant amb la tempesta real tipus com amb les altres tempestes teòriques aplicades, des del punt de vista del volum d'ultrapassament ( i com a conseqüència el cabal ) i les altures d'ona i períodes associats a aquests ultrapassaments, i se'n farà una comparativa.
- Al capítol 7. s'exposaran les conclusions fruit del treball realitzat al llarg d'aquesta tesina i es proposaran futures línies d'investigació.



## 3 ESTAT DE L'ART

### 3.1 INTRODUCCIÓ A L'ULTRAPASSAMENT O OVERTOPPING

#### 3.1.1 L'ULTRAPASSAMENT O OVERTOPPING

En determinades ocasions, l'onatge sota el qual està sotmesa una estructura marítima, es capaç de sobrepassar-la i pot provocar inundacions i danys sobre el que l'estructura estava dissenyada per a protegir. Aquest fenomen causat per la superació de l'estructura per part de l'aigua es coneix com a ultrapassament o Overtopping, i es pot descriure com el volum d'aigua que sobrepassa una estructura quan l'altura de coronació de la mateixa és inferior a l'altura vertical que assoleix la superfície del mar ( o d'un llac, riu... ) al entrar en contacte amb l'esmentada construcció. Per tant el volum que sobrepassarà l'estructura serà fruit de la interacció entre aquesta i l'onatge.

És per aquest motiu que la magnitud d'aquest ultrapassament dependrà tant de les característiques de les onades generades durant, per exemple, una tempesta, com de les característiques de l'estructura. Per tant, sempre hi haurà una relació directa entre l'augment cada cop més pronunciat en els possibles danys a sofrir i la pujada mitja del nivell del mar provocada per l'onatge que aquesta tempesta ens produirà. Aquesta situació és impossible d'evitar en el transcurs de la vida útil d'una estructura, per tant, haurà de ser contemplada i s'haurà de tenir en compte des d'un primer moment al dissenyar l'estructura per tal de que els danys soferts siguin el més petits possible.

L'Overtopping és un camp relativament nou en la investigació, ja que només fa de l'ordre de 40 anys que els dissenyadors es plantegen com atacar la construcció de noves estructures pensant en la manera en com poden ser sobrepassades, i sobretot els perquè d'aquest ultrapassament. No se sap ben bé com es comporta l'aigua quan s'apropa a una estructura, ja que depèn molt de com sigui aquesta aproximació, quina sigui la tipologia d'estructura, on estigui situada, quines siguin les condicions de contorn... una infinitat de variables a tenir en compte que fan que sigui d'una dificultat elevada el fet de modelitzar i poder parlar de dinàmiques en quant al comportament de les onades al trencar contra o, sobrepassar una estructura, i la reacció de la pròpia estructura en front a aquests esforços.

Al llarg dels últims temps s'han emprés diferents estudis per intentar detallar i quantificar l'acció de l'Overtopping sobre les obres marítimes. Gran part d'aquesta recerca s'ha centrat en intentar trobar equacions que ajudin a preveure el flux d'aigua provocat per l'ultrapassament, i derivats d'això, el volum d'aigua que es tindrà sobrepassant l'esmentada estructura i com es podrà evacuar i drenar una vegada es trobi darrere de les defenses, per a evitar inundacions i acumulacions d'aigua perilloses.

L'Overtopping sempre es defineix matemàticament d'acord a l'estructura marítima sobre la qual es produeix, és a dir, serà definit d'una manera si s'encara a un dic vertical o si per contra es troba en front a un dic en talús. Això ve donat perquè l'aigua respon d'una manera molt diferent a cada obra marítima dependent de la seva estructura geomètrica.

El disseny dels dics en vertical està sotmès sempre a un risc menor que el dels dics en talús, ja que són més difícils de sobrepassar i els danys associats o les avaries que poden sofrir són

menors, ara bé, el seu cost i el seu impacte ambiental sempre són molt més elevats. Per tant la feina del dissenyador de l'estructura serà, entre d'altres, trobar el punt d'equilibri per a poder projectar l'obra òptima.

L'estudi de l'Overtopping té com a objectiu bàsic i aplicació fonamental l'establiment d'uns límits assumibles de flux d'aigua que puguin arribar a sobrepassar la nostra estructura, per tant i com a conseqüència d'això, les metodologies desenvolupades per a la predicció dels ultrapassaments que es puguin dur a terme tindran com a objectiu principal assegurar exactament que, aquest flux, no superi mai els límits de la tolerància. És molt important el punt que es tria per a començar a tenir ultrapassament. És indispensable que siguin l'equip de disseny de l'obra marítima els que decideixin el moment en el qual comença a haver-hi Overtopping en una estructura. I aquest ha de venir sempre donat pel grau de seguretat que es vol aplicar a l'estructura, és a dir la quantitat màxima d'aigua que s'està disposat a assumir, aquella la qual no produirà uns danys irreparables. Aquests danys assumits estaran directament relacionats amb la importància que tinguin els danys materials que un possible Overtopping podria causar. És a dir, seria més important protegir una urbanització de cases, una ciutat, un port, una fàbrica o un pàrquing abans que una carretera secundària poc concorreguda.

Avui en dia segueix sent un problema la predicció d'aquest ultrapassament, ja que hi ha una gran varietat d'aproximacions existents, i totes i cadascuna d'elles amb unes condicions de contorn diferents, fet que fa que no sempre siguin precises. Petits canvis en la pressió atmosfèrica, per exemple, poden produir grans canvis en el comportament de les onades. Tot i així les prediccions sempre es basen en fórmules empíriques trobades en laboratoris de simulació d'onades i al mateix entorn marí.

Les condicions d'onatge que tenim al mar, ja sigui en aigües someres o en aigües profundes, estan associades gairebé en la seva totalitat a fenòmens ondulatoris irregulars, per tant les onades que impacten sobre les estructures marítimes són sempre de caràcter irregular. Per a poder portar aquest tipus d'onatge a un canal, i per a poder-lo modelitzar bé, es necessitarà d'un gran nombre d'onades generades i d'un bon sistema d'absorció de les mateixes, per a poder obtenir resultats significatius. Això comportarà que sigui necessari emprar un gran període de temps a executar els assajos i a recopilar dades. Per altra banda, el modelatge numèric per a la interpretació dels resultats pot portar penjant de si mateix un gran cost computacional que no està a l'abast de tothom avui en dia.

Ara bé, després de la recerca exhaustiva en aquest camp d'investigació durant els darrers anys, s'han desenvolupat diferents eines per a calcular el possible Overtopping que l'estructura que es vol dissenyar podrà patir. Avui en dia la més desenvolupada i que més es fa servir és l'ANN ( Artificial Neural Network for the design of coastal and harbour structures ) ( EUROTOP 2016 ), un programa que consta amb més de 13000 assajos i una quantitat molt elevada de tests. Tot i així mai serà ciència exacta, ja que els assajos no es poden fer a escala real, i l'Overtopping és molt sensible a canvis geomètrics, d'escala, de pressió, de nivell d'aigua... els quals novament compliquen la investigació i fan que moltes vegades els resultats obtinguts al laboratori siguin bastant diferents als suposats o esperats.

#	Parameter	Type	Representation of
1	$H_{m0}/L_{m-1,0,t}$	Wave conditions	Wave steepness (breaking)
2	$\beta$ [rad]	Wave conditions	Wave obliquity
3	$h/L_{m-1,0,t}$	Wave conditions	Shoaling parameter
4	$h_t/H_{m0,t}$	Geometry	Effect of the toe submergence
5	$B_t/L_{m-1,0,t}$	Geometry	Effect of the toe width
6	$d_b/H_{m0,t}$	Geometry	Effect of the berm level
7	$B/L_{m-1,0,t}$	Geometry	Effect of the berm width
8	$R_c/H_{m0,t}$	Geometry	Effect of the relative crest height (including the crown wall if present)
9	$A_c/H_{m0,t}$	Geometry	Effect of the relative crest height
10	$G/L_{m-1,0,t}$	Geometry	Effect of the crest width
11	$m$	Geometry	Effects of the foreshore slope
12	$\cot\alpha_d$	Geometry	Downstream slope
13	$\cot\alpha_{incl}$	Geometry	Average slope in the run-up/down area
14	$D/H_{m0,t}$	Structure characteristics	Indication of structure permeability and/or roughness
15	$\gamma$	Structure characteristics	Dissipation induced by structure roughness and permeability

FIGURA 2: Variables possibles a ser introduïdes al programa ANN descrit a l'EUROROP 2016 [3]

### 3.1.2 DIFERENTS TIPOLOGIES D'ULTRAPASSAMENT O OVERTOPPING

L'ultrapassament d'una estructura es produeix com a conseqüència de la interacció de les onades amb la cara exterior ( la que es troba exposada al mar ) del nostre dic o estructura marítima. Si aquesta interacció comporta un ascens de la massa d'aigua superior a l'altura de coronació de la nostra estructura, l'aigua passarà per sobre i se'ns produirà OVERTOPPING.

L'Overtopping es pot presentar de tres formes diferents segons la forma en que és produït[3]:

- 1- La primera es dona quan les onades impacten directament sobre l'estructura produint una gran quantitat d'aigua polvoritzada que ens superarà l'estructura en forma de gran esquitxada. Aquestes gotes podran superar el nostre dic ja sigui per la pròpia inèrcia amb la que venen o per la força del vent si aquest bufa des de mar endins ( direcció onshore ). A aquesta tipologia d'ultrapassament se la coneix amb el nom de "white water" .



FIGURA 3: exemple d'ultrapassament de la tipologia "white water"[4]

- 2- A la segona forma d'ultrapassament se la denomina "green water" i succeeix quan l'aigua que porta la onada passa directament per sobre de la cota de coronació de l'estructura i ho fa en forma de làmina contínua d'aigua.



FIGURA 4: exemple d'ultrapassament de la tipologia "green water" [3]

- 3- La tercera i última forma d'Overtopping té unes conseqüències molt petites en comparació a les altres dues acabades d'esmentar. És produïda per l'efecte de fortes ràfegues de vent que bufen en direcció a l'estructura. Aquest vent és capaç d'arrancar literalment petites quantitats d'aigua de les crestes de les onades que, en forma de petites gotetes, sobrepassaran l'estructura. Com que les úniques gotes que sobrepassaran el dic són aquelles que pertanyeran a les onades més properes a l'estructura, les quanties d'aigua que s'obtindran a l'altra banda de l'estructura seran mínimes. El seu efecte és de lo més semblant a un polvoritzador, fet que fa que siguin anomenades "spray". En aquest cas l'aigua no és té la capacitat de causar cap dany sinó que la única cosa que fa és mullar els elements que es trobes a resguard del dic. No ens generarà cap problema a nivell de danys materials com les dues anteriors, però si que ens pot produir problemes de visibilitat a més de portar aigua salada a l'altra costat, cosa que ens pot causar algun dany en la possible flora que es trobi sota els seus efecte i sobretot ajuda al deteriorament de les estructures a causa de la sal marina. Caldria recalcar que aquest fenomen és tant insignificant en comparació amb els altres dos que pràcticament cap de les formulacions i prediccions que s'utilitzen per el càlcul de l'Overtopping el té en compte.



FIGURA 5: exemple d'ultrapassament de la tipologia "spray" [3]

### 3.1.3 PARAMETRES QUE INFLUEIXEN EN L'OVERTOPPING

Com anteriorment s'ha comentat, l'Overtopping depèn de la tipologia d'estructura, de la interacció que les onades tenen amb aquesta, i de la seva altura de coronació.

En el cas de dics en talús, es pot veure que l'ultrapassament es produeix quan la cota superior de la lamina d'aigua supera la cota superior del dic. Per tant quan tenim Overtopping, per força s'ha de complir que la diferencia entre l'altura de la làmina d'aigua i la cota de coronació de l'estructura sigui superior a 0 ( agafant com a cota zero el Nivell Mig del Mar en repòs ).

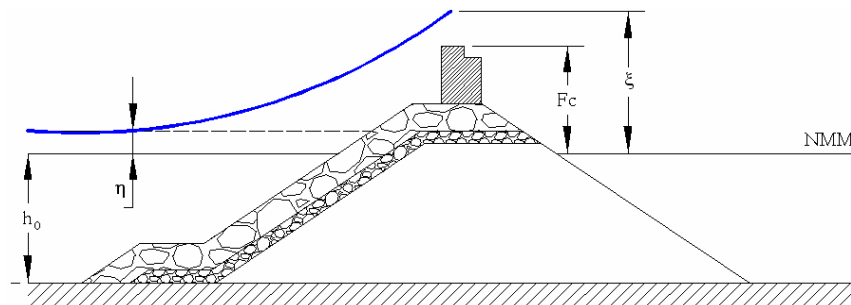


FIGURA 6: esquema de la generació de l'ultrapassament en un dic en talús [2]

En aquest cas es defineix la pujada de nivell provocat per la interacció de les onades amb l'estructura com l'altura màxima que pot assolir la superfície del mar al remuntar el talús de l'estructura marítima. Serà sempre mesurada en vertical i anirà des del Nivell Mig del Mar ( NMM ) fins a la cresta de l'onada.

En el cas de dics verticals, no existeix com a tal, ja que la massa d'aigua que sobrepassa la cota de coronació mai forma una lamina contínua d'aigua, sinó que es produeix una ascensió de la pròpia aigua per l'estructura a causa de l'impacte directe de les onades sobre la caixa exterior del dic.

No es parlarà en cap moment de l'acció ni de la direcció del vent ja que amb les fórmules empíriques que es treballa i sobre les quals es basarà la present tesina, no són mai contemplades.

Els diferents paràmetres més rellevants des del punt de vista de la generació de l'Overtopping es poden separar en quatre grups diferents segons la seva naturalitat o pertinença:

- **PARÀMETRES DE LES ONADES**

Els paràmetres que depenen única i exclusivament de les onades són els següents:

- L'altura d'onada significant, que pot ser definida de diferents maneres. Durant el transcurs de la present tesina es farà servir la que correspon a la mitja del terç més gran de la sèrie d'onades,  $H_{1/3}$ .
- El període de les onades. Un numero determinat de períodes entre onades es poden definir com a un espectre d'onades. Els períodes convencionalment més utilitzats per a definir una sèrie d'onades són el període pic  **$T_p$**  ( el període que dona el pic de l'espectre ) i el període mig  **$T_m$**  ( que es calcula fent la mitja de tots els períodes de les onades de la sèrie ). Normalment la relació  **$T_p/T_m$**  és de l'ordre 1,1 a 1,25.
- 

- **PARÀMETRES ESTRUCTURALS**

Els paràmetres que depenen de l'estructura són els següents:

- Paràmetres de forma. Són els referents tant a la forma de la pròpia estructura ( dic vertical, dic en talús, escalonat... ) com a la forma dels elements de la capa exterior del dic, sempre i quant es parli d'un dic en talús.
- Paràmetres de les característiques geomètriques. Aquests són els que fan referència a les pròpies dimensions de la secció que s'avalua, com per exemple. La cota de coronació, les dimensions de la berma, els talussos de l'extradós i de l'intradós de la banqueteta ( en dics verticals ) i òbviament dels propis talussos en els dics en talús, els espessors de les capes que conformen el dic en escullera... la amplitud de la part superior del dic...

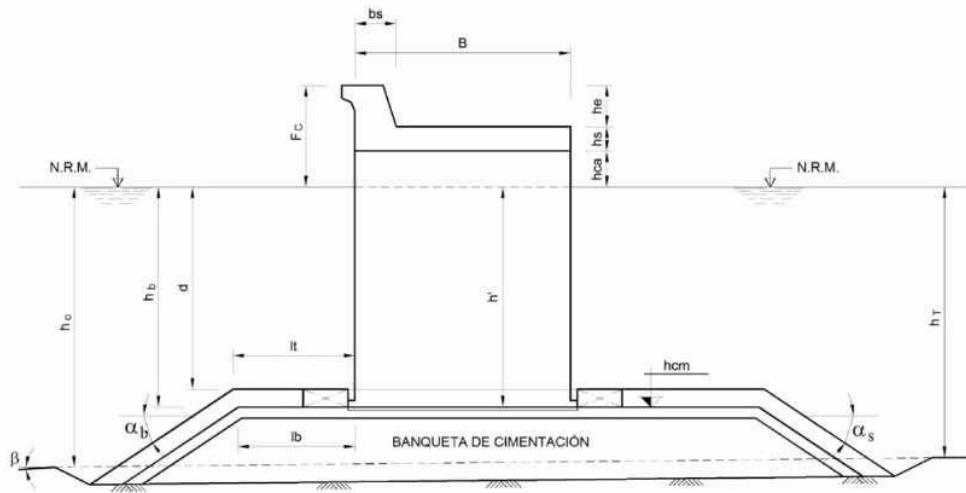


FIGURA 7: paràmetres geomètrics d'un dic vertical [2]

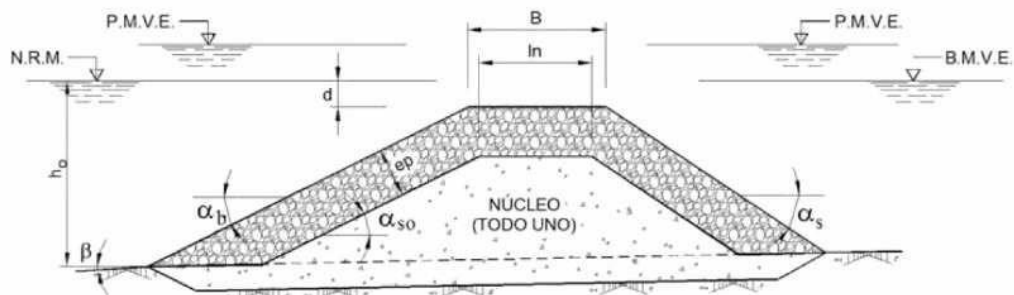


FIGURA 8: paràmetres geomètrics d'un dic en talús [2]

- El peu de l'estructura. És molt important preveure on s'assentarà la nostra estructura. En la construcció de dics verticals, el peu de l'estructura cau a la base de la paret principal, i això pot fer que durant tempestes pronunciades, es produeixi erosió o inclús transport de sediments que poden arribar a fer que les altures d'onada variïn i com a conseqüència tinguem més Overtopping.
- La paret de retorn d'onades o Bullnose. Només és present en els dics en vertical, i es tracta d'una parapet que està situada a la seva cota de coronació i la seva funció és retornar al mar part de l'aigua que ha sobrepassat el nostre mur.
- Permeabilitat, porositat i rugositat de la part de l'estructura en contacte amb el mar. Una estructura marítima és pràcticament impermeable, i el material del qual està feta la seva part en pendent manca de rugositat gairebé en la seva totalitat. El manual Eurotop 2016, en el qual es basa en gran part aquesta tesina, classifica els dics segons la seva composició de la següent manera:

- Dics llisos: aquells els quals són molt llisos i són impermeables en la seva totalitat.
- Dics amb pendent rugosa: aquells els quals tenen una petita rugositat i són gairebé impermeables.
- Roques cobrint un dic: rugositat en la seva superfície però amb l'ànima de l'estructura impermeable.
- Roques cobrint un terraplè: rugositat en la seva superfície i amb l'ànima de l'estructura permeable.

- **PARÀMETRES AMBIENTALS O D'UBICACIÓ**

Els paràmetres que depenen de la ubicació on està situada la nostra estructura marítima, i com a conseqüència, els fenòmens ambientals als quals està exposada són els següents:

- Profunditat al peu de l'estructura ( h )
- Pendent del fons marí ( tan alfa )
- Tipologia de material del fons marí.

- **PARÀMETRES TEÒRICS**

Després d'haver-se realitzat una infinitat d'estudis sobre l'Overtopping, s'ha arribat a un conveni mitjançant paràmetres trobats a laboratori, que serveixen per a simplificar notablement la càrrega d'operacions numèriques. D'entre tots ells els més destacats serien:

- La inclinació o peralt de la onada. Aquest peralt és definit com el ràtio entre l'altura d'onada i la seva longitud (  $S_0 = H_{s0}/L_{s0}$  ) i ens donarà informació de com ha estat generada la onada. Generalment, si els seus valors en troben propers al  $S_0 = 0,01$  és que es tracta d'una onada generada pel corrent marí. Si per altra banda, els seus valors es troben entre  $S_0 = 0,4$  a  $0,6$ , és que ens trobem davant d'una onada generada per vent.
- El número d'Irribarren, similitud de surf o paràmetre de trencament, el que ens defineix la interacció de la nostra onada amb el fons marí i com trencarà aquesta.  
El número d'Irribarren és per tant un paràmetre que determina l'altura que necessita una onada per arribar al seu trencament i quina tipologia de trencament tindrà, si és que s'acaba produint, al crear-se una interacció entre la ja esmentada onada i el talús de la nostra costa o estructura. Ens indicarà també la forma amb la qual es dissiparà l'energia de l'onada sobre el talús i la seva resposta hidràulica.



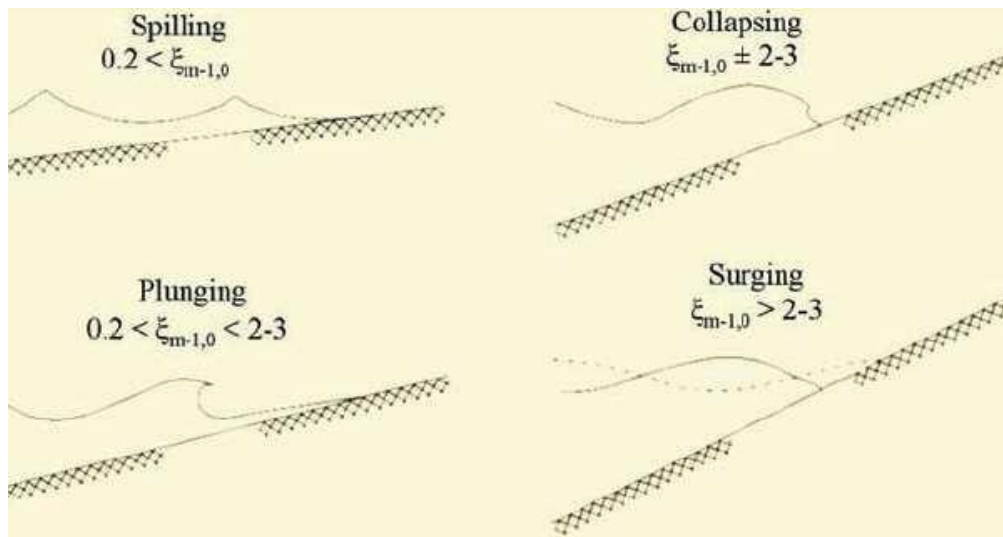


FIGURA 9: tipologies de trencament de les onades segons el número d'Irribarren [3]

- Altura de coronació relativa de l'estructura.  $R_c/H$ : aquest paràmetre el que fa és que ens vincula l'altura d'onada amb la cota de coronació de la nostra estructura.

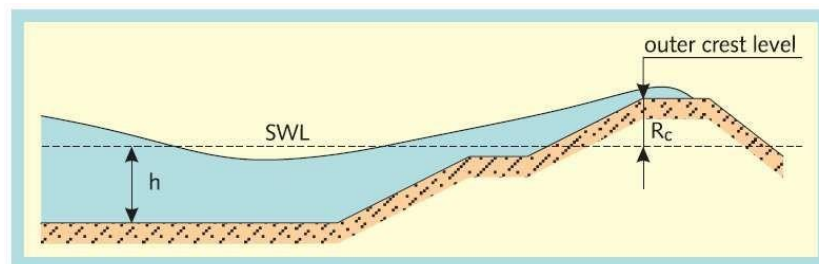


FIGURA 10: profunditat  $h$  i altura de coronació  $R_c$  [5]

- La profunditat relativa,  $h/H$ , que és aquell paràmetre que ens relaciona la profunditat de l'entorn marí amb l'altura d'onada. Aquest paràmetre compleix la funció de relacionar-nos la profunditat de la costa amb el nostre ultrassament.

## 3.2 ENQUADRAMENT DE L'ANÀLISIS DE L'ULTRAPASSAMENT O OVERTOPPING ACTUAL

### 3.2.1 DIFERENTS FORMES DE CALCULAR L'ULTRAPASSAMENT

Quan es tracta de quantificar l'Overtopping, podem fer-ho de les 3 maneres següents:

- El cabal mig ( $q$ ). Ja que l'onatge sota el qual està sotmesa l'estructura estudiada és irregular, una de les formes més acurades de calcular la quantitat d'aigua sobrepasada és calculant el cabal mig que ha passat per sobre de l'altura de coronació en un tram determinat durant el temporal de disseny ( $m^3/s/m$ ). Aquest concepte, que és conegut com a "Overtopping rate", o mitja de la tasa d'ultrapassament, va variant, igual que l'ultrapassament de l'estructura, en funció dels paràmetres i dels factors descrits anteriorment. No està de menys esmentar que la informació que ens proporciona el valor  $q$  no és mai suficient per preveure l'Overtopping i les conseqüències que aquest tindrà. Al dependre tant de les irregularitats de l'onatge, estarà a expenses de la seva intensitat i no ens aportarà gaires dades en quant als possibles danys que patirem.
- El volum màxim d'ultrapassament que esperem en un interval de temps determinat sempre menor al període de cada onada en singular. Consisteix en mesurar onada a onada el volum d'aigua que cadascuna d'elles aporta al volum total sobreixit.
- El percentatge d'onades que sobrepassen l'estructura. Consisteix a obtenir el percentatge d'onades, respecte al total d'onades del temporal, que sobrepassen la nostra estructura.

Actualment, i encara que hi hagi aquestes tres opcions diferents, la principal feta servir per al disseny d'estructures marítimes i en la que es basa la present tesina, és la del cabal mig.

### 3.2.2 TASSES D'ULTRAPASSAMENT ADMISIBLES

El comportament hidràulic d'una secció no és solament important per la seva relació amb la seva estabilitat, sinó que indirectament és un indicador de la seva operativitat, dels béns i instal·lacions que protegeix o de la possible pèrdua de vides humanes en el cas que l'obra falli. És, en conseqüència, un índex bàsic de la funcionalitat de les estructures marítimes.

És molt difícil definir un límit com a límit tolerable en el camp de l'Overtopping, ja que la pregunta que és formulada no té una resposta gaire acotada encara actualment. Això és degut a l'alta irregularitat del fenomen, a les grans dificultats que trobem per emmarcar-lo i a la no facilitat de calcular les seves conseqüències. Com que s'han de tenir molts factors en compte per a poder definir la seguretat d'una obra amb una magnitud tal encara no es pot assegurar res a ciència certa.

Com ja s'ha esmentat anteriorment, la taxa assumible d'ultrapassament depèn del grau de protecció que es vulgui donar i els riscos que s'estiguin disposats a assumir, tenir en compte les pitjor condicions que se'ns poden produir, és a dir, tenir en compte que les onades més altes es poden produir en el moment de màxims anuals.

Per a estipular quina tipologia d'estructura es dissenyarà i amb quin grau de seguretat, és molt més restrictiu, com a criteri, la funcionalitat de l'estructura ( la protecció d'una àrea on es desenvolupi alguna activitat ) que no pas la quantitat d'aigua que puc assumir en una estructura marítima ( mitjana de l'ultrapassament de l'aigua en l'estructura ) ja que sempre és superior l'estabilitat d'una estructura que no el dany que pot causar al no ser funcional.

L'Overtopping màxim assumit o que es pot produir en una estructura és l'esdeveniment més perillós per al que l'estructura protegeix, ja siguin indústries, peatons, vehicles... tenint en compte també que aquest màxim ultrapassament pot causar danys en la nostra estructura.

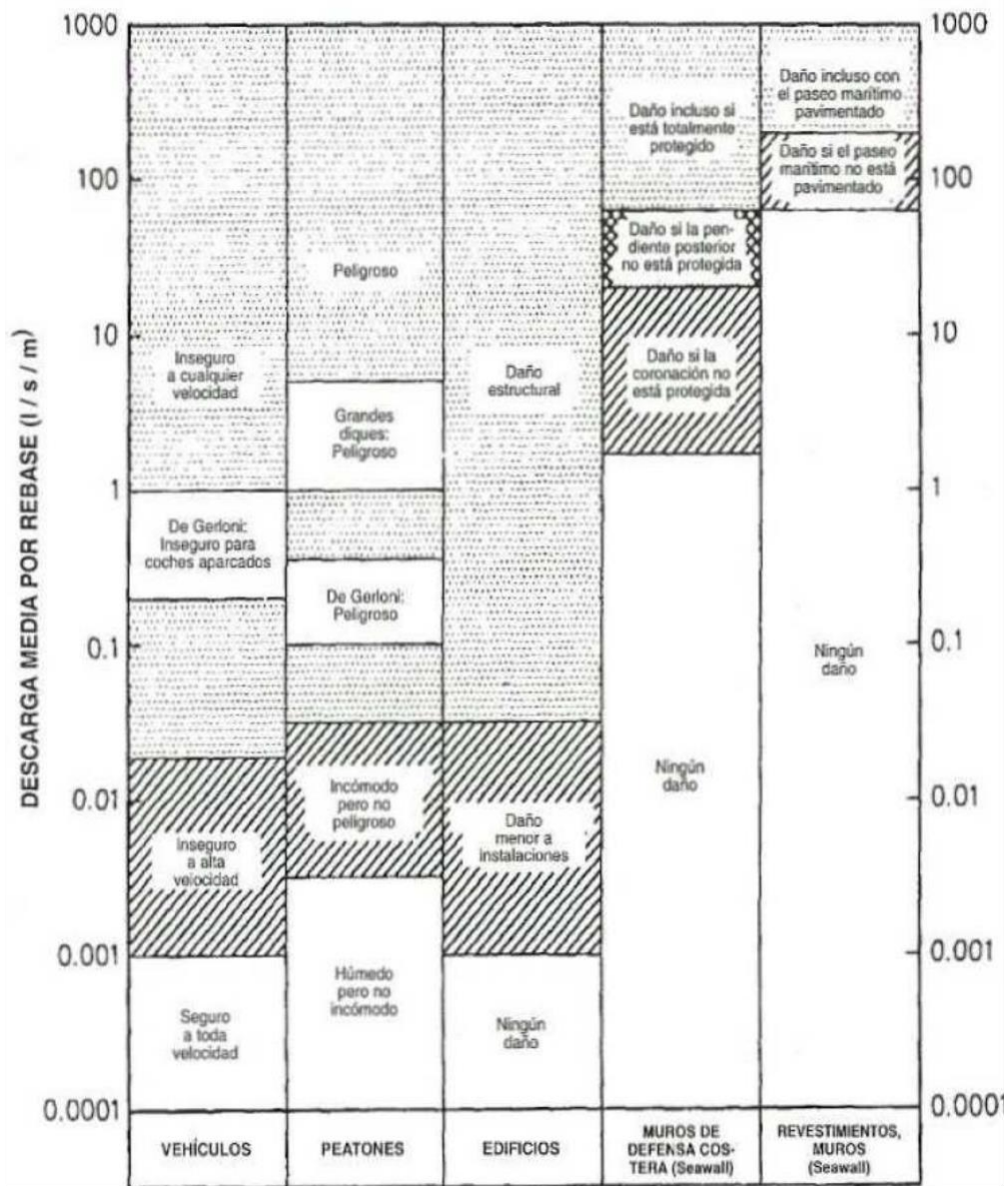
Al llibre [6] es troben recollides les feines de Franco et al. Jensen i Juhl i Foukuda, que han estat imprescindibles per a la acotació dels límits assumibles.

Foukuda va ser precursor en aquest camp, i el que va presentar va ser una avaluació de l'efecte que diferents intensitats d'onatge que sobrepassen una estructura tenen sobre edificis, estructures, vehicles o persones. Es va basar en mesures realitzades en laboratori i en observacions realitzats al camp. Dins les referències al llibre sobre Foukuda, els autors van establir una sèrie de quantitats acceptables d'ultrapassament en (  $m^3/m/s$  ).

Jensen i Juhl i Franco Et Al. afirmen que la intensitat màxima que es pot assolir durant el transcurs d'una tempesta es pot trobar en valors de l'ordre de 100 vegades més gran respecte als valors mitjans de la mateixa tempesta, per tant d'aquí s'extreu que té un comportament totalment irregular i que per a poder fer anàlisis sobre la funcionalitat de l'estructura s'ha de considerar així.

Al 1993 Franco et al. van efectuar diversos assajos en diverses tipologies de dics, canviant les geometries, aplicant diverses tipologies d'onatge i agafant diferents angles d'incidència de les onades sobre l'estructura i van plantejar un resultat diferent al que s'havia donat fins aleshores. La diferència va raure en que es van dedicar a comprovar experimentalment que la funcionalitat de cada tipologia d'estructura variava depenent de la seva geometria de secció en front al mateix tipus d'onatge generat [7].

A la següent taula es pot veure la classificació de les estructures segons els valors de la seva taxa permissibile d'ultrapassament:



Taula 1:valors crítics de les tasses de descàrrega de Franco et al. [6]

Al 2001 Negro et al. Van recomanar seguir els següents límits:

	Q ( m3/s per metre )	EFFECTES
PEATONS	$10^{-6}$	sobrepasament però sense incomditat
	$3 * 10^{-5}$	incomoditat però no perillositat
	$8 * 10^{-4}$	perillositat
EDIFICIS	$10^{-6}$	cap dany estructural
	$8 * 10^{-4}$	dany estructural
VEHICLES	$10^{-6}$	total seguretat
	$3 * 10^{-5}$	incomoditat però no perillositat

Taula 2:tasses crítiques de descàrrega de Negro et al. [6]

A l'any 2006 es va publicar un manual de l'exercit americà [8] on s'estudiaven minuciosament les tasses assumibles d' ultrapassament en termes de seguretat. Es van acotar valors de seguretat sobre peatons, vehicles, edificis, dics... i ja al 2007 es va publicar la primera edició de l'EUROTOP [3], base per a les construccions de totes les construccions marítimes a Europa des de llavors. Aquí també es van estudiar tots els camps acabats d'esmentar i es va posar també més èmfasis al volums màxims permesos. Ja al 2016 hi ha hagut una reedició d'aquest manual [3] la qual ha sigut una millora de l'anterior, amb noves aproximacions i processos de càlcul molt més acurats. En aquest manual s'ha basat en gran part la present tesina, i d'aquí s'ha extret la següent taula de límits admissibles i tasses de volums màxims acceptables:

TIPOLOGIES DE RISC I RAONS	Q ( L/s )	Vmax ( L/m )
<b>PEATONS</b>		
Personal entrenat, ben calçat i protegit, esperant ser mullat. Ultrapassament solament als nivells inferiors, no cau aigua en grans quantitats i que no causa gaire perill al caure de l'estructura	1 a 10	500
Peatons conscients amb visió clara del mar i una no facilitat a ser espantats amb coneixença de que poden ser mullats. Estructures més amples.	0,1	20 a 50
<b>VEHICLES</b>		
Conducció a velocitats baixes, ultrapassament produït a baixes profunditats. No grans quantitats d'Overtopping, vehicles no submergits	10 a 50	100 a 1000
Conducció a velocitats moderades o altes, alt ultrapassament i molta entrada d'aigua.	0,01 a 0,05	5 a 50
<b>EDIFICIS DARRERE L'ABRIC DE L'ESTRUCTURA</b>		
Danys significatius o enfonsament dels grans iots	50	5000 a 50000
Enfonsament de petites embarcacions situades a 5-10 metres del dic. Danys en grans iots.	10	1000 a 10000
Construcció d'elements de l'estructura	1	-
Danys en equipament a menys de 5-10 metres del dic.	0,4	-

Taula 3: límits admissibles de la taxa i el volum d'ultrapassament [3]

### 3.2.3 PREDICCIÓ DE L'ULTRAPASSAMENT I FÒRMULES EMPÍRIQUES RELACIONADES

La gran majoria d'estudis que es centren el fenomen de l'ultrapassament produït en una estructura són reproduccions a petita escala de fenòmens naturals que, o bé s'han produït, o bé es vol intentar estar previngut en el cas de que succeeixin. Hi ha dues maneres de generar onades en un laboratori que puguin provocar Overtopping, onades de caràcter regular o irregular.

La generació d'onades regulars ens proporciona una facilitat gran en termes d'entendre el que està passant i en la seva aplicació, ara bé, els resultats que es poden obtenir són molt menys reals degut a la seva senzillesa i a la seva poca veracitat. Al final a la naturalesa mai ens trobarem una sèrie d'onades de caràcter regular. És per això que normalment la gran majoria d'assajos opten per la segona metodologia de generació, la que genera sèries d'onades irregulars, ja que és la que ens trobem a la natura i la que la seva complexitat ens proporciona resultats més acurats, tot i ser més difícils d'interpretar.

L'onatge irregular ( l'utilitzat en la present tesina a l'hora de generar sèries d'onades ) es pot estudiar de dues maneres diferents; mesurar els fenòmens a la naturalesa tot realitzant treballs o desenvolupar models basats en resultats contrastats obtinguts en laboratoris. Per lògica, el camp de la investigació s'ha acabat centrant el la segona opció, ja que la primera te dos grans inconvenients; no sempre hi ha onades que sobrepassin estructures en les condicions que es volen estudiar i que el treball de camp porta associat en si mateix un gran cost. És per això que, com ja hem dit abans, a mitjans de la dècada dels anys 70, es van començar a reproduir assajos a laboratoris i es va començar a investigar en aquesta direcció.

Que la generació d'onades irregulars sigui la via per on avui en dia s'està avançant, no vol dir que sigui òptima, ja que hi ha determinats fenòmens que no es tenen en compte a l'hora de posar en pràctica aquests experiments, com podria ser l'acció del vent, o el reflux creat per les onades a l'hora de trencar contra l'estructura.

A continuació es descriuran les principals formulacions empíriques que es fan servir actualment per a poder intentar preveure l'ultrapassament que pot tenir una estructura a l'hora de dissenyar-la [9]:

- **APROXIMACIÓ D'OWEN ( 1980 )**

$$\frac{Q}{G * H_s * T_{om}} = a * \exp\left(-b * \frac{R_c}{H_s} * \sqrt{\frac{S_{om}}{2\pi}} * \frac{1}{\gamma_r}\right)$$

Owen, a finals de la dècada dels 70, va protagonitzar una sèrie de d'experiments subjectes a condicions d'onatge irregular per a determinar l'ultrapassament en dics marítims tant verticals com en talús. D'altra banda, també va ser el precursor de la següent fórmula, que ha estat la utilitzada per a poder trobar l'altura de coronació de la nostra estructura:

$$\frac{Q}{G * H_s * T_{om}} = a * \exp\left(-b * \frac{R_c}{H_s} * \sqrt{\frac{S_{om}}{2\pi}} * \frac{1}{\gamma_r}\right)$$

$$S_{om} = \frac{H_s}{L_{om}} = \frac{G * T_{om}^2}{2\pi}$$

On:

Q És el cabal per ultrapassament per unitat de longitud de l'estructura

$T_{om}$  És el període mig

$H_s$  És l'altura d'onada significant

G És l'acceleració de la gravetat

$R_c$  És l'altura de coronació de l'estructura per sobre el nivell de l'aigua

Els valors empírics  $a$  i  $b$  són constants que depenen de la geometria del perfil.

- **APROXIMACIÓ DE GODA ( 1985 )**

L'any 1985 Goda va presentar la seva nova metodologia per a l'estudi de l'ultrapassament en dics marítims. Durant anys va estar treballant en la investigació i en l'anàlisi posterior de les dades obtingudes en estructures marítimes situades al Japó i també en simulacions al laboratori realitzades per ell mateix. Es va centrar en gran part en la generació d'onades en sèries de caràcter irregular, sent el precursor en aquest camp, ja que anteriorment a ell no hi havia agut ningú que s'hagués dedicat a realitzar un estudi tant exhaustiu de l'overlapping amb aquestes condicions d'onatge.

El mètode de Goda es basa en un format gràfic. Les figures que es veuen a continuació mostren diagrames dissenyats per Goda per estimar l'ultrapassament que es produirà sobre dics en vertical.

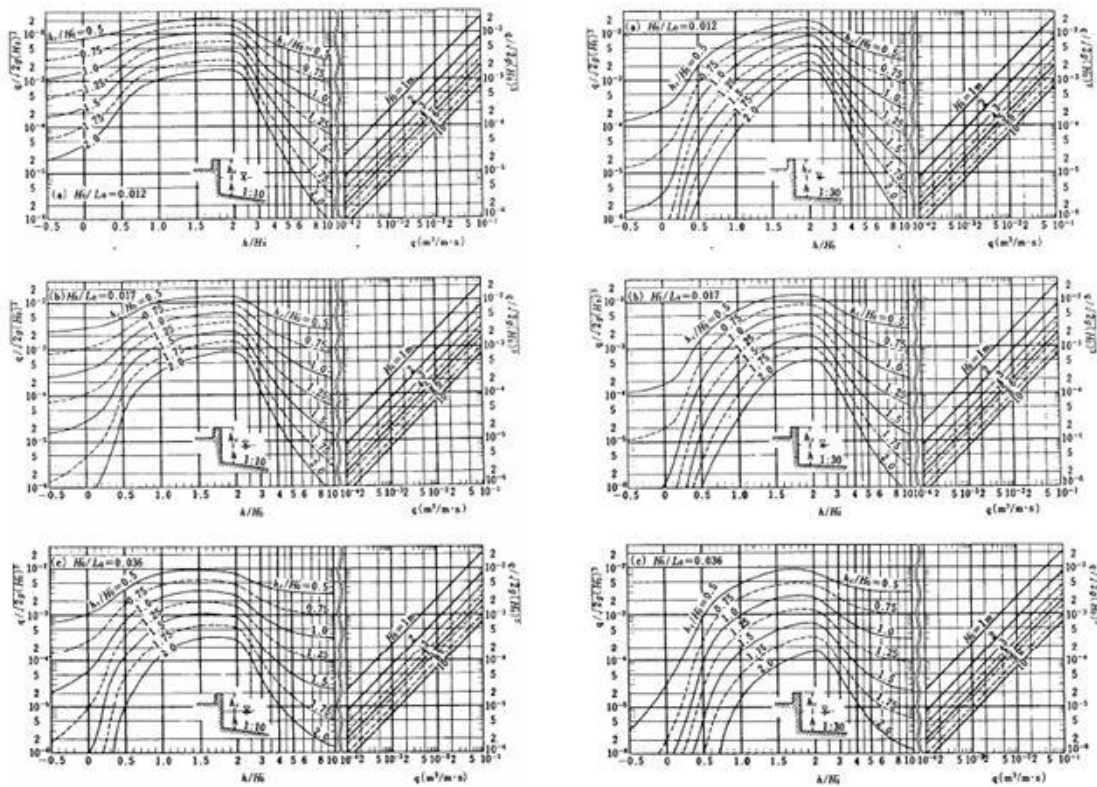


FIGURA 11: ultrapassament amb fons 1:10 a l'esquerra i amb fons 1:30 a la dreta de la imatge [10]

En les dues figures es poden veure gràfics realitzats per a un fons batimètric d'aproximació a la costa, amb una inclinació d'1:10 i d'1:30 respectivament. A part, els mateixos gràfics estan



generats per tres tipologies diferents d'onades diferenciades entre si pels peralts de les pròpies onades.

La metodologia per obtenir l'ultrapassament és bastant senzilla. Coneixent les condicions de les onades i la geometria del dic, escollirem el diagrama que més s'aproximi a les nostres dades i obtindrem així un valor Q d'ultrapassament unitari.

Si per contra ens trobem que la inclinació del fons marí o el peralt de les nostres onades disten molt de les proposades per Goda en les diferents gràfiques ens veurem obligats a realitzar una interpolació de valors per a obtenir un resultat que s'apropi més a la realitat i sigui lo més correcte possible.

El mateix Goda ja admetia en el moment de presentar els seus estudis que el seu mètode no és del tot precís, ja que les dades utilitzades tenien una certa variació respecte a les originals degut a la dispersió que aquestes oferien en el moment de ser preses. Utilitzant aquesta metodologia mai cometrem un error superior al 20%.

Ja al 1993, Herbert va confirmar la feina de Goda i la va ampliar estudiant rangs de batimetries més alts i ampliant també l'acotació dels peralts de les onades.

- **APROXIMACIÓ DE VAN DER MEER I JANSSEN ( 1995 )**

Van der Meer i Janssen van desenvolupar un seguit de noves fórmules empíriques per calcular l'overtopping sobre estructures marítimes a partir d'un seguit d'assajos experimentals realitzats sota condicions d'onatge irregular. Les fórmules van ser fonamentades en una gran base de dades d'onatge irregular caracteritzades de forma espectral. Van treballar sobre dues tipologies d'onades; les que arriben a l'estructura estudiada sense arribar a trencar i les que per contra arriben ja trencades. Per a poder distingir en quina de les dues hipòtesis ens trobem, utilitzarem el paràmetre de trencament  $\xi$  definit com:

$$\xi = \frac{\tan\theta}{\sqrt{S_{op}}}$$

on:

$\theta$  és l'angle d'inclinació de l'estructura

$S_{op}$  paràmetre de peralt de l'onada, definit com:

$$S_{op} = \frac{2\pi H_{s0}}{gT_{p0}^2}$$

$H_{s0}$  alçada d'ona significant en aigües someres

$g$  acceleració de la gravetat

$T_{p0}^2$  període de l'onada en aigües profundes

Els valors que ens separaran les condicions de les onades seran els següents:

- a)  $\xi > 2 \rightarrow$  condició d'onades sense trencar
- b)  $\xi < 2 \rightarrow$  condició d'onades ja trencades

Van der Meer i Janssen, a partir d'aquests paràmetres van desenvolupar dues formulacions diferents per a cadascuna de les dues condicions d'onatge proposades.

- **APROXIMACIÓ DE CLAUDIO FRANCO I LEOPOLDO FRANCO ( 1998 )**

L'equip format per C. Franco i L. Franco va resoldre a finals de la dècada dels 90 una nova formulació per l'ultrapassament de dics en vertical. Concretament els seus estudis es basen sobre dics formats per caixons, una de les estructures marítimes més acceptades en les últimes dècades. Des del 1989 aquest equip d'enginyers italians va estar recopilant dades de diverses tipologies d'assajos experimentals realitzats per diferents laboratoris europeus. Al laboratori ENEL-CRIS ( Centre d'investigació hidràulica del consell d'electricitat italià, Milà ) es va dur a terme la investigació sota condicions irregulars d'onades sense arribar a trencar. Van extreure dades també de projectes finançats per la Unió Europea, com podria ser en MAST-MCS ( Monolithic Coastal Structures ) o el LIP ( Large Instalation Plan, realitzat a Delft ). També van aportar dades entre d'altres el Centre d'Estudis de Ports i Costes del CEDX ( Madrid ) i HR Wallingford ( Regne Unit ).

Els autors van assumir que els principals paràmetres que influeixen en aquesta tipologia d'ultrapassament són el francbord ( aspecte ja comentat en apartats anteriors ), l'alçada d'ona significant  $H_{s1/3}$  i el cabal ( Q ) d'aigua sobrepassa. La fórmula que van proposar era la següent:

$$Q_f = A \exp(-BR_f)$$

On

$Q_f$  és l'ultrapassament adimensional, definit com:

$$Q_f = \frac{Q}{\sqrt{gH_s^3}}$$

$g$  acceleració de la gravetat

$R_f$  francbord relatiu definit com

$$R_f = R_c / H_s$$

A i B coeficients que depenen de la tipologia d'estructura marítima, de les condicions de les onades i de la batimetria de la zona d'estudi.

Ja al 1994, L. Franco conjuntament amb M. De Gerloni i Van der Meer havien proposat la següent fórmula:

$$Q_f = 0,192 \exp(-4,295 R_f)$$

L'inconvenient d'aquesta fórmula era que només es podia fer servir en l'interval

$0,9 < R_f < 2,2$ . Això ho va convertir en un gran inconvenient ja que veia reduïda la seva capacitat d'estudi en front a una gran quantitat d'estructures marítimes ja aleshores existents.

La fórmula definitiva presentada per C. Franco i L. Franco és la següent:

$$Q_f = 0,082 \exp\left[\frac{-3R_f}{\gamma_{\beta\sigma}\gamma_{geom}}\right]$$

On

$\gamma_{\beta\sigma}$  correspon al coeficient de l'angle d'atac de les onades. Aquest es 0,83 per a angles d'atac de  $\beta \leq 20^\circ$ . Per a angles majors,  $\gamma_{\beta\sigma} = 0,83 \cos(20^\circ - \beta)$ .

$\gamma_{geom}$  correspon al coeficient de geometria de l'estructura marítima. Per una estructura sense proteccions, el valor del coeficient és 1.

- **EUROTOP 2007 & 2016**

Ja al 2007 va ser publicat per una associació d'eminències en el camp de l'Oertopping [3] manual on es recollia la gran majoria d'avanços a nivell europeu. Al 2016 en va sortir una segona edició que el que ha fet ha estat simplement una comparativa i millora del que ja s'havia explicat a l'edició del 2007, aprofitant les equacions ja descrites a l'edició anterior. Aquest manual ha esdevingut la primera eina i pràcticament la única que és consultada avui en dia a l'hora de preveure l'ultrapassament quan s'han de projectar estructures.

La gran diferencia/millora es troba en l'àrea de les estructures que tenen una cota de coronació molt baixa, incloent aquelles les quals la seva cota de coronació està just per sobre del nivell del mar. Pels dics en talús, on el francbord té al menys la meitat de longitud que l'alçada d'onada de disseny ( $R_c/H_{m0} > 0,5$ ) les diferències entre la formulació de l'antic manual ( 2007 ) i el nou ( 2016 ) són pràcticament mínimes. És per això que actualment encara es pot fer servir en la seva gran majoria les fórmules del primer manual.

La fórmula empírica utilitzada per calcular l'Overtopping utilitzada en ambdós manuals és la següent:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = a \exp\left[-\left(b \frac{R_c}{H_{m0}^3}\right)\right] \text{ per a } R_c \geq 0,5$$

On

$H_{m0}$  és l'alçada d'ona significant

a i b són coeficients empírics prefixats

$R_c$  és la cota de coronació de l'estructura

Q és el cabal per metre lineal

g és l'acceleració de la gravetat

Aquesta equació ha esdevingut popular ja que genera una línia recta en una gràfica del tipus logarítmic-lineal i només consta de dos coeficients empírics per entrar a la fórmula.

Des del 2007 coautors del manual han seguit treballant sobre l'ultrapassament en línies d'investigació amb gran interès. Tot els avanços fins la publicació del manual al 2016 van ser resumits al manual de Van der Meer i Bruce ( 2014 ). Un dels més importants, i obviat com ja s'ha esmentat anteriorment a la primera edició, és l'ultrapassament en estructures que tenen una cota de coronació molt baixa o nul·la pràcticament.

Treballant en dics en talús, les estructures que tenen aquestes condicions de cotes baixes o que es troben a nivell del mar s'havien obviat pràcticament sempre, segurament pel fet de que l'overtopping produït és de grans dimensions i això genera una problemàtica en l'estudi. No obstant, això no li resta importància.

Els anàlisis han avançat en aquesta direcció per a poder donar llum en aquests aspectes, ja que fórmules com l'anterior, de caràcter exponencial, ignoren molt els valors propers a zero. Per tant els avanços el que han fet ha estat generar noves fórmules empíriques que incloguin aquestes casuístiques tant com les de cotes de coronació més altes. L'anàlisi de Van der Meer i Bruce ( 2014 ) es va basar en la revisió del treball fet per Dutch (1970 ) que oferia una primera predicció de que passava quan es tenia una cota de coronació propera a zero. La seva proposta va ser una curva lineal representació d'una funció exponencial essent en si mateix un cas singular d'una distribució Weibull. Això dona la facilitat d'anar enrere i entrar a una funció Weibull i utilitzar un factor de forma ajustat. La funció resultat s'assimila molt a l'anteriorment descrita i respon a la següent formulació:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = a \exp\left[-\left(b \frac{R_c}{H_{m0}^3}\right)^c\right] \quad \text{per a } R_c \geq 0$$

La gran diferencia entre aquestes dues funcions és l'aparició d'un tercer coeficient c i el que ens aporta és una vàlida per a tot el rang de cotes de coronació superiors o iguals a 0. L'efecte d'aquest exponent c generarà una curvatura en la representació de la funció al gràfic logarítmic lineal, sempre i quant la c no sigui de valor igual a 1 ( si això passa l'equació es transforma en l'anterior ).

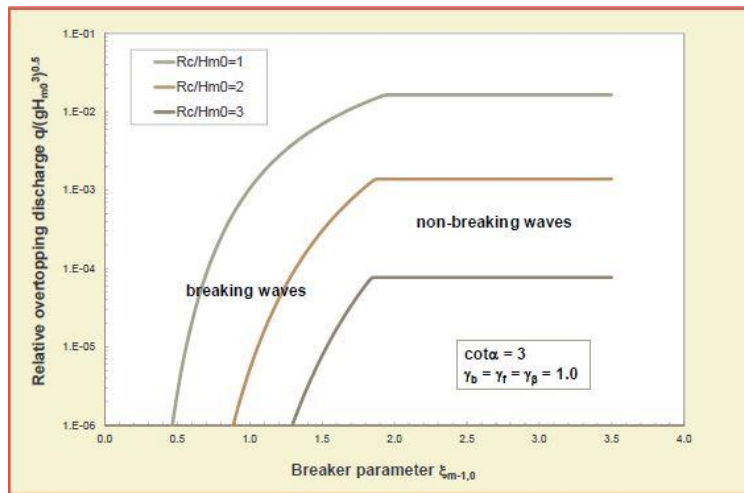


FIGURA 12: cabal d'ultrapassament en funció del paràmetre de trencament [3]

El cabal per metre lineal que supera una estructura pot ser definit arrel de dues fórmules, una per onades que trenquen i l'altra per les que no ho fan. La figura anterior ( XXX ) relativa a tres francbords diferents, mostra com, en les onades que no arriben a trencar, si s'incrementen els paràmetres de trencament l'overtopping va augmenta fins a arribar a un màxim.

Vist això, la fórmula general representativa ,segons el manual del 2016, per a cabals que sobrepassen dics en talús ve donada per les dues següents equacions:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0.023}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \cdot \zeta_{m-1,0} \cdot \exp \left[ - \left( 2.7 \frac{R_c}{\zeta_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right)^{13} \right] \quad 5.10$$

$$\text{with a maximum of } \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.09 \cdot \exp \left[ - \left( 1.5 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma^*} \right)^{13} \right] \quad 5.11$$

FIGURA 13: formulació general del cabal d'ultrapassament descrita al manual Eurotop 2016 [3]

On

$\gamma_b$  correspon al factor d'influència del berm

$\gamma_f$  correspon al factor d'influència de la rugositat dels elements del dic en talús

$\gamma_\beta$  correspon al factor d'influència de l'angle d'atac de les onades

$\gamma_v$  correspon al factor d'influència d'una suposada paret al final del dic

Que representades a la gràfica i en comparació amb la del 2007, tenen la següent forma:

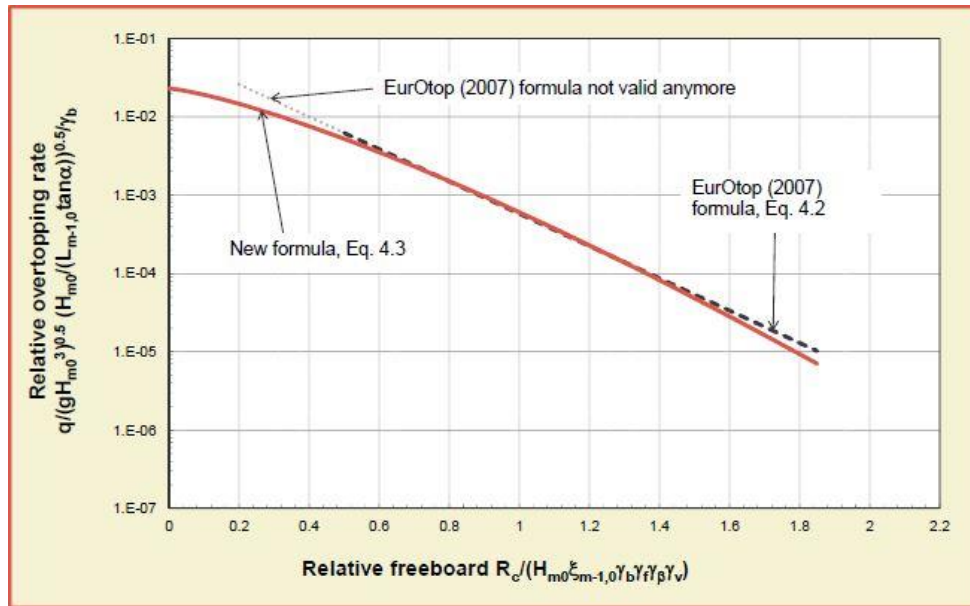


FIGURA 14: diferència entre formulació Eurotop 2007 i 2016 [3]

Aquesta és la gran diferència entre els dos manuals, en tot el demés segueixen una línia bastant semblant.

El detall descrit en el manual és exhaustiu, però per a la present tesina se'n té suficient amb lo anteriorment descrit, per a més informació es pot consultar el manual Eurotop 2016 a internet.

## 4 METODOLOGIA DE L'ASSAIG D'ESTUDI

### 4.1 MODELATGE FÍSIC APLICAT A L'OVERTOPPING

Un dels grans inconvenients amb el qual es troba un quan vol realitzar un modelatge físic de l'Overtopping és la introducció dels factors d'escala. Com ja s'ha comentat anteriorment, un assaig mal escalat es pot traduir en una variació entre fenòmens que no sigui la corresponent a la realitat. Això es pot deure a diferents factors; errors humans, complexitat en implementar sempre la mateixa metodologia d'assaig, efectes determinats de cada laboratori en particular poden arribar a fer que el mateix assaig doni resultats totalment diferents depenent de com s'hagi portat a terme la presa de dades.

D'altra banda, i com també s'ha comentat anteriorment, el model d'assaig sempre serà més simple que la realitat, ja que es pot utilitzar onades en series regulars, sempre s'omet el vent...

#### 4.1.1 FACTORS D'ESCALA

Sempre que es treballa amb models hidràulics, s'han de tenir en compte tres variables per a que el model estudiat sigui coherent amb la realitat; la semblança geomètrica, la semblança cinemàtica i la dinàmica. Si s'aconsegueix que aquestes variables mantinguin les seves relacions estables, s'estarà realitzant un bon escalat del problema.

En tots els models que mantenen una semblança geomètrica, és imprescindible que es tinguin semblances dinàmiques entre masses i forces. Si s'aconsegueix la semblança dinàmica directament s'obté la semblança cinemàtica.

Les forces que actuen sobre els elements d'un sistema en un problema de mecànica de fluids són, generalment, la força de la gravetat ( $F_g$ ), la força de tensió superficial ( $F_s$ ), la força de compressió elàstica ( $F_e$ ), la viscositat ( $F_v$ ) i la reacció cinètica derivada de la inèrcia que té un amb massa ( $F_i$ ).

Amb la segona llei de Newton a la mà es veu que la suma de totes les forces, tant les accelerants com les desaccelerants són igual a la reacció per inèrcia del nostre fluid, ( $F_i$ ), podent arribar a assolir la següent equació:

$$(F_i) = (F_g) + (F_s) + (F_e) + (F_v)$$

Si la raó entre cada parella de forces ( el model com a divisor i el prototip com a dividend o viceversa ) es manté, tindrem una semblança entre el model i el prototip correcta.

Amb motiu de que el problema que estudia la present tesina no té en compte el trencament de les onades, fenomen durant el qual tenen molt pes les forces de tensió superficial ( $F_s$ ), la viscositat ( $F_v$ ) i la de compressió elàstica ( $F_e$ ), ens podem permetre el fet de menystenir-les. Per

condicions de la seva generació i de la geometria del canal, les onades que arriben a l'estructura estudiada ho fan en la seva gran majoria sense trencar, per tant, es produeix poca turbulència d'aigua.

Si es consideren nuls els efectes de les forces anteriorment descrites, ( $F_s, F_e, F_v$ ) i únicament es té en compte la força hidroestàtica de l'aigua sobre el dic, s'arriba a la conclusió que l'acció de la gravetat és la única que actua com a força restauradora de la diferència entre les aigües que es troben a banda i banda del nostre dic.

Tant és així que s'acaba per arribar a la següent equació:

$$(F_i) = (F_g)$$

Si com ja s'ha dit abans es compleix que ( essent els subíndex m i p model i prototip ), i s'expressen aquestes forces amb la terminologia física; ( $F_i$ ) = massa · acceleració i ( $F_g$ ) = massa · acceleració de la gravetat obtenim que:

$$\frac{F_{i_m}}{F_{i_p}} = \frac{F_{g_m}}{F_{g_p}} \rightarrow \left( \frac{V^2}{gL} \right)_{model} = \left( \frac{V^2}{gL} \right)_{prototip}$$

O el que és el mateix, i és amb l'equació que ens quedarem:

$$\frac{V}{\sqrt{g_\gamma L_\gamma}} = 1$$

Aquí el subíndex  $\gamma$  indica la raó entre les magnituds del model real i el nostre prototip. Amb tot això es pot establir que el número de Froude ha de ser igual en ambdós casos, cosa que ens porta inequívocament a que la semblança dinàmica s'obtindrà mitjançant les similituds de Froude.

En quant a la semblança geomètrica, si és aplicada a totes les longituds del model i del prototip obtenim la següent expressió:

$$\frac{L_m}{L_p} = \lambda$$

Per tant, i sempre a partir de les similitud de Froude i la semblança geomètrica es pot obtenir la següent taula i de la qual es guiarà la present tesina per a fer els escalats a l'hora de realitzar els càlculs pels assajos [7]:



GEOMETRIQUES			
LONGITUD	[L]	$N_L$	$N_L$
ÀREA	[L <sup>2</sup> ]	$[N_L^2]$	$[N_L^2]$
VOLUM	[L <sup>3</sup> ]	$[N_L^3]$	$[N_L^3]$
CINEMÀTIQUES			
TEMPS	[T]	$N_L^{1/2} N_\rho^{1/2} N_\gamma^{-1/2}$	$N_L^2 N_\rho N_\mu^{-1}$
VELOCITAT	[LT <sup>-1</sup> ]	$N_L^{1/2} N_\rho^{-1/2} N_\gamma^{1/2}$	$N_L^{-1} N_\rho^{-1} N_\mu$
ACCELERACIÓ	[LT <sup>-2</sup> ]	$N_\gamma N_\rho^{-1}$	$N_L^{-3} N_\rho^{-2} N_\mu^2$
CABAL	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]	$N_L^{5/2} N_\rho^{-1/2} N_\gamma^{1/2}$	$N_L N_\rho^{-1} N_\mu$
VISCOSITAT	[L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]	$N_L^{3/2} N_\rho^{-1/2} N_\gamma^{1/2}$	$N_\rho^{-1} N_\mu$
DINÀMIQUES			
MASSA	[M]	$N_L^3 N_\rho$	$N_L^3 N_\rho$
FORÇA	[MLT <sup>-2</sup> ]	$N_L^3 N_\gamma$	$N_\rho^{-1} N_\mu^2$
DENSITAT	[ML <sup>-3</sup> ]	$N_\rho$	$N_\rho$
PES ESPECÍFIC	[ML <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup> ]	$N_\gamma$	$N_L^{-3} N_\rho^{-1} N_\mu^2$
VISCOSITAT DINÀMICA	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> ]	$N_L^{3/2} N_\rho^{1/2} N_\gamma^{1/2}$	$N_\mu$
TENSIÓ SUPERFICIAL	[MT <sup>-2</sup> ]	$N_L^2 N_\gamma$	$N_L^{-1} N_\rho^{-1} N_\mu^2$
ELASTICITAT	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]	$N_L N_\gamma$	$N_L^{-1} N_\rho^{-1} N_\mu^2$

Hi ha més propietats dinàmiques que també s'han de complir, com per exemple la resiliència, el moment, el treball com a energia, la potència.. però que realment queden molt lluny de la tesina actual [7].

Com bé s'ha dit abans, només es poden aplicar les similituds de Froude quan les úniques forces resultants són la de la gravetat i les inercials. Quan això no passa i hi ha trencament de les onades, existeixen les altres forces ja esmentades. Quan no es consideren aquestes forces, parts del model es poden veure afectades per l'anomenat factor d'escala. Aquest factor d'escala es pot manifestar en, per exemple, la variació de la concentració de l'aire que acompanya el procés de trencament.

S'aconseguirà minimitzar o pràcticament anular aquest factor d'escala quan es compleixin unes condicions límits, que vindran imposades pels valors que adoptin cadascuna de les forces en relació a les forces inercials, les quals defineixen els paràmetres de Reynolds, weber, Cauchy y Euler i les seves posteriors similituds.

De l'Eurotop 2016 [3] es poden extreure els límits fixats de diferents paràmetres de de caracterització dels models que permetran poder assenyalar en quins moments es poden arribar a menystenir els factors d'escala.

Per a la correcta propagació de les onades són establerts els següents límits:  $Re_w$  ( número de Reynolds )  $\geq 10^4$ ,  $T$  ( període )  $\geq 0,35s$ ,  $h$  ( calat )  $\geq 2,0 cm$ .

Per a acotar el procés de run-up i seguir estant dins dels límits, el manual Eurotop ens indica fixar els següents valors: :  $Re_q$  ( número de Reynolds )  $\geq 10^3$ , :  $W_e$  ( número de Weber )  $\geq 10$ .

#### 4.1.2 TRACTAMENT DE LES DADES OBTINGUDES EN UN LABORATORI

Per norma general la generació d'onades en un laboratori segueix una sèrie d'onades irregulars. Hi ha dos teories bàsiques a tenir en compte a l'hora de calcular aquestes sèries irregulars per a poder generar-les correctament. A continuació es descriuen:

- **MÈTODE DEL CÀLCUL DE PROBABILITAT, GODA ( 1985 )**

Tal i com va formular goda l'any 2000 [10] com a la distribució de l'alçada d'ona singular, i sempre assumint que ens trobem en un registre de curta duració i en aigües profundes, l'alçada d'ona seguirà la distribució teòrica de Rayleigh de paràmetres  $H/\bar{H}$ . La densitat de probabilitat d'aquesta distribució ve donada per:

$$p(x) = \frac{\pi}{2} x \exp\left(-\frac{\pi}{4} x^2\right) \text{ essent } x = H/\bar{H}$$

On

$H$  l'alçada d'ona. Treballarem sempre amb alçades màximes

$\bar{H}$  alçada d'ona mitja

Com es treballa amb aquests paràmetres recentment descrits, la distribució de l'alçada d'ona individual té associada una funció de densitat de probabilitat exponencial.

A partir del volum d'ultrapassament, sabent les condicions de contorn de l'assaig o estudi i el temps de duració del tren d'onades obtindrem la taxa mitjana d'ultrapassament ( $q$  en L/s/m) ja escalat al nostre model.

Per a saber el temps de duració de la generació d'onades simplement hem de multiplicar el número d'onades pel període mig de les onades generades. Goda el descriu a **[10]** com a:

$$T_p = 1,2\bar{T} \quad \text{essent } T_p \text{ el període pic}$$

A partir de tenir el temps de duració, calcularem el cabal mig com a  $q = V/t$  agafant com a temps el de duració del nostre assaig.

Aquest cabal obtingut no serà el cabal que realment s'està buscant, ja que el buscat serà sempre el cabal per metre lineal d'estructura. Per obtenir-lo simplement s'haurà de dividir pels metres que tingui l'estructura sotmesa a l'onatge.

## 4.2 CAS D'ESTUDI

### 4.2.1 PRESTACIONS CIEMITO [ 11 ]

El canal dins el qual es realitzaran tots els assajos de la present tesina rep el nom de CIEMito justament perquè es tracta d'una canal a petita escala del CIEM ( Canal d'Investigació i Experimentació Marítima ), un canal dedicat a l'estudi d'onatge a gran escala.

És per aquest motiu que el CIEMito a passat a ser, des de la seva construcció al 2008, el complement perfecte del seu germà gran. Va ser construït per a respondre la demanda de generar una eina que ajudés a proporcionar un suport de qualitat dins els camps de la docència i de la investigació dins l'àmbit de la enginyeria marítima, i avui en dia segueix sent un dels puntals dins les infraestructures experimentals del CiemLab, el qual pertany al Laboratori d'Enginyeria Marítima ( LIM ), dins de la Universitat Politècnica de Catalunya ( UPC ).

Al tractar-se d'un canal a escala reduïda, dota als investigadors de molta més versatilitat i facilita de manera notòria la gran variabilitat d'assajos que s'hi poden dur a terme. Complementa de manera excepcional un canal de majors dimensions, disminuint els temps i els recursos dedicats a cada assaig.

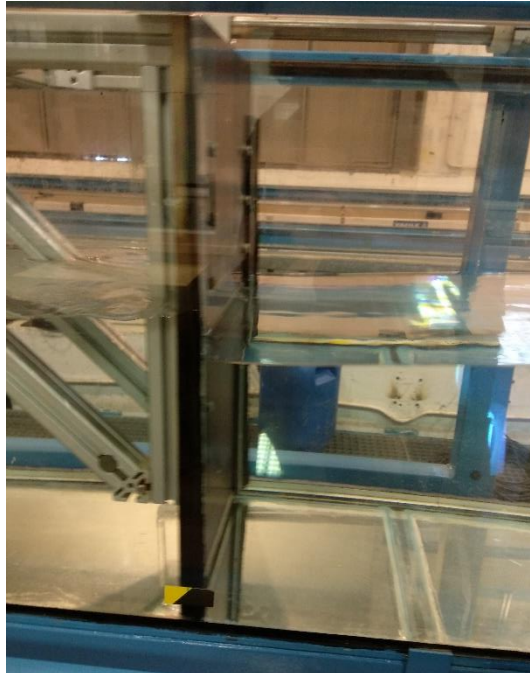
A nivell constructiu, el CIEMito té una longitud total de 18m, amb una secció útil de 0,38m d'ample i 0,56m d'alt, amb un calat màxim de 0,36m. L'estructura de suport està formada per perfils metàl·lics de secció quadrada laminats en fred i les parets i el fons són de vidre temperat de 5+5mm d'espessor.

Per a facilitar la seva operativitat, a ambdós extrems del canal hi ha disposades pous de 0,20m de diàmetre, que permeten tant emplenar-lo com buidar-lo així com la recirculació controlada de l'aigua mitjançant un sistema de generació de corrents. Igualment està dotat d'una dipòsit amb capacitat de 3m<sup>3</sup> i un sistema de bombeig i filtrat propi amb la intenció de que pugui tenir autonomia en el cas que hi hagi alguna avaria als sistemes aliens a ell mateix.



FIGURA 15: foto del canal CIEMito

La generació d'onades es realitza mitjançant una pala del tipus pistó, el moviment de la qual està proporcionat per un actuador lineal d'un metre de carrera màxima i una velocitat de resposta d'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'altura. El software fet servir en la generació d'onades ha estat desenvolupat també al LIM, i permet la generació d'onatge regular, irregular i la reproducció de sèries temporals.



*FIGURA 16: foto de la pala generadora d'onades del canal CIEMito*

El sistema d'adquisició de dades es basa en un equip combinat PXI-SCXI de National Instruments, amb una capacitat ampliable a 32 canal analògics. A nivell software, l'adquisició es duu a terme mitjançant el paquet per a l'adquisició de dades i anàlisi de les mateixes de Wavelab, desenvolupat per la Universitat d'Aalborg.

El parc de sensors disponibles en l'actualitat és de 8 sondes d'onatge resistives de HRWallingford, 8 sensors de nivell acústic Microsonic ( IMATGE XXX ) i 2 càmeres industrials de 2Mpix IDS per a la mesura i documentació dels assajos.



FIGURA 17: foto dels sensors HRWallingford disposats al llarg del canal

Només per concloure aquest apartat, cal remarcar que els factors d'escala més importants a ser considerats a l'hora de transformar les variables al nostre canal CIEMito ( i basant-nos en les similituds de Freud recentment explicades ) són les següents:

PROPIETATS	UNITATS	FACTOR D'ESCALA
LONGITUD	m	$\lambda$
MASSA	Kg	$\lambda^3$
DENSITAT	Kg/m <sup>3</sup>	1
TEMPS	s	$\sqrt{\lambda}$

Taula 4: paràmetres ajustats al canal per les similituds de FROUDE [12]

#### 4.2.2 DADES TEMPESTES

L'estudi de casuística consistirà en sotmetre a una estructura a una tempesta real tipus, i després a diferents tipologies de tempestes teòriques generades a partir de la primera tempesta per a poder després analitzar sota quina tipologia de tempesta i en quins moments tenim més ultrapassament en la nostra estructura.

- **TEMPESTA REAL**

La tempesta que ha estat triada per a realitzar la present tesina va ser mesurada per una boia localitzada al costat de Blanes, al mar mediterrani [12]. Aquesta boia estava englobada en el seu moment a la xarxa de boies XIOM, un seguit de boies distribuïdes per la costa catalana que durant tot l'any 2008 va mesurar els fenòmens marítics més importants que es van donar al llarg de la costa catalana.

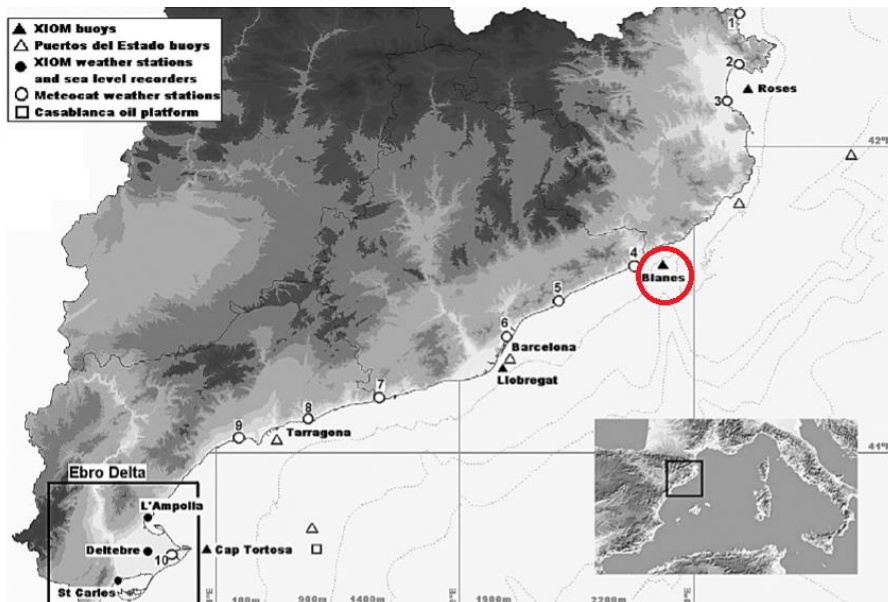


FIGURA 18: representació de la red XIOM, tnat la seva instrumentació com la seva localització [12]

La xarxa XIOM era un conjunt de 9 elements incloent estacions meteorològiques, mareòmetres, boies escalars i boies direccionals. La boia que va registrar la tempesta a Blanes correspon a una de les tres boies direccionals que el que feien era enregistrar la direcció i l'alçada d'ona de les onades a temps real.

S'ha triat aquesta tempesta ja que té determinades característiques que la fan especial, és molt llarga i va causar danys severes al port i a les estructures marítimes a part que és una de les 5 o 6 més grans enregistrades des que es tenen dades. Es va esdevenir el dia 26-12-2008.

Aquesta tempesta serà convertida en diferents tempestes sintètiques teòriques per a poder realitzar després diferents tipologies d'assaigs. Més endavant s'entrarà en el detall de la conversió.

Les característiques de la tempesta a tenir en compte són les següents:

- Límit establert: s'agafarà una alçada d'onada mínima de la tempesta de 3,5 metres, ja que s'ha comprovat en altres assaigs realitzats prèviament que les alçades d'ona per sota d'aquesta marca no ens provocaran Overtopping considerable a l'actuar sobre la nostra estructura.
- Duració de la tempesta aproximada: 21h
- $H_{s,pic}$  es de 465 cm.
- El període associat a l'alçada d'ona pic  $H_{s,pic}$  ( $T_{p,pic}$ ) és de 11,8s.

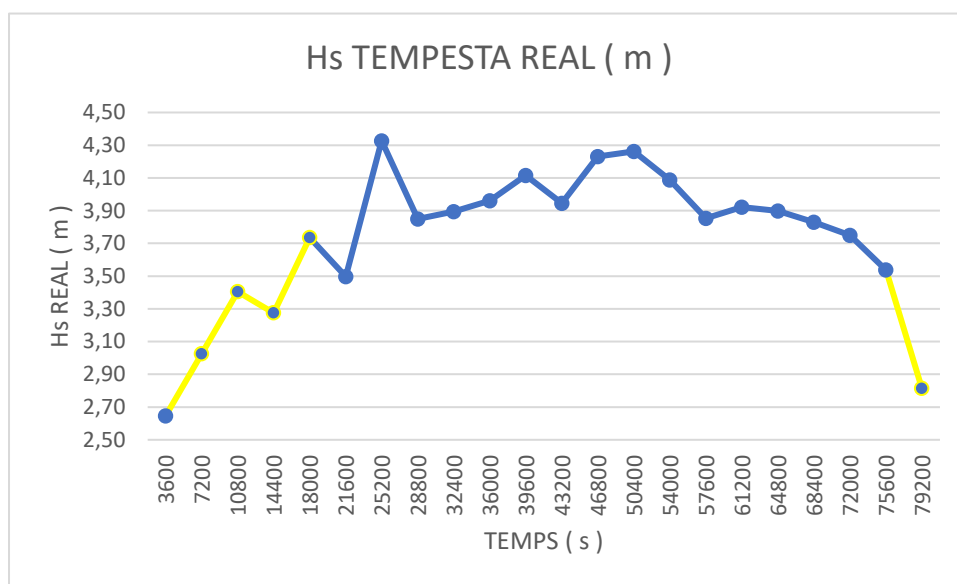


FIGURA 19: dades d'alçada d'ona real pertanyents a la tempesta real

A la gràfica anterior ( FIGURA 19 ) es poden veure les dades de la tempesta enregistrades; en blau seran les dades que convertirem pels anàlisis a realitzar, en groc, les dades menystingudes a causa de la seva poca alçada d'ona significant i com a conseqüència el seu no aportament de dades en l'estudi de l'ultrapassament.

Una vegada centrada i delimitada la tempesta, el que s'haurà de fer serà escalar-la tot utilitzant les similituds de Freud per a poder reproduir-la al canal. A la següent gràfica ( FIGURA 20 ) es pot veure la tempesta ja escala i amb només les dades que seran necessàries per el següent d'assaigs.



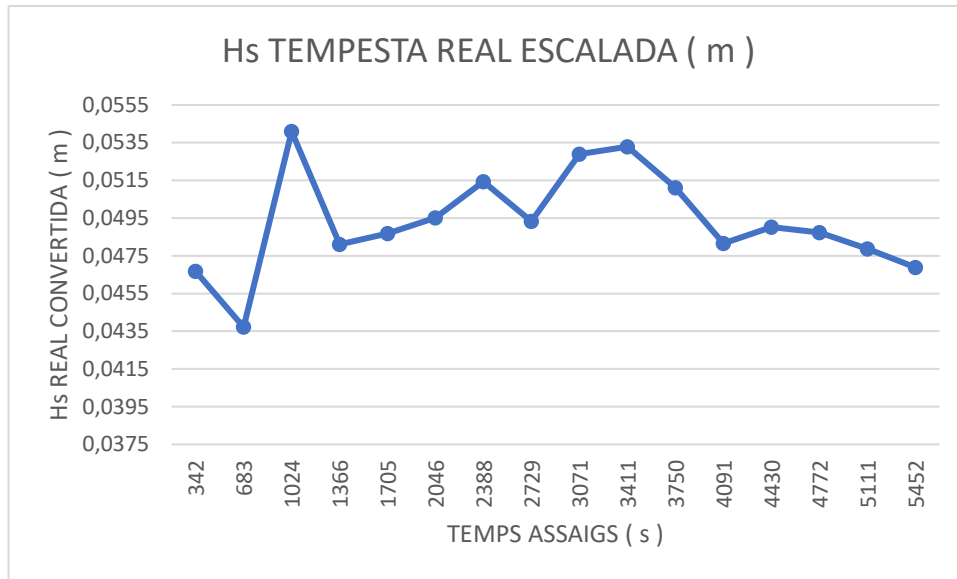


FIGURA 20: dades de la tempesta real ja escalada per a poder ser analitzada al canal

#### 4.2.3 CREACIÓ TEMPESTES TEÒRIQUES: TRAPEZOIDAL, TRIANGULAR I DE METODOLOGIA CLÀSSICA

- **CREACIÓ TEMPESTA TRAPEZOIDAL TEÒRICA**

Per a poder generar les tempestes de manera sempre igual i equitativa, la primera mesura que es prendrà serà la de mantenir el peralt (  $S$  ) constant.

$$S = H/L = 0,02 \text{ sempre constant}$$

Una vegada fixat això, si es coneix cada  $H_p$  es pot conèixer cada  $L$ . Una vegada coneguda  $L$  ja podem conèixer els valors del període pic, que seran els que realment són importants per poder generar les tempestes.

Per tan, i una vegada coneguts els períodes pic, el model teòric que s'utilitza per a construir la tempesta sintètica és el model d'Equivalència de Magnitud de les Tempestes ( EMS sigles en anglès ), amb una forma trapezoidal.

El primer que s'ha de fer és calcular l'energia associada a la tempesta real prèviament comentada. Podem considerar l'energia associada a la tempesta com a l'àrea per sota de la sèrie  $H_s$ -temps i és de l'ordre de 21.7 mh. Per tant la nostra tempesta trapezoidal creada tindrà la mateixa energia associada ( l'àrea a sota de la sèrie serà la mateixa ).

Al tractar-se d'una sèrie en forma trapezoidal, calcularem l'àrea ( energia ) amb la següent expressió:

$$E = \frac{1}{2} * (b_G + b_P) * h$$

On

$b_G$  correspon a la base gran del trapezi

$b_P$  correspon a la base petita del trapezi

$h$  alçada del trapezi ( la mateixa exactament que la de la tempesta real )

En aquesta darrera equació es tenen dues incògnites, i per a poder trobar-les necessitaríem una altra gràfica, escalada i seguint les mateixes propietats per a poder obtenir una segona equació i així aconseguir aïllar les incògnites.

El que es fa llavors és escalar cada eix amb valors compresos de 0 a 1 ( es té vinculat a cada punt enregistrat una alçada d'ona i un temps ) essent cada valor del temps un percentatge de la longitud total de la base gran del trapezi i cada alçada d'ona un valor comprés entre el 0 ( 3 m d'alçada mínima d'onada, ja que s'agafaran més valors per a que la generació del trapezi sigui més semblant, tot i que després es menystindran valors a causa de la seva falta d'alçada dona i la no provocació d'Overtopping) i 1 ( l'alçada màxima equivalent de la tempesta real ).

A la següent gràfica es pot veure l'escalat de la tempesta real que és del qual s'extraurà directament la base gran ( tindrà valor 1 ) i després es realitzarà el procés invers per a poder resoldre les incògnites:

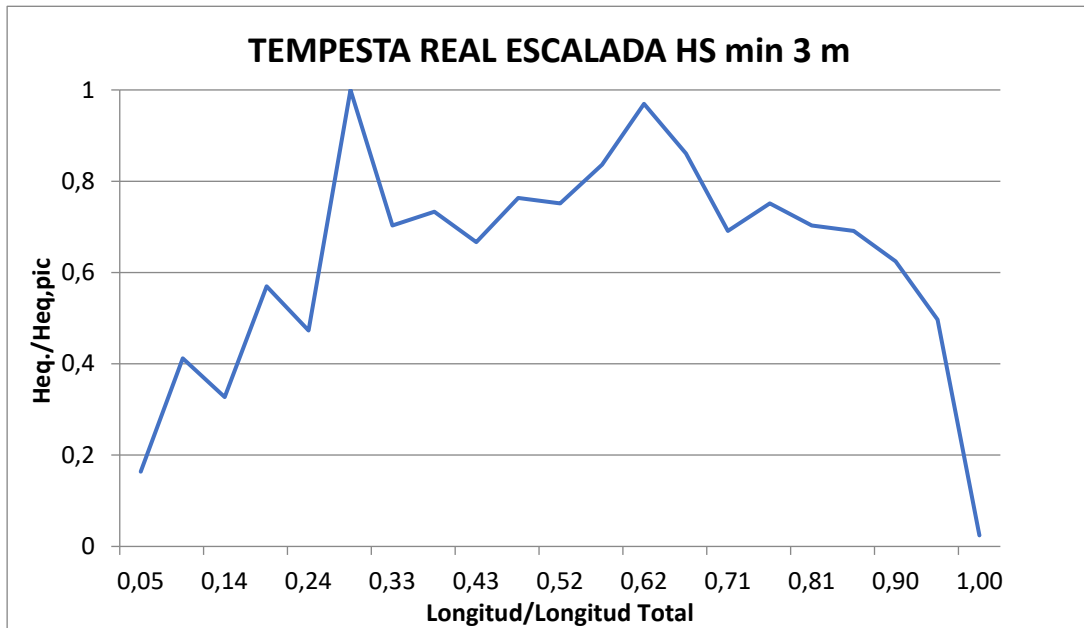


FIGURA 21: dades tempesta real ja centrada, limitant les seves alçades d'ona i escalada per a poder calcular després la tempesta trapezoidal

Aplicant la mateixa fórmula d'àrea del trapezi, i sabent que la base gran és 1 i que l'energia escalada és de 0,6247 mh; s'obté la següent expressió:

$$b_p = \frac{E_{escalada} * 2}{h} - b_G = \frac{0.6247 * 2}{1} - 1 = 0.2494 m$$

Una vegada obtingut aquest valor per a la base petita del trapezi, la única incògnita que ens quedarà serà obtenir quina serà la duració de la mateixa (  $D_{durada\ trapezi}$  ), que serà trobada amb la següent equació:

$$E_{real} = \frac{1}{2} * (1 + b) * H_{equiv,pic} * D_{durada\ trapezi}$$

Com tots els valors són coneguts, podem afirmar que  $D_{durada\ trapezi} = 21,05h \approx 21h$ , temps molt similar a la durada de la nostra tempesta real.

Per últim només faltaria calcular quant durarà la base petita del trapezi, tornant a entrar a l'equació prèviament descrita , i ja amb només la base petita com a incògnita:

$$E = \frac{1}{2} * (b_G + b_p) * h$$

Obtenim que la  $b_p$  té una duració de 5,3h.

La tempesta trapezoidal obtinguda tindrà la següent forma( ja amb els valors per sota de les alçades mínimes apartats) :

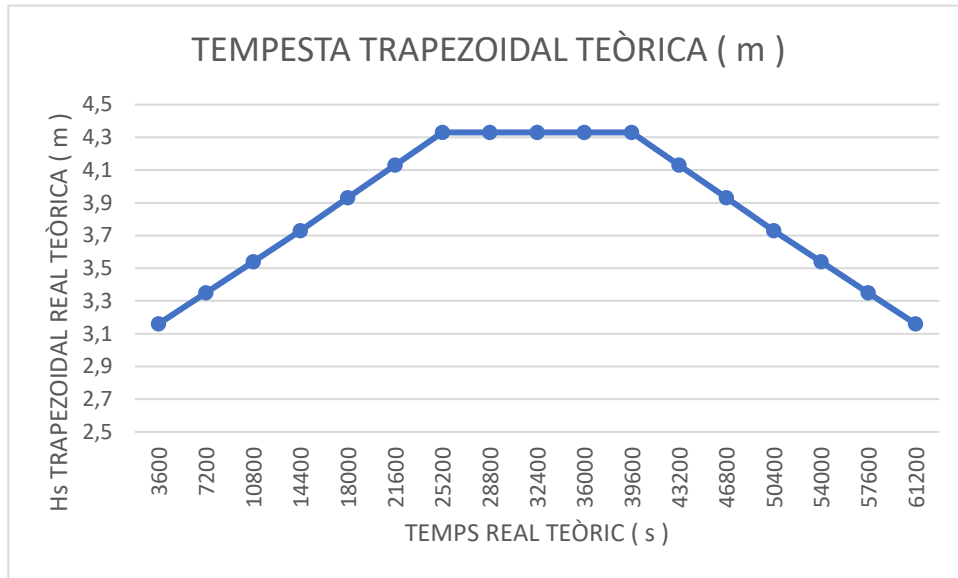


FIGURA 22: dades alçades reals tempesta trapezoidal teòrica

Una vegada obtinguda aquestes dades, només ens quedarà escalar-les utilitzant les similituds de Froude per a poder trobar la tempesta amb la qual es realitzaran els assaigs. A continuació es pot veure la forma que té la tempesta ja escalada:

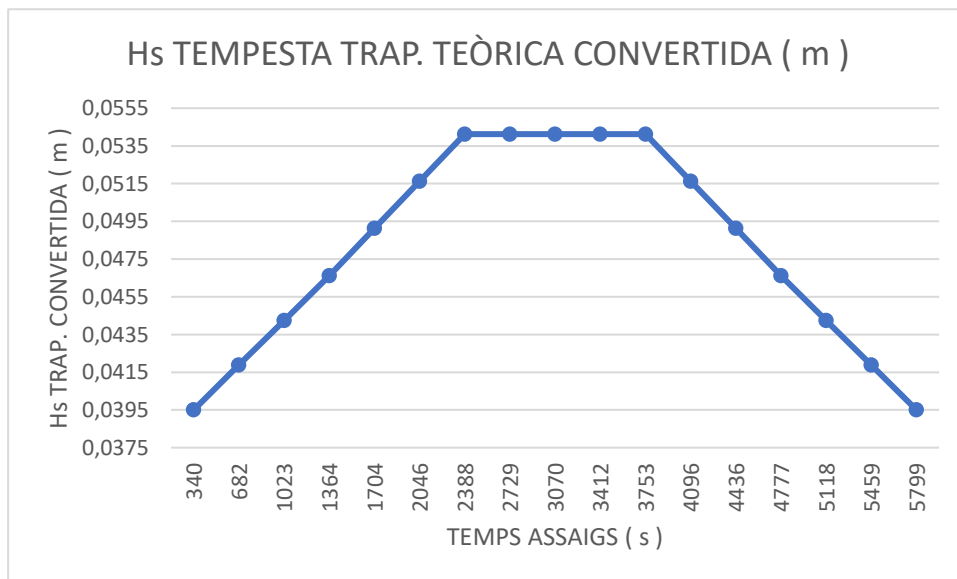


FIGURA 23: dades tempesta trapezoidal teòrica convertida per a poder ser assajada al canal

- **CREACIÓ TEMPESTA TRIANGULAR TEÒRICA**

La creació de la tempesta triangular és molt més senzilla que no pas la trapezoidal anteriorment descrita, ja que l'àrea del triangle ( igual a l'energia associada a la tempesta real ) és molt més bàsica que la del trapezi.

Per a crear una tempesta triangular s'ha de trobar la base del triangle ( $B_{triangle}^*$ ) utilitzant la següent expressió:

$$E_{tempesta\ triangular} = \frac{B_{triangle}^* \cdot h_{max,eq}}{2} \rightarrow B_{triangle}^* = \frac{2 \cdot E_{tempesta\ triangular}}{h_{max,eq}}$$

Igual que abans, l'àrea per sota de la gràfica, i per conseqüència l'energia associada a la tempesta ha de ser la mateixa ( 21,5 mh ) i l'alçada màxima  $H_{max,eq}$  (1.65 m) seria l'alçada del triangle. Amb tot això podríem trobar que:

$$B_{triangle}^* = \frac{2 \cdot 21.7mh}{1.65m} = 26.3 h$$

Com veiem, la duració de la nostra tempesta triangular creada és més llarga que la de la tempesta real, però tot i així aconseguim que l'àrea per sota la sèrie sigui la mateixa.

A les següents gràfiques ( XXX, XXX ) es pot veure com quedarà la tempesta triangular teòrica ja havent apartat els valors que no provoquen Overtopping i seguidament ja la tempesta escalada amb les similituds de Froude per a poder comparar-la ens els assaigs:

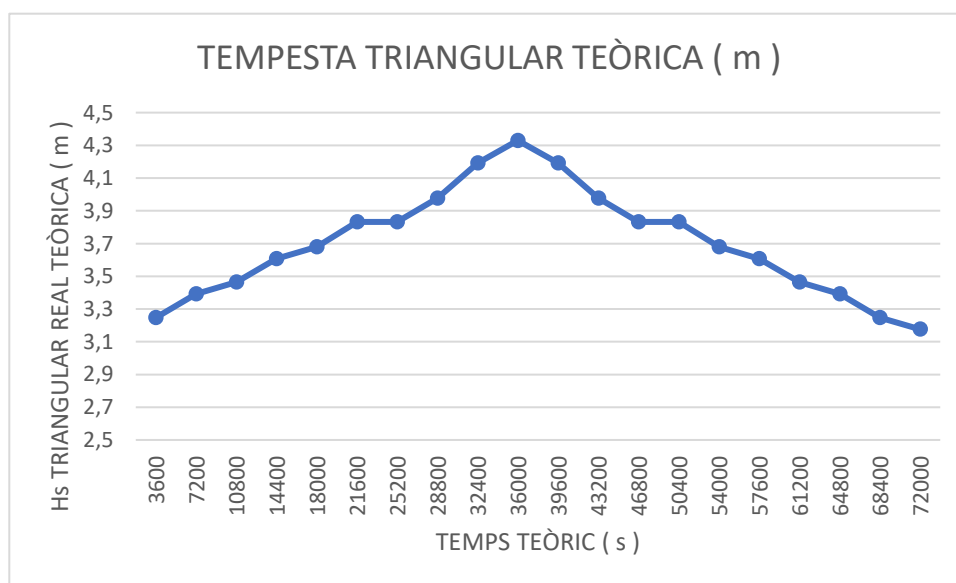


FIGURA 24: dades alçades reals tempesta triangular teòrica

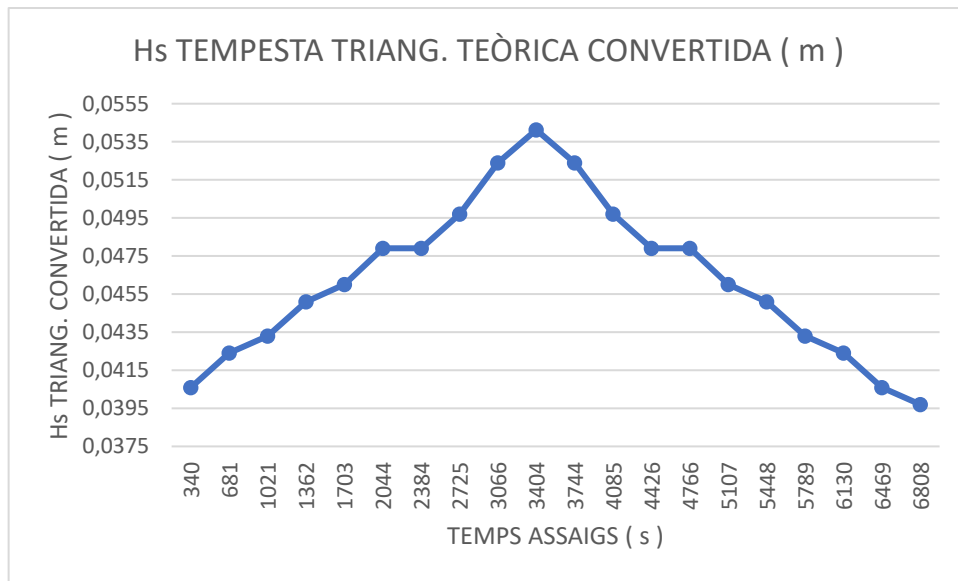


FIGURA 25: dades tempesta triangular teòrica convertida per a poder ser assajada al canal

- **CREACIÓ TEMPESTA METODOLOGIA CLÀSSICA**

Normalment la metodologia clàssica d'estudi que va ser proposada per Owen Allsop ( 1984 ) funciona sotmetent al nostre dic sota l'acció de sèries del mateix nombre d'onades ( normalment 1000 ) començant al 60% de l'alçada d'ona significant de la tempesta estudiada, i repetir el mateix assaig passant pel 80%, 100% i 120% de la mateixa.

De les dades que es disposen de la tempesta real, s'hauran d'agafar els 4,33m d'alçada màxima d'ona i els 11,8s de període pic i escalar-los, obtenint així els valors de 0,0541 m per l'alçada d'ona i 1,32s pel període pic.

#### 4.2.4 CÀLCUL I DISSENY DEL DIC SOTMÈS A ASSAIGS

- **CÀLCUL COTA DE CORONACIÓ ESTRUCTURA**

Una vegada clares les condicions del canal, el primer pas a fer per a poder realitzar els assajos és el dimensionament de l'estructura sobre la qual volem aplicar les proves. L'estructura triada per a sotmetre a assaigs serà un dic en talús.

La part més important a tenir en compte, ja que el que s'estudiarà serà l'overtopping, és l'altura de coronació de l'estructura.

El primer valor a fixar serà el nivell de l'aigua, que serà fixat en 300 mm de calat al canal CIEMito per a després poder treballar sobre l'estructura.

D'altra banda, i al tractar-se d'un estudi sobre l'ultrapassament, és necessari poder relacionar el cabal per metre lineal d'aigua que sobrepassarà l'estructura amb l'altura de coronació de la mateixa, és per això que s'aplicarà l'aproximació d'Owen:

- **APROXIMACIÓ D'OWEN ( 1980 )**

$$\frac{Q}{G * H_s * T_{om}} = a * \exp\left(-b * \frac{R_c}{H_s} * \sqrt{\frac{S_{om}}{2\pi}} * \frac{1}{\gamma_r}\right)$$

Owen, a finals de la dècada dels 70, va protagonitzar una sèrie de d'experiments subjectes a condicions d'onatge irregular per a determinar l'ultrapassament en dics marítims tant verticals com en talús. D'altra banda, també va ser el precursor de la següent fórmula, que ha estat la utilitzada per a poder trobar l'altura de coronació de la nostra estructura:

$$\frac{Q}{G * H_s * T_{om}} = a * \exp\left(-b * \frac{R_c}{H_s} * \sqrt{\frac{S_{om}}{2\pi}} * \frac{1}{\gamma_r}\right)$$

$$S_{om} = \frac{H_s}{L_{om}} = \frac{G * T_{om}^2}{2\pi}$$

On:

Q És el cabal d'ultrapassament per unitat de longitud de l'estructura

$T_{om}$  És el període mig

$H_s$  És l'alçada d'onada significant

G És l'acceleració de la gravetat

$R_c$  És l'altura de coronació de l'estructura per sobre el nivell de l'aigua

Els valors empírics **a** i **b** són constants que depenen de la geometria del perfil, i que en la casuística d'estudi actual prendran valors de 0,013 i 22 respectivament.



Entrant a la formulació d'Owen amb les dades de la tempesta real que s'estudiarà i de la qual pegen les altres anteriorment descrites es veu que la única incògnita que ens queda per resoldre és el cabal per metre lineal (  $Q$  en l'anterior aproximació ) sempre i quant anem donant valors a la cota de coronació (  $R_c$  ).

A la taula següent ( TAULA 5 ) es poden apreciar tots els valors necessaris, derivats de la tempesta, per a poder entrar a l'aproximació:

DADES TORMENTA REAL			
Som	Tom (s)	Tp (s)	Hs (m)
0,02199596	8,77825628	10,0949947	2,65
0,02371604	9,038628289	10,3944225	3,03
0,02943166	8,608217418	9,89945003	3,41
0,02567425	9,038628289	10,3944225	3,27
0,01891129	11,24729388	12,934388	3,74
0,03023144	8,608217418	9,89945003	3,50
0,02702335	10,12765199	11,6467998	4,33
0,03327057	8,608217418	9,89945003	3,85
0,0305335	9,038628289	10,3944225	3,89
0,01743304	12,06323497	13,8727202	3,96
0,01811335	12,06323497	13,8727202	4,12
0,02464065	10,12765199	11,6467998	3,95
0,01862359	12,06323497	13,8727202	4,23
0,03007809	9,526859074	10,9558879	4,26
0,03112742	9,172533893	10,548414	4,09
0,0240595	10,12765199	11,6467998	3,85
0,03075108	9,038628289	10,3944225	3,92
0,02169748	10,7284449	12,3377116	3,90
0,03002582	9,038628289	10,3944225	3,83
0,02342024	10,12765199	11,6467998	3,75
0,02497789	9,526859074	10,9558879	3,54
0,02338032	8,77825628	10,0949947	2,81

Taula 5: valors necessaris per a poder entrar a l'equació d'owen i poder calcular

*l'alçada de coronació de l'estructura que s'ha de dissenyar*

Per tant s'ha d'agafar una estructura que els cabals que la superin no siguin mai molt per sobre ni tampoc molt per sota dels cabals assumibles marcats per la normativa.

Aquests cabals el que marquen és la quota de seguretat que les estructures que es dissenyen tindran. Com més alt sigui el cabal d'entrada, més alt serà el risc, per tant com més petit sigui el cabal assumible, més alta serà la seguretat que l'estructura oferirà i normalment com a conseqüència més importància tindrà el que l'estructura estigui protegint en front a l'overtopping **[13]**.

D'altra banda la necessitat d'estudiar l'ultrapassament feia que no es fos d'una necessitat imperiosa anar a buscar una estructura que no fos pràcticament sobrepassada per la sèrie d'onades, ja que sinó l'estudi del cabal d'aigua per metre lineal sobrepassat no tindria sentit. Es va prefixar que l'objectiu era trobar una estructura on només els seus pics tinguessin valors per sobre de tots els cabals assumibles, però no així els valors del mig de la tempesta.

D'aquesta manera es van estar fent proves i es va decidir que l'estructura òptima per a fer els assaigs era una estructura amb cota de coronació de 6,5m per sobre el nivell de l'aigua ( 82,5 mm ja escalada amb les similituds de Freud sobre el nivell del canal prefixat en 300 mm ). A la següent gràfica es poden veure els cabals associats a la tempesta i els cabals assumibles per a constatar que l'elecció de la cota de coronació va ser l'adequada:

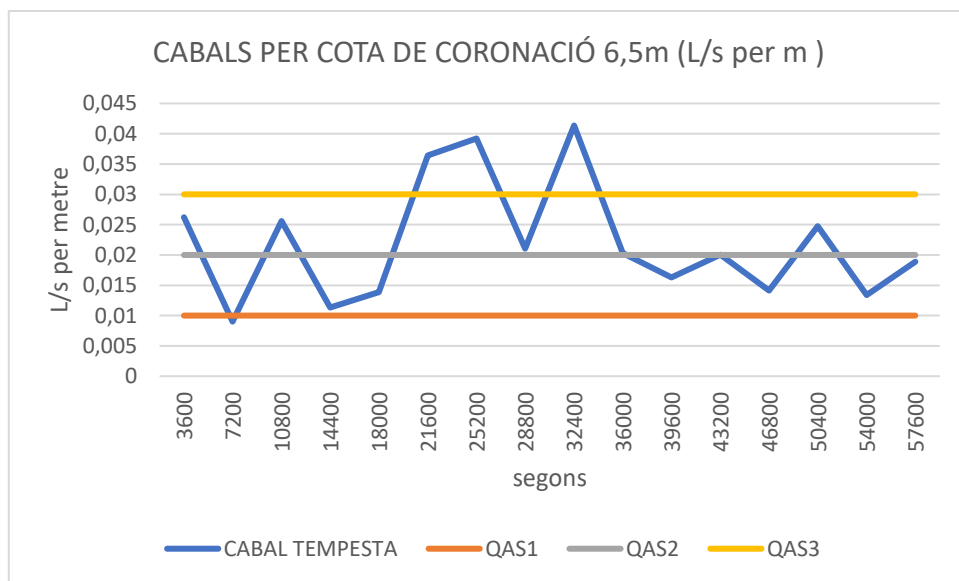


FIGURA 26: cabals generats per l'altura de coronació decidida i comparats amb els cabals assumibles

#### 4.2.5 DISSENY AMB AUTOCAD DE L'ESTRUCTURA

Una vegada realitzats tots els càlculs per a trobar l'altura de coronació de l'estructura, es procedeix al disseny de la mateixa.

Es necessitarà trobar un sistema que sigui capaç de, per una banda estar en consonància amb els càlculs prèviament realitzats, i per altra banda ser capaç de registrar tota l'aigua que sobrepassarà l'estructura durant cada assaig en singular.

Tots els dissenys i dibuixos a ma alçada es van fer utilitzant l'aplicació d'escriptori AUTOCAD 2017.

El primer pas vas ser dissenyar el dic en talús. Es va decidir que fos de plàstic dur i transparent i es va dissenyar amb un pendent d'entrada d'  $\frac{1}{2}$  ja que per als assajos que s'havien de realitzar durant la present tesina i pels que es realitzaran amb posterioritat, era el més adient.

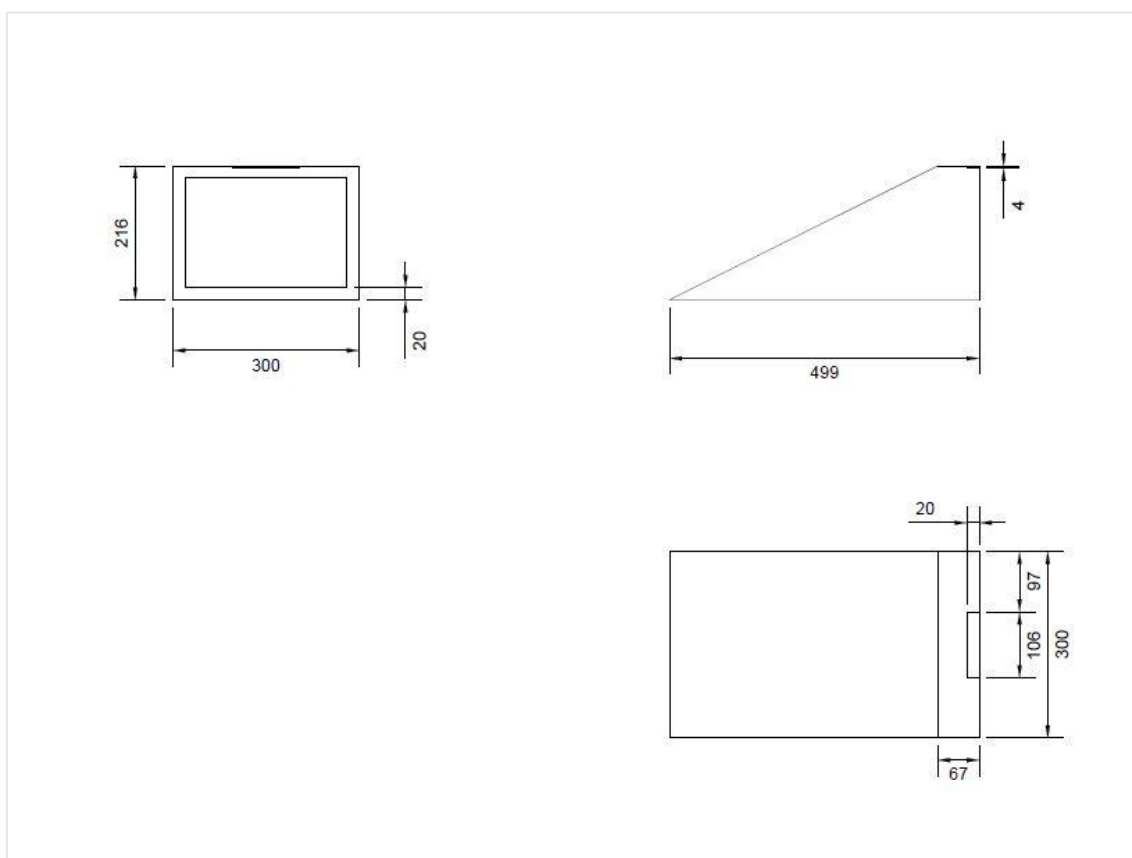


FIGURA 27: disseny de la cunya de l'estructura en talús

Es va dissenyar amb 300mm d'amplada ja que és el màxim d'amplada útil del canal CIEMito ( deixant mig centímetre per banda per a poder maniobrar i muntar el sistema amb més facilitat ). Es va projectar també una petita incisió a la part superior de l'estructura ( francbord ) de 4mm de profunditat i 10,6 mm, totalment centrada, per a poder després afegir una planxa de metall la qual servirà per a transportar l'aigua sobrepassada des del nostre dic al nostre dipòsit. A continuació s'adjunta la vista en 3D per a poder entendre millor la descripció:

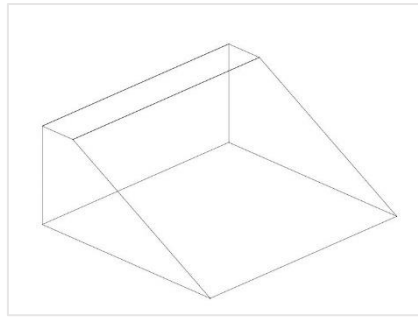


FIGURA 28: vista 3D cunya del dic en talús

Una altra part important del sistema a dissenyar era el dipòsit per a recollir l'aigua. Es va enginyar un sistema fet amb acer inoxidable que consta de dues caixes, l'externa de les quals anirà soldada a una planxa. La planxa té una triple funcionalitat, per una banda els hi fa de suport i fa que el sistema sigui estable, per altra banda fa que no floti ja que afegeix pes al sistema i a més ens proporciona la possibilitat de tenir un espai sec entre ambdues cavitats, generant així la possibilitat de col·locar cèl·lules de càrrega per a poder mesurar el pes de l'aigua.

Entrant en el disseny del sistema de recepció de l'aigua, i sabent que el nivell de l'aigua al canal seria de 300 mm, el primer que es va haver de dissenyar va ser la planxa amb el dipòsit extern del sistema, és a dir, el que estarà directament en contacte amb l'aigua del canal:

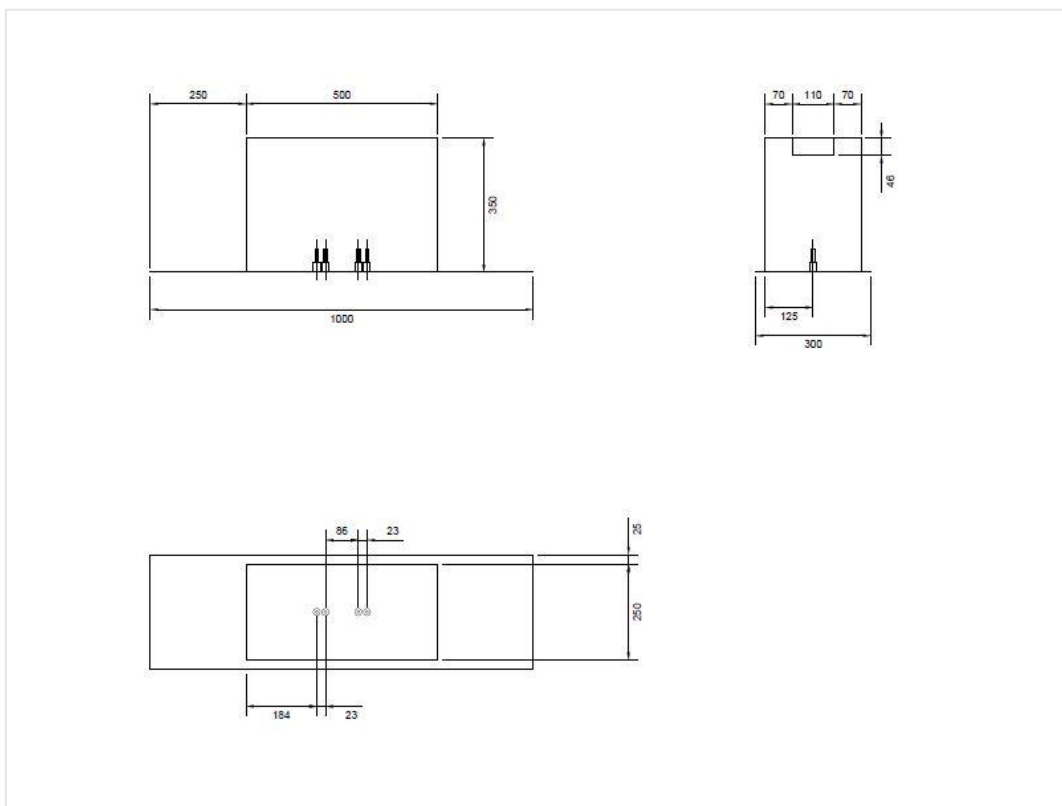


FIGURA 29: disseny de la planxa més el dipòsit extern del sistema de recollida d'aigua

La planxa d'acer es va haver de dissenyar comptant amb que la cavitat interna del dipòsit podia estar buida. En un principi es va fer servir un Factor de Seguretat d'1,20 per assegurar que el sistema no flotava. Fent uns simples càlculs de diferències de volums es va dissenyar la caixa ( Volum del dipòsit / Volum d'aigua en contacte amb la planxa ). Al final es va veure que si s'havia de complir aquest factor de seguretat d'1,20, la planxa acabava sortint massa gran i generava uns costos econòmics massa elevats, pel que es va acabar dissenyant amb un factor de seguretat de només un 1,06.

L'estructura en si consta de la planxa, les mesures de la qual son 1000 mm de llargada per 300 mm d'amplada i centrada al mig es troba forjada la primera part del que després esdevindrà el dipòsit. Es tracta d'una caixa de 350 mm d'altura, 25 mm d'ample i 500 mm de llarg. El disseny per això porta implícites dues peculiaritats per a poder encaixar després la segona part del dipòsit, la qual serà l'encerregada de controlar el volum d'aigua sobrepassat.

Per una banda constarà de 4 espàrrecs, disposats per parelles, soldats al centre, a 184 mm de cada extrem en la llargada i amb una distància de 23 mm entre ells, que serviran per a poder col·locar les cèl·lules de càrrega que calcularan el pes d'aigua que suporta el segon dipòsit i que més endavant es descriuran.

Per altra banda, s'inclourà també una obertura en un dels costats de l'amplada, centrada i de 110 mm de llarg i 46 mm d'alçada, que servirà per a poder rebre l'aigua a través d'una rampa, la qual també més endavant serà descrita. A la següent imatge es veu en detall l'esquema en 3D per a poder entendre realment tot lo anteriorment descrit:

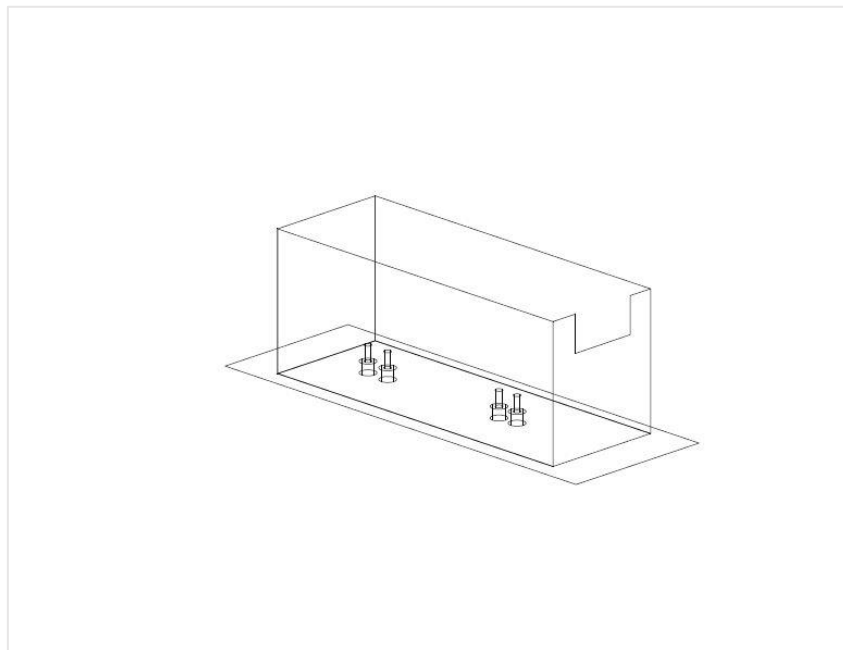


FIGURA 30: vista 3D de la planxa i el dipòsit extern, part del sistema de recollida d'aigua.

El següent pas en quant al disseny serà el del segon dipòsit, el qual la seva cara externa no està en contacte amb l'aigua, però si la seva cara interna. Aquí serà on s'emmagatzemarà tota l'aigua sobrepassada. Aquest dipòsit fa 460 mm de llargada i 260 mm d'amplada i queda totalment a l'interior de l'anterior dipòsit ( s'obtenen 20 mm de marge per cada costat per a poder tenir

maniobrabilitat a l'hora del muntatge ), i consta també de dues característiques que el faran encaixar amb la resta del sistema global.

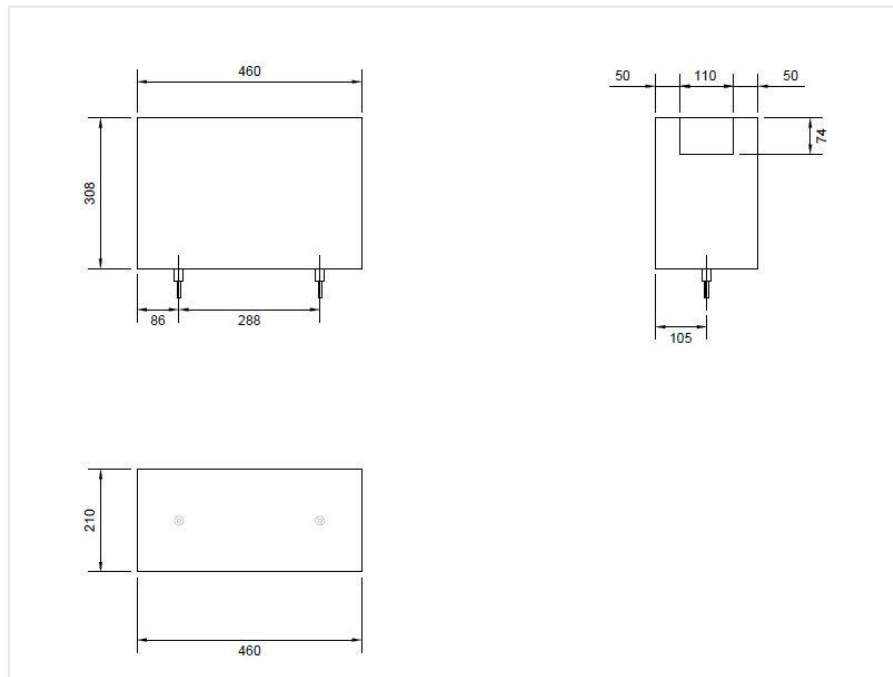
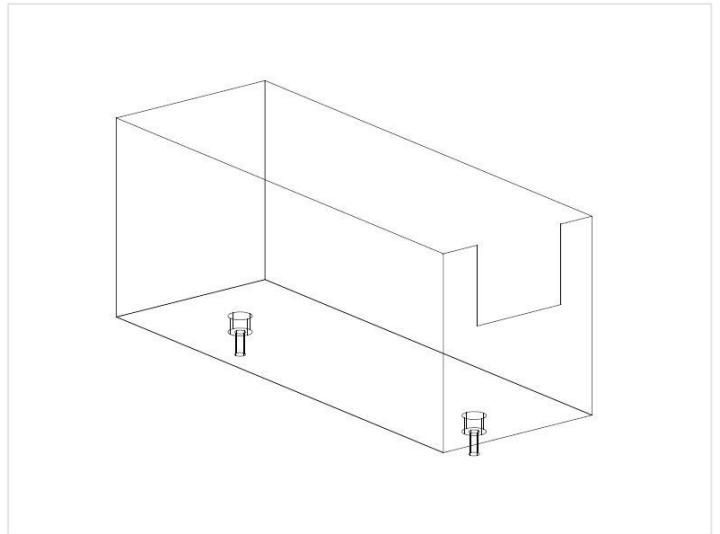


FIGURA 31: disseny del dipòsit intern de recol·lecció d'aigua

Per una banda porta soldats al seu eix de simetria en quan a l'amplada es refereix, dos espàrrecs de les mateixes característiques que els anteriorment descrits que serviran també d'anclatge amb les cèl·lules de càrrega i aniran en concordança amb els del dipòsit extern. Es trobaran a 86 mm de cada extrem en la llargada i amb una distància de 288 mm entre ells.

D'altra banda, aquest segon dipòsit també contarà amb una obertura dissenyada per la mateixa raó que en el dipòsit anterior. Es trobarà centrada a un dels dos costats de l'amplada, en la seva màxima altura, i serà també de 110 mm de llargada i de 74 mm d'alçada. Respondrà a la mateixa necessitat que en l'anterior dipòsit, que serà la de donar entrada a l'aigua dins del seu interior mitjançant la mateixa rampa prèviament esmentada. La imatge següent ensenya en vista 3D el que s'acaba de descriure.

FIGURA 32: vista 3D del dipòsit intern del sistema de recepció de l'aigua



Ja per concloure es va dissenyar la rampa d'unió entre el francbord del dic en talús i la resta del sistema que conforma el dipòsit. Es tracta d'una rampa també d'acer inoxidable que farà 425 mm de llarg i 100 mm d'amplada ( quedarà encaixada amb 5 mil·límetres de marge en les tres cavitats que s'han descrit anteriorment, la del dic en talús i les dels respectius dipòsits ).

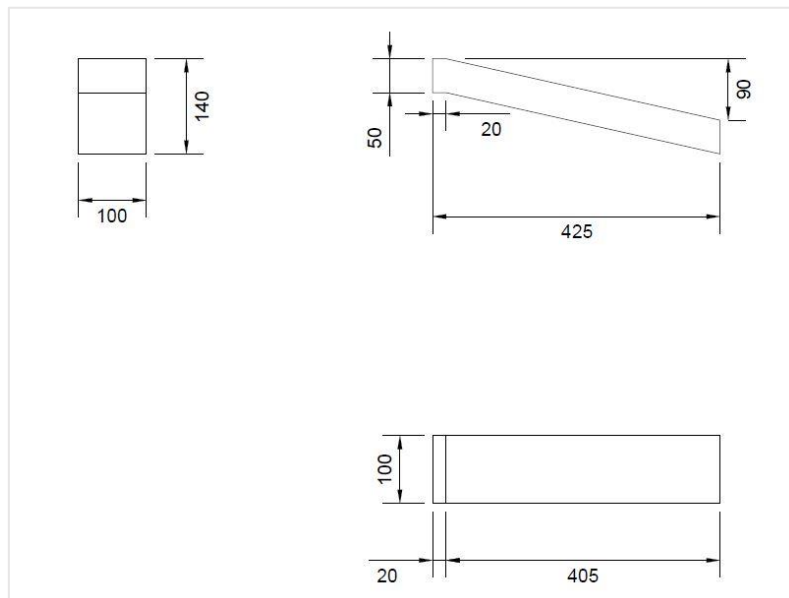
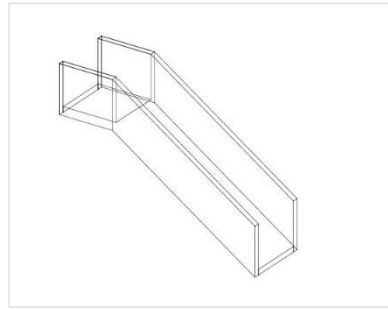


FIGURA 33: disseny de la cunya d'unió entre l'estructura i el sistema de recepció d'aigua

Començarà amb 20 mm en pla per a poder recolzar sense inestabilitat sobre el dic en talús, i després tindrà una caiguda al llarg de la seva llargada de 9cm, ja que si la pendent fos inferior, ens podríem trobar amb problemes amb la tensió superficial de l'aigua i podríem tenir pèrdues de volum al final dels assajos.

FIGURA 34: vista 3D cunya unió sistema



Per tant, i per resumir el disseny del sistema, es tracta d'una estructura de plàstic que fa de dic i que és el que està exposat a les onades. Tota l'aigua que sobrepassa l'estructura pels 10 cm centrals és canalitzada per una rampa fins al sistema conformat per les dues caixes i la planxa, i a la cavitat seca que queda entre les dues hi van col·locades unes cèl·lules de càrrega ( ANNEX 2) que són les encarregades de pesar i saber el volum exacte d'aigua que obtenim després de cada assaig. Al només tenir una obertura d'entrada a l'aigua de 10cm, ens serà molt fàcil després calcular el cabal lineal d'entrada d'aigua per metre d'estructura, que és el que realment ens donarà la informació valuosa que necessitem. A continuació es mostra una foto del sistema ja en funcionament durant la realització d'un dels assaigs.

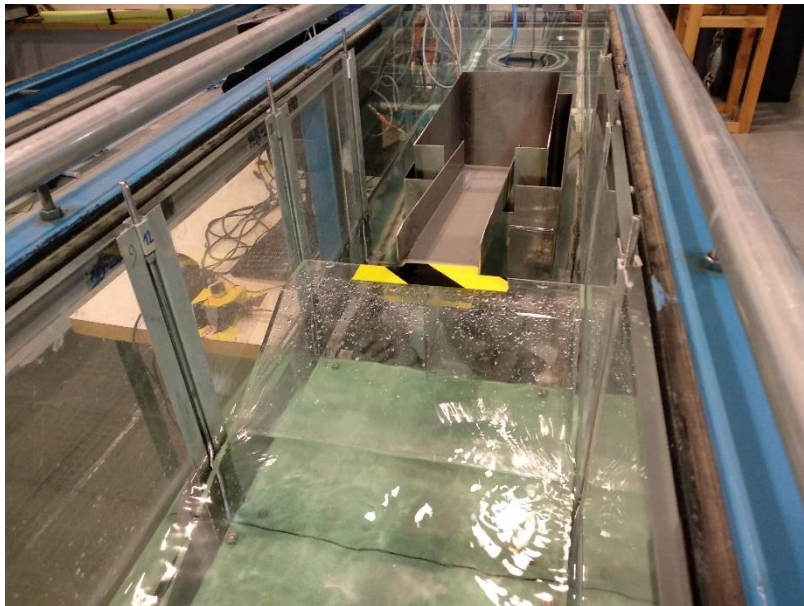


FIGURA 35foto frontal del Sistema final en funcionament





FIGURA 36: foto en planta del Sistema final funcionant

## 4.2.6 REALITZACIÓ ASSAJOS

### 4.2.6.1 PROCEDIMENTS A SEGUIR EN LA REALITZACIÓ D'ASSAJOS

Una vegada muntat el sistema dins del canal CIEMito, es poden començar a fer els assajos.

Seguidament s'explicarà el procediment seguit per a realitzar els assajos:

#### Abans de l'assaig:

- S'ha de fixar el nivell d'aigua del canal en 300mm
- S'han de calibrar els sensors d'alçada d'ona per a assegurar una correcta presa de dades.
- S'han d'activar les cèl·lules de càrrega per a poder comptabilitzar el volum d'aigua que sobrepassa l'estructura
- S'han d'introduir les dades de la tempesta al programa de generació d'onades CIEMGEN de cada assaig en singular (imatge XXX ensenyada més endavant), que és l'encarregat de transmetre la informació al motor de generació d'onades del canal.

#### Durant l'assaig:

- Comprovar que no hi hagi cap problema i que les dades s'estiguin enregistrant correctament.

#### Després de l'assaig:

- Aturar els enregistradors de dades (tant les cèl·lules de càrrega com els sensors encarregats d'enregistrar alçades d'ona)
- Comprovar si hi ha ultrapassament i anotar-ho per després analitzar o no l'assaig.
- Tornar a introduir les següents dades de la tempesta al programa de generació CIEMGEN i realitzar un nou assaig.

Seguidament es farà un petit resum del funcionament del programa de generació d'onades CIEMGEN, que és el que serà l'encarregat de passar la informació de la tempesta al carro de generació d'onades del canal:

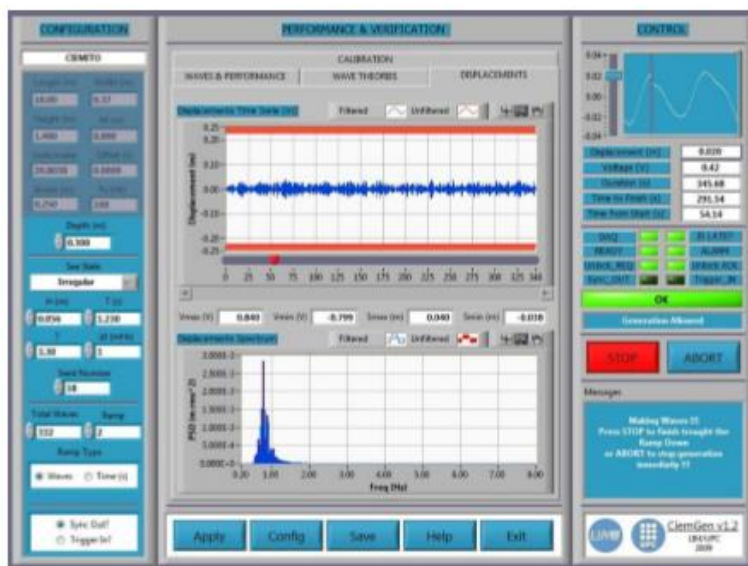


FIGURA 37: foto de l'interfície del programa CIEMGEN

A l'anterior imatge es pot veure l'interfície del programa CIEMGEN. És un programa de molt fàcil utilització. Amb una simple introducció dels paràmetres que a continuació es descriuran, el programa genera la sèrie d'onades irregulars teòriques i envia les dades al pistó que les generarà. Es necessitarà convertir les dades de la tempesta a dades InPut del programa, ja que hi ha pèrdues d'energia i el que realment s'introdueix al programa no serà les alçades reals que produirà el carro generador. Seguidament s'enumeren els paràmetres necessaris per a la generació:

- Caràcter de la sèrie d'onades: s'ha de triar si es regular o irregular ( a la tesina actual sempre es tria de caràcter irregular )
- Alçada d'ona InPut ( m )
- Període pic ( s )
- Número total d'onades de l'assaig
- Caracterització de l'espectre d'onades: son les variables usades per a la correcta creació de l'espectre d'onades. En la present tesina seran les de JONSWAP.
- Número SEEDING en la generació d'onades: és aquell número el qual marcarà, dins la mateixa sèrie irregular d'onades, en quin punt es comença i la direcció que seguirà la primera onada.

## 4.2.6.2 ASSAJOS

Es va decidir realitzar 3 sets de cada tempesta en total ( Tempesta real, Tempesta Triangular, Tempesta Trapezoidal i Metodologia Clàssica ) per a poder comptar amb 12 tempestes completes després a l'hora de poder analitzar els resultats.

El primer assaig que es va realitzar se'l va anomenar Assaig Tempesta Real SET 0 i va ser per a comprovar a partir de quins valors es començava a tenir ultrapassament i així poder acotar més el número d'assajos realitzats en cada tempesta. Com anteriorment ja s'ha dit, es menystindran els valors d'alçada d'ona per sota de 3,5 m ( 0,0435m en les dades ja convertides amb les similituds de Freud ).

- **ASSAIG TEMPESTA REAL**

Les dades introduïdes a l'ordinador per a realitzar els assajos relatius a la tempesta real són les següents. En cada set d'assajos anirem incrementant els "SEEDING NUMBER", passant pels números 1, 2 i 3 depenent del número de set respectivament:

TORMENTA REAL		
Hs INPUT ( m )	Tp INPUT	N. ONADES
0,052	1,446	271
0,049	1,107	360
0,061	1,302	305
0,054	1,107	360
0,054	1,162	343
0,055	1,551	252
0,059	1,551	252
0,054	1,302	305
0,06	1,551	252
0,06	1,225	324
0,059	1,179	343
0,053	1,302	305
0,055	1,162	343
0,053	1,379	288
0,053	1,162	343
0,051	1,302	302

Taula 6: dades tempesta real a introduir al programa generador d'onades

### ASSAIG TEMPESTA TRIANGULAR

Les dades introduïdes a l'ordinador per a realitzar els assajos relatius a la tempesta triangular són les següents. En cada set d'assajos anirem incrementant els "SEEDING NUMBER", passant pels números 1, 2 i 3 depenent del número de set respectivament:

TEMPESTA TRIANGULAR		
Hs INPUT (m)	Tp INPUT	N. ONADES
0,046	1,14	352
0,048	1,16	347
0,049	1,18	341
0,051	1,2	335
0,052	1,22	330
0,054	1,24	324
0,054	1,26	319
0,056	1,28	314
0,059	1,3	309
0,061	1,32	302
0,059	1,3	309
0,056	1,28	314
0,054	1,26	319
0,054	1,24	324
0,052	1,22	330
0,051	1,2	335
0,049	1,18	341
0,048	1,16	347
0,046	1,14	352
0,045	1,12	357

Taula 7: dades tempesta triangular a introduir al programa generador d'onades

- **ASSAIG TEMPESTA TRAPEZOIDAL**

Les dades introduïdes a l'ordinador per a realitzar els assajos relatius a la tempesta trapezoidal són les següents. En cada set d'assajos anirem incrementant els "SEEDING NUMBER", passant pels números 1, 2 i 3 depenent del número de set respectivament:

TEMPESTA TRAPEZOIDAL		
Hs INPUT	Tp INPUT	N. ONADES
0,045	1,11	362
0,047	1,15	351
0,05	1,18	341
0,052	1,22	330
0,054	1,25	321
0,057	1,29	313
0,061	1,32	305
0,061	1,32	305
0,061	1,32	305
0,061	1,32	305
0,061	1,32	305
0,057	1,29	313
0,054	1,25	321
0,052	1,22	330
0,05	1,18	341
0,047	1,15	351
0,045	1,11	362

Taula 8: dades tempesta trapezoidal a introduir al programa generador d'onades

- **ASSAIG METODOLOGIA CLÀSSICA**

Normalment als assajos generats a partir de la metodologia clàssica proposada per Owen i Allsop ( 1984 ) s'ha de treballar generant sets de 1000 onades i incrementant l'alçada d'ona del 60% al 120% en increments d'un 20%. A la tesina actual s'ha introduït un petit canvi ja que es va estimar que era més interessant veure la variabilitat del cabal que sobreexia l'estructura a l'incrementar el número d'onades més que variant únicament les alçades d'ona.

És per això que es generaran sets de 1000, 3000, 5000 i 3x333 onades i es compararan les dades entre si per veure com afecta l'increment del número d'onades respecte al volum sobrepassat.

Les dades introduïdes a l'ordinador per a realitzar els assajos relatius a l'assaig basat en la metodologia clàssica són les següents. En cada set d'assajos anirem incrementant els "SEEDING NUMBER", passant pels números 1, 2 i 3 depenent del número de set respectivament ( comptarem amb 9 assajos de 333 onades, els quals portaran assignats entre si els valors de l'1 al 9 en quant a "SEEDING NUMBER" es refereix ):

METODOLOGIA CLÀSSICA		
Hs INPUT	Tp INPUT	N WAVES
6,1	1,32	1000
6,1	1,32	3000
6,1	1,32	5000
6,1	1,32	333
6,1	1,32	333
6,1	1,32	333

*Taula 9: dades tempesta a estdia mitjançant la metodologia clàssica a*

*introduir al programa generador d'onades*

#### 4.2.7 PROGRAMACIÓ EN MATLAB PER AL PROCESSAMENT DE DADES

Per començar a analitzar les dades obtingudes dins les sèries d'assajos realitzats, el que es fa és dissenyar un programa en Matlab per a poder obtenir l'alçada d'ona característica de cada part de tempesta, els seu període mig i el volum total d'aigua sobrepassada per a poder calcular després fàcilment el cabal per metre lineal que haurà sobreexigit.

Cada assaig realitzat al Canal d'estudi ens retornarà, per una banda, una sèrie temporal d'onades captada per cadascun dels sensors que tenim disposats al llarg del canal i per altra banda l'acumulació total d'aigua que hi haurà al final del sistema ja explicat, pesada per les cèl·lules de càrrega.

Aquest programa comptarà amb dos parts principals; la primera, d'on s'extrauran les alçades d'ona significants i els seus períodes mitjos i per altra, els càlculs dels volums.

Per a calcular les alçades d'ona i els períodes, el primer pas a seguir serà centrar la sèrie temporal a analitzar, menystenir els valors extrems i generar una segona sèrie temporal més acotada.

Una vegada es té la nova sèrie temporal, el següent pas que farà serà agafar cada sèrie d'onades i dividir-les en onades singulars ( exemple figura següent corresponent al tercera sèrie d'assajos de la tempesta Trapezoidal). Per a programar això es farà servir la funció de Matlab "down zero-crossing" és a dir, s'agafarà cada punt on la sèrie temporal analitzada creui l'eix de les abscisses amb pendent negativa. Aquest mètode funciona millor amb pendents negatius i no amb positius ja que així es pot estar segur que mai s'agafarà una onada a mitges ( la generació sempre comença amb pendent positiu ).

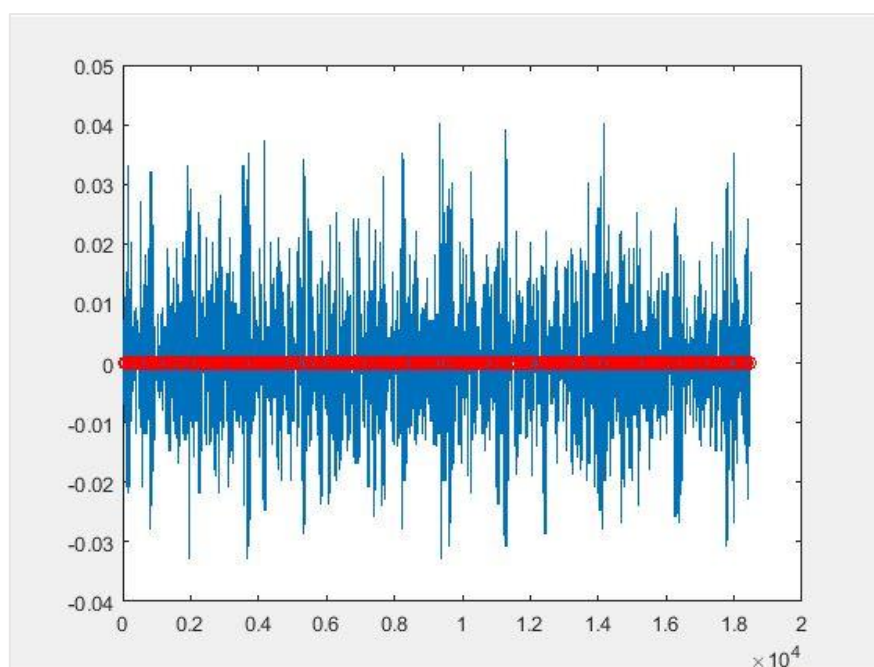


FIGURA 38: exemple de sèrie temporal generada pel programa de MATLAB

Una vegada es tinguin les onades separades una a una, s'agafarà el temps que hi ha entre cada zero considerat i es trobarà el període de cada onada singular ( exemple figura següent de la mateixa sèrie temporal de la tempesta Trapezoidal ). Fent la mitja de tots aquest temps, s'extraurà el període mig de la sèrie (  $T_m$  ).

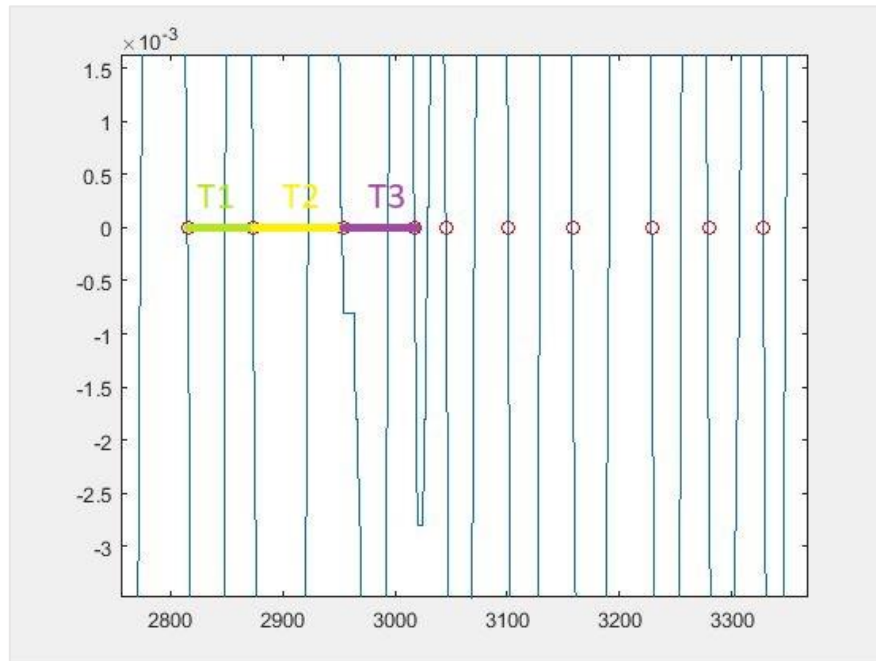


FIGURA 39: ampliació de la mateixa sèrie temporal que a la figura 38 amb detall del zero-crossing

Seguidament a obtenir els períodes mitjos, i ja separades cada onada entre si, s'introduirà al programa una altra funció que el que farà serà agafar el màxim i el mínim de cada onada, en farà la resta i s'obtindrà així l'alçada de cada onada singular. Per a poder comparar cada sèrie temporal amb la següent, es necessitarà alguna cosa representativa d'aquestes sèrie d'onades, i com bé s'ha explicat anteriorment, el que serà necessari calcular serà l'alçada d'ona significant de la sèrie. Per tant, el que farà el programa serà ordenar les onades respecte la seva alçada d'ona, de major a menor, i després extraurà la mitja del terç més gran, obtenint així l'alçada d'ona significant de cada petita part de la tempesta.

Si es fa aquest petit pas amb cada un dels petits assajos que pertanyen a la mateixa tempesta, i després es col·loquen les dades conjuntes, s'acaba arribant a un gràfic molt similar al de la tempesta real ( o la teòrica triangular, trapezoidal... ), però amb les alçades d'ona significativa ja generades.



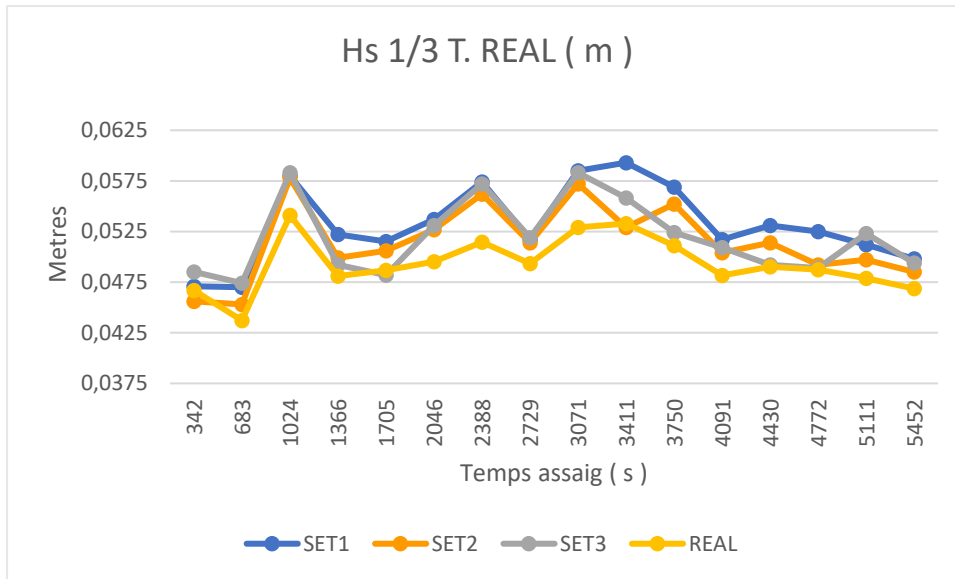


FIGURA 40: gràfica de comparació entre els sets de tempestes reals generats i la tempesta real

Per últim, s'agafarà el segon arxiu que ens ha retornat cada assaig i s'extraurà les dades del volum d'aigua sobrepassat en cadascun dels assaig realitzats. El sistema compta amb les dues cèl·lules de càrrega ja esmentades, per tant la única cosa que s'ha de fer és realitzar una mitja dels valors obtinguts per cadascuna i obtenir així el pes d'aigua ( i com a conseqüència el volum ) de cada assaig. Això ens servirà per a després poder calcular fàcilment el cabal per metre lineal ( Q ) constant que hem tingut al llarg de cada tempesta.

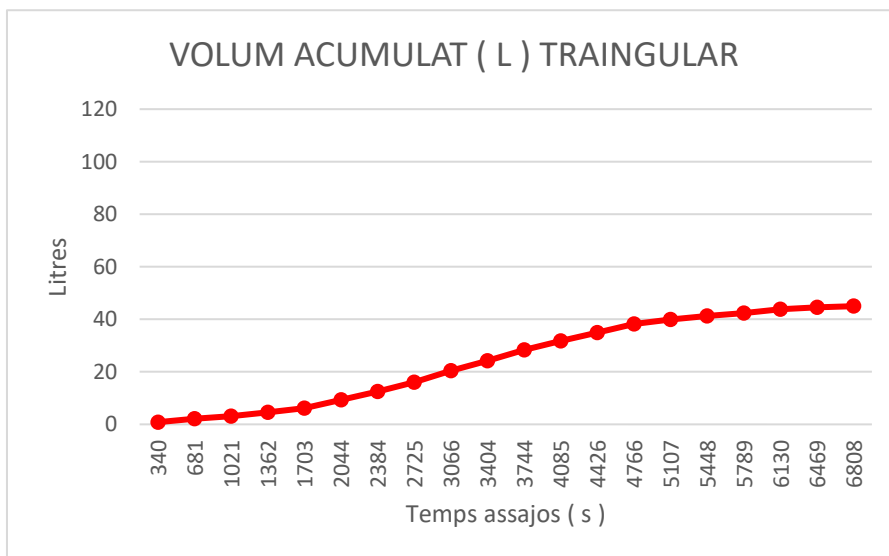


FIGURA 41: exemple de l'acumulació de volum al llarg d'una tempesta, en aquest cas triangular

## 5 OBTENCIÓ DE DADES A PARTIR DELS ASSAJOS REALITZATS

En aquest apartat simplement s'ensenyaran les dades obtingudes en cada assaig i per cada tempesta.

### 5.1 OBTENCIÓ DE DADES ASSAJOS TEMPESTA REAL

A continuació es poden veure les dades corresponents als assajos realitzats aplicant les dades de la tempesta real ( TAULA 6 ).

TEMPESTA REAL			TEMPESTA REAL		
SEED NBR 1	SEED NBR 1	SEED NBR 1	SEED NBR 2	SEED NBR 2	SEED NBR 2
Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)	Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
0,0471	1,155	0,000386247	0,0456	1,1526	0,0042692
0,047	0,9849	0,001699434	0,0453	0,9616	0,00369187
0,058	1,0954	0,007992854	0,0578	1,1086	0,01550537
0,0522	0,9916	0,004951801	0,0499	0,9556	0,0081104
0,0515	0,9985	0,006654077	0,0506	0,9929	0,0078226
0,0537	1,2218	0,012120857	0,0527	1,2251	0,01509252
0,0574	1,2323	0,021802904	0,0562	1,2505	0,02520787
0,0517	1,075	0,002858565	0,0514	1,0947	0,00565562
0,0585	1,2431	0,025035133	0,0572	1,256	0,02746516
0,0593	1,0545	0,011307898	0,0529	1,0361	0,0101213
0,0569	1,0084	0,011176453	0,0552	1,011	0,01465764
0,0517	1,074	0,003116305	0,0504	1,0839	0,00473889
0,0531	0,9955	0,01009177	0,0514	0,9899	0,00825637
0,0525	1,1481	0,007328405	0,0492	1,1276	0,00957543
0,0512	1,0023	0,006881289	0,0497	0,992	0,00563015
0,0498	1,0815	0,001818821	0,0485	1,0861	0,00345312

TEMPESTA REAL		
SEED NBR 3	SEED NBR 3	SEED NBR 3
Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
0,0485	1,2195	0,005354792
0,0474	0,9634	0,003715315
0,0583	1,0857	0,022575638
0,0492	0,9558	0,006038853
0,0482	0,974	0,004004249
0,0531	1,2406	0,021838037
0,0572	1,2746	0,034310224
0,0519	1,1034	0,007776118
0,0583	1,2687	0,037334583
0,0558	1,0237	0,013939554
0,0524	0,9806	0,008673424
0,0509	1,0736	0,007084908
0,0492	0,9942	0,003712119
0,0489	1,0942	0,010116004
0,0523	1,0212	0,014010446
0,0494	1,0758	0,005904578

Taula 10: resum de les dades obtingudes a l'assajar amb la tempesta real

A partir d'aquestes dades es poden extreure les següents gràfiques per a cada assaig. A continuació s'ensenyen les extretes de la primera sèrie ( Set1 ) generada amb la tempesta real.

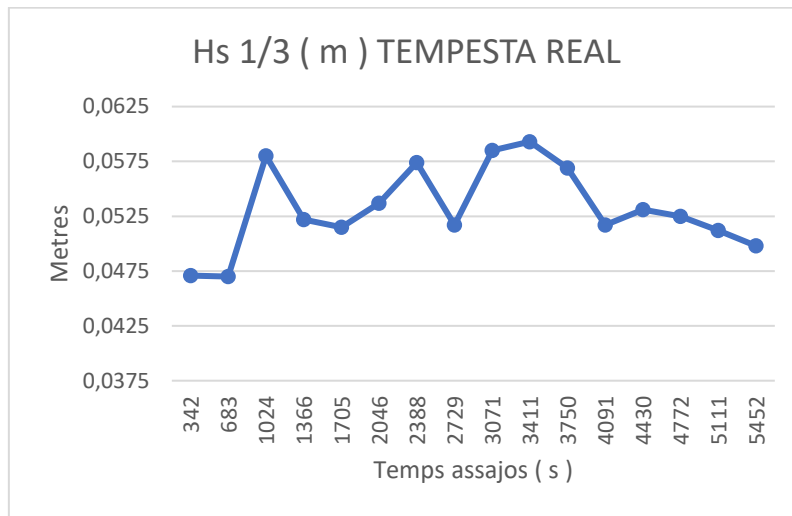


FIGURA 42: exemple de gràfica d'alçades d'ona significant generada al set 1 amb les dades de la tempesta real

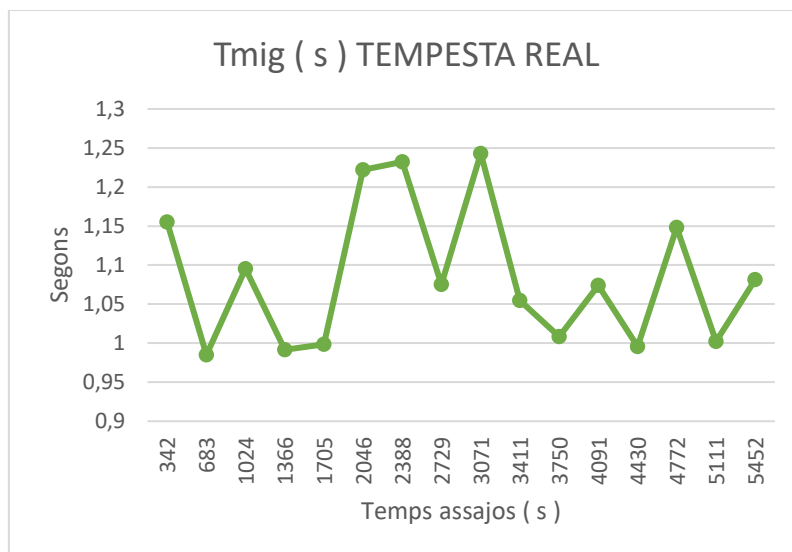


FIGURA 43: exemple de gràfica de períodes mitjos generada al set 1 amb les dades de la tempesta real

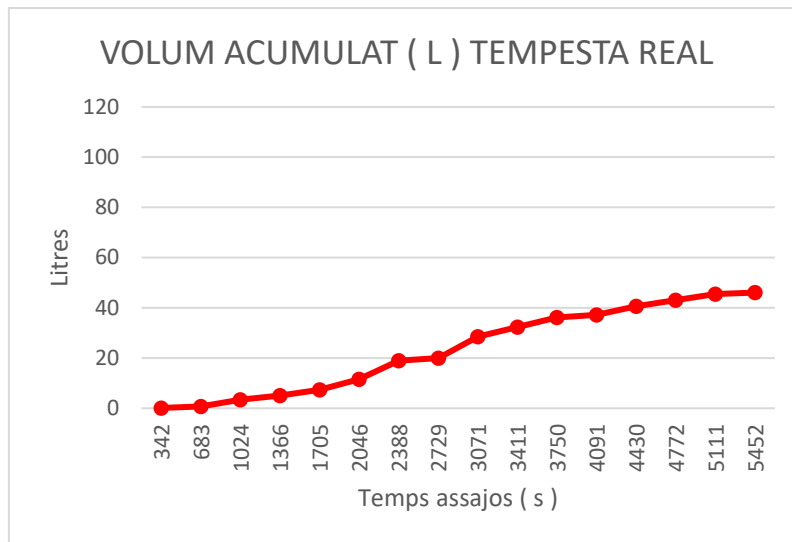


FIGURA 44: exemple de gràfica de volums generada al set 1 amb les dades de la tempesta real

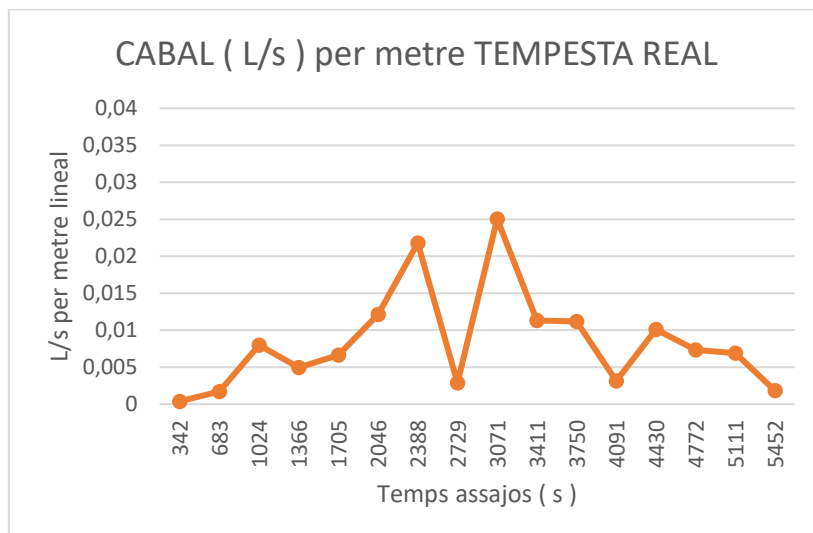


FIGURA 45: : exemple de gràfica cabals per metre generada al set 1 de les dades de la tempesta real

## 5.2 OBTENCIÓ DE DADES ASSAJOS TEMPESTA TRIANGULAR

A continuació es poden veure les dades corresponents als assajos realitzats aplicant les dades de la tempesta triangular ( TAULA 7 ).

TEMPESTA TRIANGULAR		
SEED NBR 1	SEED NBR 1	SEED NBR 1
Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
0,045	0,9966	0,002457762
0,0468	0,9853	0,003784767
0,0475	1,0017	0,003013586
0,0485	0,9959	0,004207899
0,0522	1,0571	0,004464835
0,0545	1,0437	0,009442829
0,0552	1,045	0,009418844
0,0569	1,1014	0,010157305
0,0576	1,0734	0,012911749
0,0567	1,0838	0,011342127
0,0574	1,0787	0,012086783
0,0563	1,0966	0,009984152
0,055	1,0452	0,009380687
0,0543	1,0331	0,009671924
0,0526	1,0494	0,004860602
0,0488	0,9929	0,003984731
0,0477	0,9941	0,003160304
0,0467	0,9885	0,004353949
0,0446	0,9865	0,002331194
0,0387	0,9334	0,001128608

TEMPESTA TRIANGULAR		
SEED NBR 2	SEED NBR 2	SEED NBR 2
Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
0,0413	0,9482	0,001286278
0,0434	0,9751	0,001775026
0,0467	1,0118	0,005900995
0,0504	0,9989	0,004592571
0,0482	1,0073	0,002846589
0,0481	1,0336	0,004103152
0,05	1,024	0,006181391
0,0537	1,0489	0,012355462
0,0542	1,0872	0,012177793
0,0579	1,0824	0,015757719
0,0546	1,0852	0,013246433
0,0539	1,0501	0,012361331
0,0506	1,0288	0,006237159
0,0484	1,0245	0,003824125
0,0488	1,0154	0,002952127
0,0501	1,0059	0,004419322
0,0469	1,0088	0,003486018
0,0435	0,9648	0,002100692
0,0414	0,9451	0,001439336
0,0418	0,9464	0,00201495

TEMPESTA TRIANGULAR		
SEED NBR 3	SEED NBR 3	SEED NBR 3
Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
0,0416	0,9773	0,001368694
0,0428	0,9818	0,003544185
0,0471	0,986	0,00450424
0,0504	1,0297	0,006445456
0,0512	1,0233	0,005766468
0,0493	1,0167	0,004537845
0,0491	1,0355	0,006084532
0,0521	1,0675	0,00980513
0,0566	1,0501	0,016105924
0,0586	1,0919	0,023740092
0,0557	1,0493	0,016299689
0,0518	1,0526	0,009341433
0,0496	1,0406	0,006178456
0,0499	1,0206	0,005028343
0,0515	1,0369	0,004365161
0,0498	1,0275	0,004522097
0,0464	0,9897	0,002635054
0,043	0,9857	0,00243516
0,0419	0,9879	0,00145994
0,0414	0,9464	0,001574733

Taula 11: resum de les dades obtingudes a l'assajar amb la tempesta triangular

A partir d'aquestes dades es poden extreure les següents gràfiques per a cada assaig. A continuació s'ensenyen les extretes de la primera sèrie generada (Set1) amb la tempesta triangular.

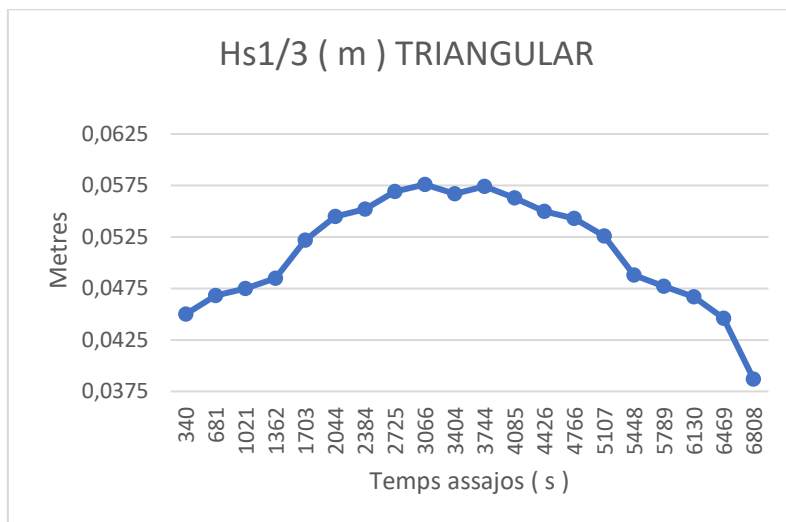


FIGURA 46: exemple de gràfica d'alçada d'ona significants generada al set 1 amb les dades de la tempesta triangular

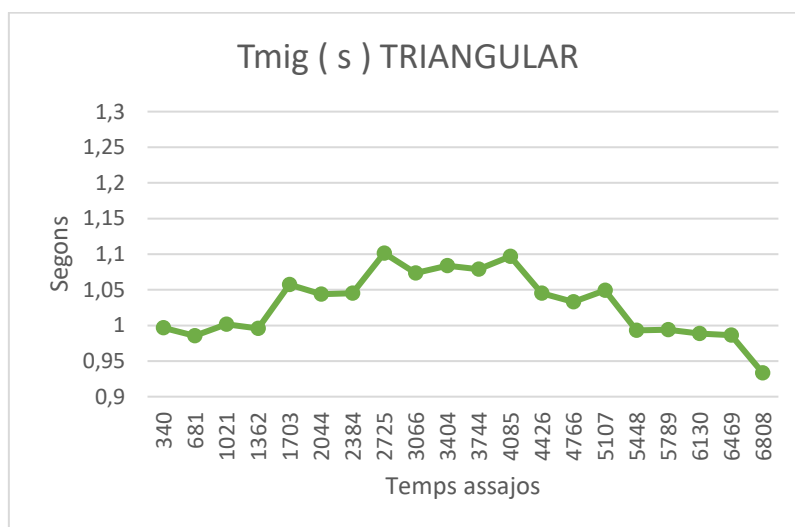


FIGURA 47: exemple de gràfica de períodes mitjos generada al set 1 amb les dades de la tempesta triangular

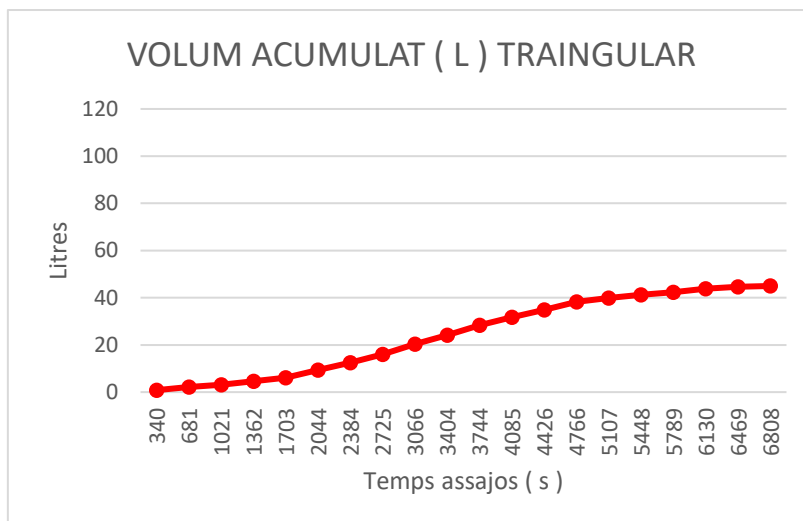


FIGURA 48: exemple de gràfica del volums acumulat generada al set 1 amb les dades de la tempesta triangular

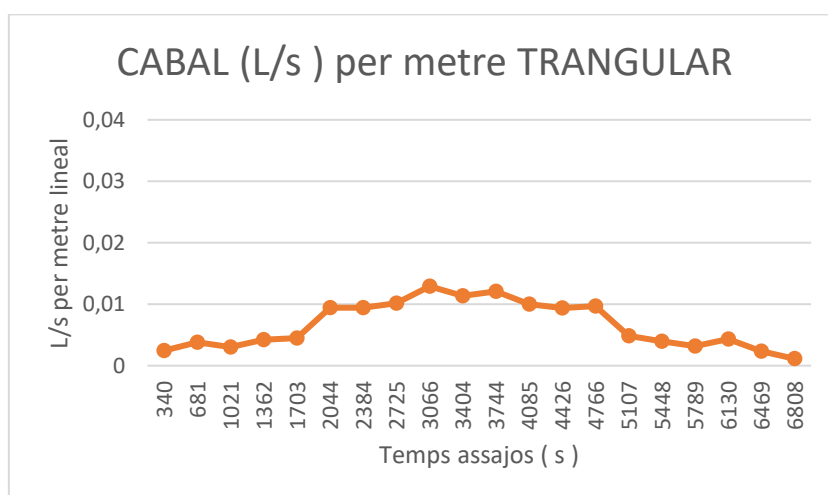


FIGURA 49: exemple de gràfica d'alçada de cabal per metre generada al set 1 amb les dades de la tempesta triangular



### 5.3 OBTENCIÓ DE DADES ASSAJOS TEMPESTA TRAPEZOIDAL

A continuació es poden veure les dades corresponents als assajos realitzats aplicant les dades de la tempesta trapezoidal ( TAULA 8 ).

TEMPESTA TRAPEZOIDAL		
SEED NBR 1	SEED NBR 1	SEED NBR 1
Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
0,044	0,9915	0,00133792
0,0461	0,9984	0,004953914
0,0491	1,005	0,004803545
0,0531	1,0615	0,005273959
0,0553	1,0564	0,013684613
0,0571	1,0501	0,009502804
0,0569	1,0916	0,013235509
0,0577	1,092	0,013018774
0,0573	1,0948	0,012743461
0,0574	1,0948	0,012386141
0,0572	1,0948	0,01243886
0,0571	1,0561	0,008822155
0,0555	1,0492	0,013678732
0,0531	1,0613	0,006138782
0,0492	1,0139	0,004932656
0,0467	1,0012	0,005111924
0,0446	0,9893	0,001487885

TEMPESTA TRAPEZOIDAL		
SEED NBR 2	SEED NBR 2	SEED NBR 2
Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
0,0412	0,9371	0,002043637
0,0426	0,9564	0,001392831
0,0477	1,0169	0,004935591
0,0479	1,0158	0,003192519
0,0486	1,0411	0,004766385
0,0534	1,0344	0,011845642
0,0582	1,0825	0,01762001
0,0586	1,104	0,017019594
0,0584	1,0948	0,017669801
0,0583	1,0792	0,017584864
0,0583	1,0906	0,016808716
0,0573	1,0399	0,01078523
0,0481	1,0361	0,003728425
0,0487	1,0265	0,002972648
0,0479	1,0191	0,00434285
0,0426	0,9398	0,002797366
0,0412	0,9371	0,00163785

TEMPESTA TRAPEZOIDAL		
SEED NBR 3	SEED NBR 3	SEED NBR 3
Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
0,0432	0,9663	0,00127323
0,0421	0,9922	0,001442575
0,0437	0,9832	0,003248335
0,0512	1,0217	0,004294802
0,0487	1,0433	0,005298597
0,0524	1,034	0,01477857
0,0588	1,086	0,022760156
0,0589	1,099	0,022915385
0,0588	1,1005	0,022760156
0,0588	1,0938	0,022616642
0,0588	1,0883	0,02195472
0,0527	1,0562	0,013794111
0,0482	1,0242	0,003372637
0,0523	1,0437	0,003676233
0,0469	0,9371	0,002508876
0,0424	0,9992	0,001000732
0,0435	0,954	0,001534933

Taula 12: resum de les dades obtingudes a l'assajar amb la tempesta trapezoidal

A partir d'aquestes dades es poden extreure les següents gràfiques per a cada assaig. A continuació s'ensenyen les extreïtes de la primera sèrie generada( Set1) amb la tempesta trapezoidal.

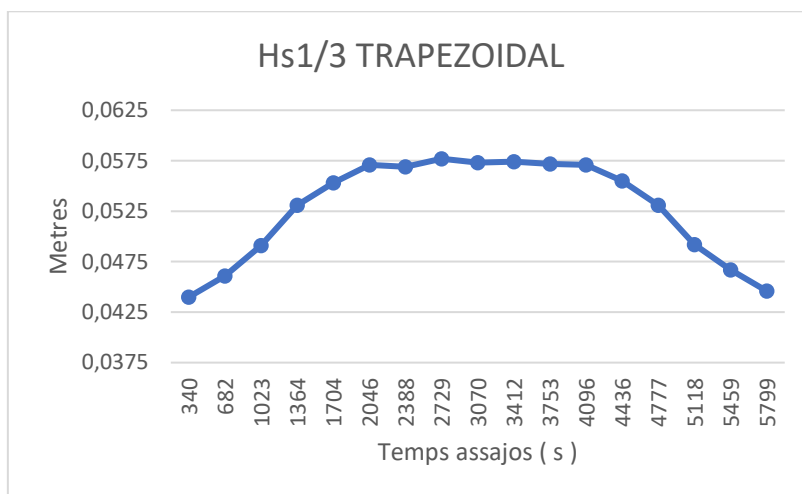


FIGURA 50: exemple de gràfica d'alçada d'ona significants generada al set 1 amb les dades de la tempesta trapezoidal

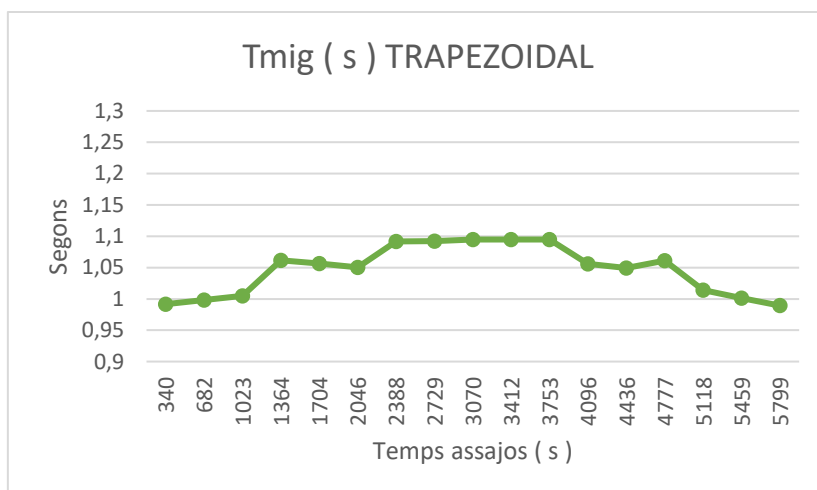


FIGURA 51: exemple de gràfica d'alçada de cabals mitjos generada al set 1 amb les dades de la tempesta trapezoidal

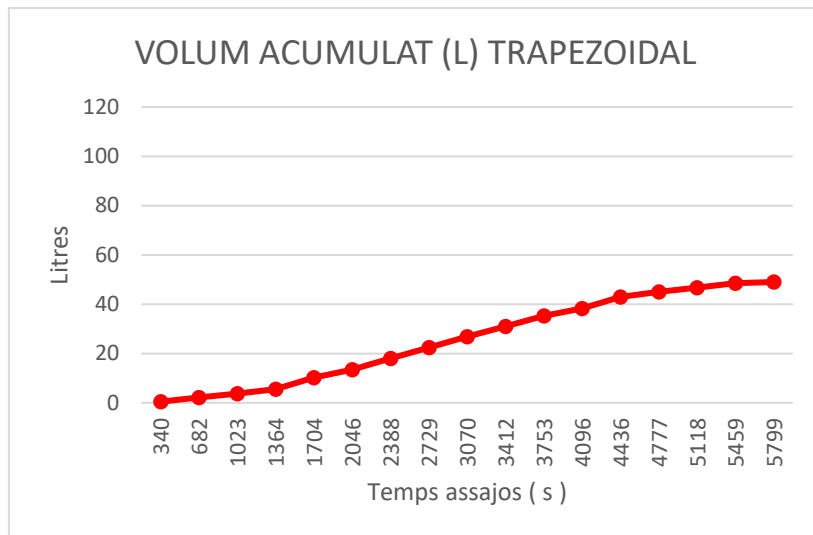


FIGURA 52: exemple de gràfica de volums acumulats generada al set 1 amb les dades de la tempesta trapezoidal

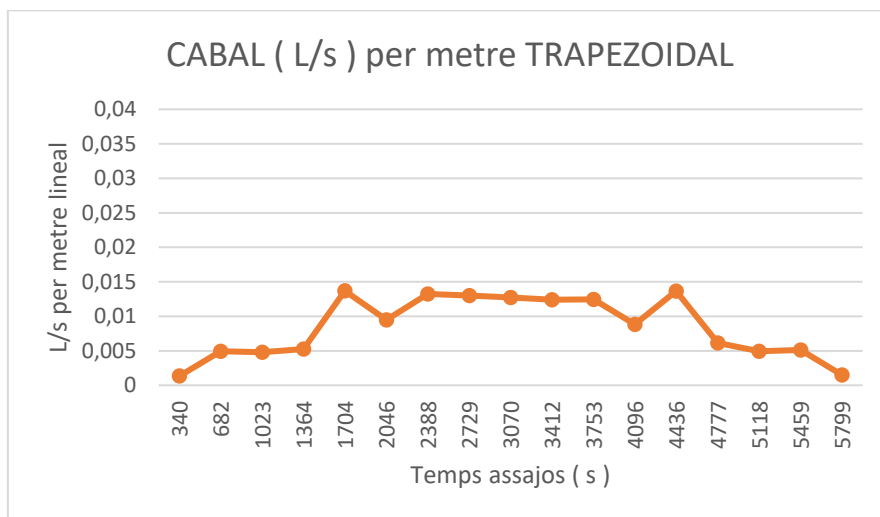


FIGURA 53: exemple de gràfica de cabals per metre generada al set 1 amb les dades de la tempesta trapezoidal

## 5.4 OBTENCIÓ DE DADES ASSAJOS METODOLOGIA CLÀSSICA

A continuació es poden veure les dades corresponents als assajos realitzats aplicant les dades de la metodologia clàssica ( TAULA 9 ).

METODOLOGIA CLASSICA			
	SEED NBR 1	SEED NBR 1	SEED NBR 1
Onades	Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
1000	0,056	1,0626	0,008408974
3000	0,0566	1,049	0,009613183
5000	0,0563	1,0537	0,013574348
333/SEED 1	0,0589	1,0782	0,011338185
333/SEED 2	0,0569	1,0609	0,013242205
333/SEED 3	0,0587	1,0972	0,012184118

METODOLOGIA CLASSICA			
	SEED NBR 2	SEED NBR 2	SEED NBR 2
Onades	Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
1000	0,057	1,0627	0,014633003
3000	0,0564	1,0615	0,015811894
5000	0,0561	1,0574	0,014085253
333/SEED 4	0,0585	1,0632	0,016905229
333/SEED 5	0,0551	1,0733	0,012449983
333/SEED 6	0,0586	1,0762	0,020672987

METODOLOGIA CLASSICA			
	SEED NBR 3	SEED NBR 3	SEED NBR 3
Onades	Hs 1/3 ( m )	Tm ( s )	Q ( L/s x metre)
1000	0,057	1,0745	0,020811062
3000	0,0577	1,0739	0,014063084
5000	0,0574	1,0707	0,020510363
333/SEED 7	0,059	1,1068	0,026546177
333/SEED 8	0,0555	1,0717	0,025402154
333/SEED 9	0,0571	1,1284	0,024451486

Taula 13: resum de les dades obtingudes a l'assajar amb la metodologia clàssica

A partir d'aquestes dades es poden extreure les següents gràfiques per a cada assaig. A continuació s'ensenyen les extreïtes de la primera sèrie generada amb la metodologia clàssica.

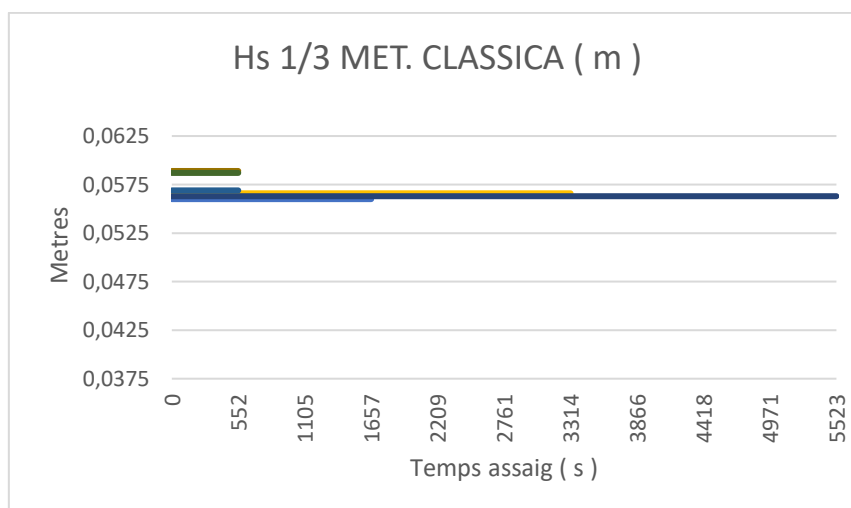


FIGURA 54: exemple de gràfica d'alçada d'ona significant generada al set 1 assajant amb la metodologia clàssica

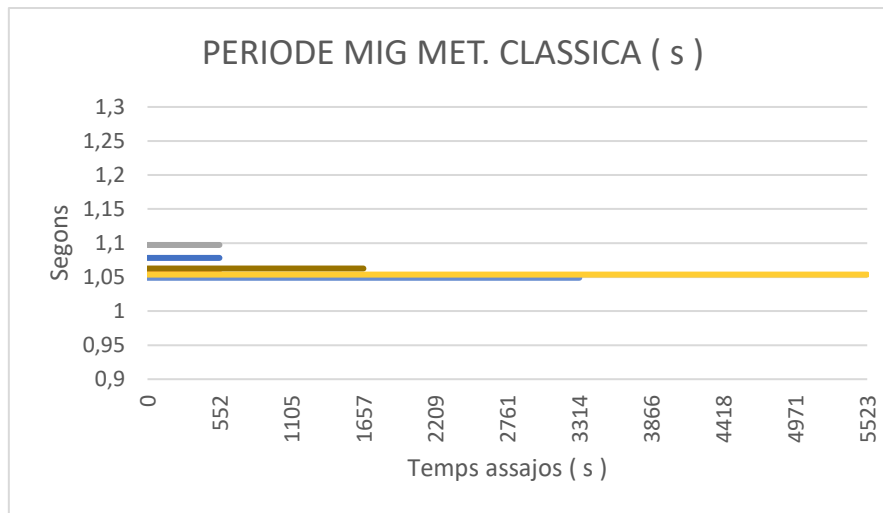


FIGURA 55: exemple de gràfica de períodes mitjos generada al set 1 assajant amb la metodologia clàssica

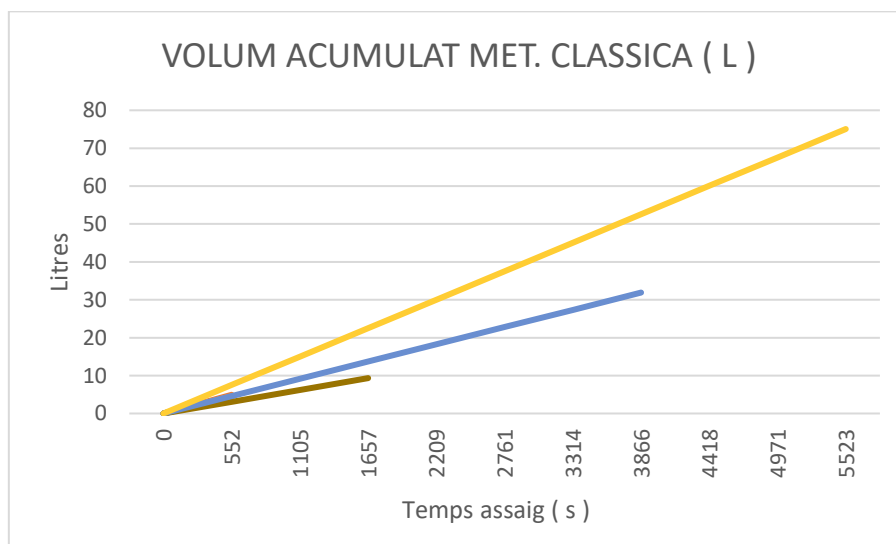


FIGURA 56: exemple de gràfica de volums acumulats generada al set 1 assajant amb la metodologia clàssica

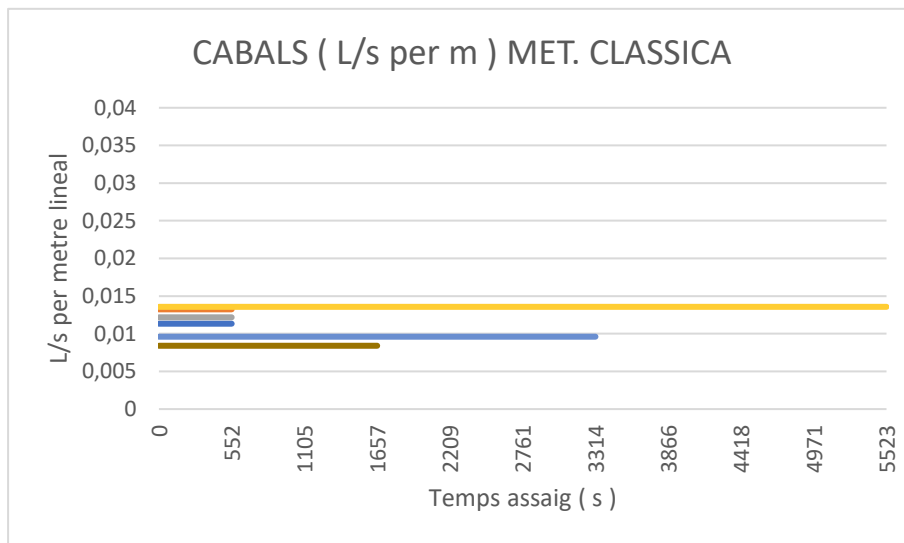


FIGURA 57: exemple de gràfica de cabals oer metre generada al set 1 assajant amb la metodologia clàssica

## 6 ANÀLISI I COMPARACIÓ DELS RESULTATS

En aquest apartat es procedirà a fer un anàlisi i la posterior comparativa dels resultats obtinguts ja classificats. L'anàlisi es centrarà en els 4 paràmetres que s'han obtingut, centrant-se més en les alçades d'ona, els períodes mitjos i els cabals per metre lineal, ja que en definitiva l'obtenció del volum no deixa de ser un simple tràmit per aconseguir després el cabal per metre lineal d'aigua sobrepassada.

Es classificarà l'anàlisi en dos fases diferents. En la primera s'estudiarà la semblança de les dades enregistrades d'alçada d'ona significant i períodes mitjos associats. Aquests dos paràmetres obtinguts parlaran de la semblança dels models obtinguts amb les dades reals de que disposem. Una vegada obtingudes les primeres conclusions sobre aquesta possible semblança, s'entrarà a l'anàlisi dels volums i cabals per metre lineal obtinguts, ja coneixent la rigurositat amb la qual compta l'estudi.

Sent així, s'analitzaran per una banda les alçades d'ona enregistrades i els períodes mitjos vinculats a aquestes onades i per altra banda el volum i el cabal d'aigua associat per metre lineal que ha sobrepassat l'estructura.

Les gràfiques que s'analitzaran seran una superposició de les gràfiques esmentades en l'apartat anterior ( capítol 5 ).

FORMULES UTILITZADES PER CALCULAR L'ERROR I LA DESVIACIÓ TÍPICA DE LES MOSTRES:

### ERROR

Per calcular l'error es farà una simple diferència, en valor absolut, entre les dades real que es tenen ( o teòriques en el cas de les tempestes trapezoidal i triangular ) i els valors enregistrats al canal.

$$Error = |Hs_{real} - Hs_{generada}|$$

### DESVIACIÓ TÍPICA

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

## 6.1 ANÀLISI I COMPARACIÓ DE RESULTATS EN QUANT A LA RIGUROSITAT DE L'ASSAIG

### 6.1.1 ANALISI I COMPARACIÓ DE RESULTATS A PARTIR DE LES ALÇADES D'ONA SIGNIFICANT

En totes les gràfiques que a continuació s'analitzaran per a la seva posterior comparació es representaran, per una banda, les alçades d'ona significant dels 3 sets generats per a cada tempesta. A la mateixa gràfica també es veurà dibuixada la representació de les alçades d'ona significants reals ( en el cas de la tempesta real ) o teòriques ( en els casos de les tempestes triangular i trapezoidal ). Per altra banda s'analitzaran també les gràfiques generades a partir dels errors que cada sèrie té respecte a les dades reals de les quals s'han extret les tempestes a generar ( excepte per a la Metodologia Clàssica ). Es crearà una gràfica on es representarà l'error de cada alçada d'ona en singular i l'error mig de cada sèrie d'onades, d'on després es podrà extreure la desviació típica de cada assaig i l'error màxim assolit. Els valors d'error es generaran fent el valor absolut de la diferència entre cada valor d'ona significant i el seu valor associat d'alçada d'ona real ( Tempesta Real ) o teòric ( tempestes Triangular i Trapezoidal ).

#### ALÇADES D'ONA SIGNIFICANT TEMPESTA REAL

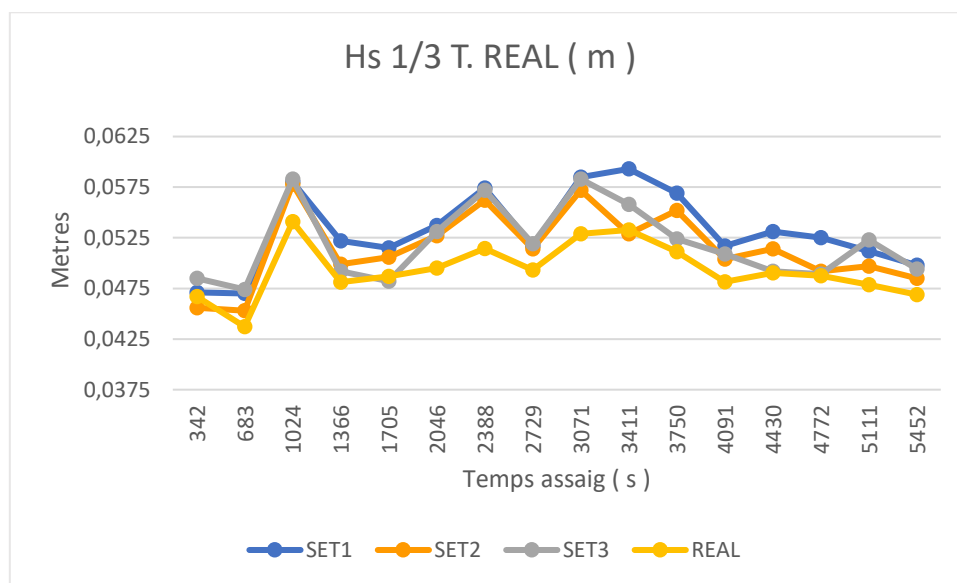


FIGURA 58: comparació de les alçades d'ona generades als 3 sets amb l'alçada d'ona real de la tempesta real

De la gràfica d'alçades d'ona significatives relatives a la tempesta real, es pot extreure que l'alçada d'ona pic forma part del primer set d'onades, està situada al segon pic de la tempesta i pren un valor de 0,0593m. Aquesta alçada d'ona no correspon amb l'alçada màxima d'ona que té la tempesta real, que es troba situada en el primer pic de la tempesta. D'altra banda es pot apreciar també que les alçades d'ona generades estan en pràcticament tot el transcurs dels assajos per sobre de les alçades d'ona reals que té el seu pic, com sempre a 0,54m. Es pot veure també que la variabilitat dependent del "Seeding Number" en aquest cas és molt baixa. Les



onades generades en els 3 sets retornen unes gràfiques pràcticament iguals, a excepció potser del set número 1, que a la segona meitat de la sèrie potser varia més en relació a les altres dues però es manté més fidel a la forma de la gràfica de les dades reals.

**ERRORS ALÇADES D'ONA SIGNIFICANT TEMPESTA REAL**

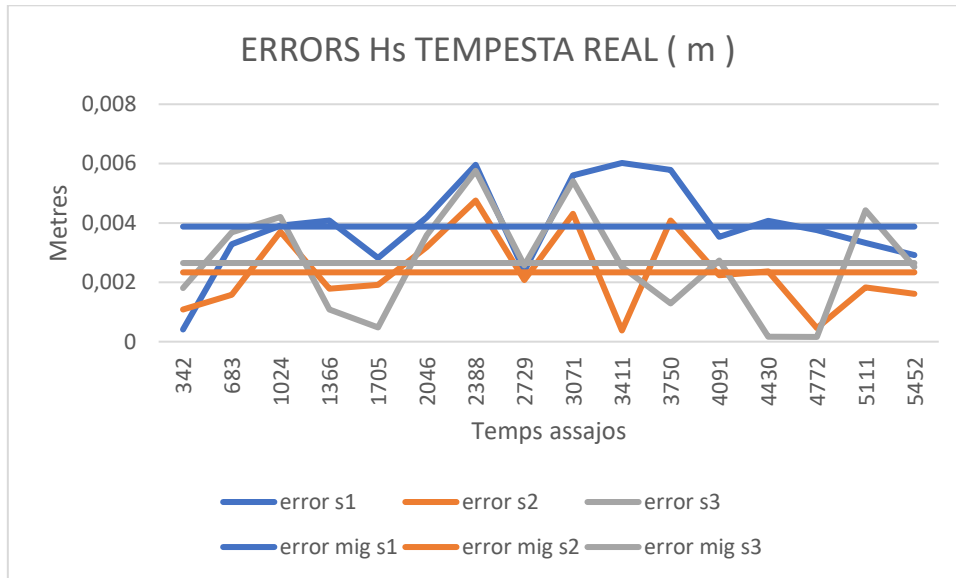


FIGURA 59: errors generats a partir de les alçades d'ona extrems dels assajos de la tempesta real

De l'anterior gràfica ( FIGURA 59), on es representen els errors que han tingut les alçades d'ona significant generades seguint es dades de la tempesta real, es pot extreure que el set 1 ( error mig de 0,00388m ) és el set que és més dispar de la tempesta real en quant a l'alçada d'ona es refereix, seguit del set 3 ( error mig de 0,00265m ) i per últim, el set 2 ( error mig de 0,00234m ) que és el que més s'assimila a les dades reals. D'aquí també es pot extreure que les desviacions típiques dels sets 1, 2 i 3 són 0,00148, 0,00132 i 0,00176 respectivament. L'error màxim de cada set és 0,00602m en el primer set d'onades generades, 0,00475m en el segon i 0,00575m en el tercer ( sempre parlant d'alçades d'ona significant al canal). Veient aquestes dades s'extreu que els assajos fets a partir de la tempesta real no disten tant de la tempesta real.

ALÇADES D'ONA SIGNIFICANT TEMPESTA TRIANGULAR

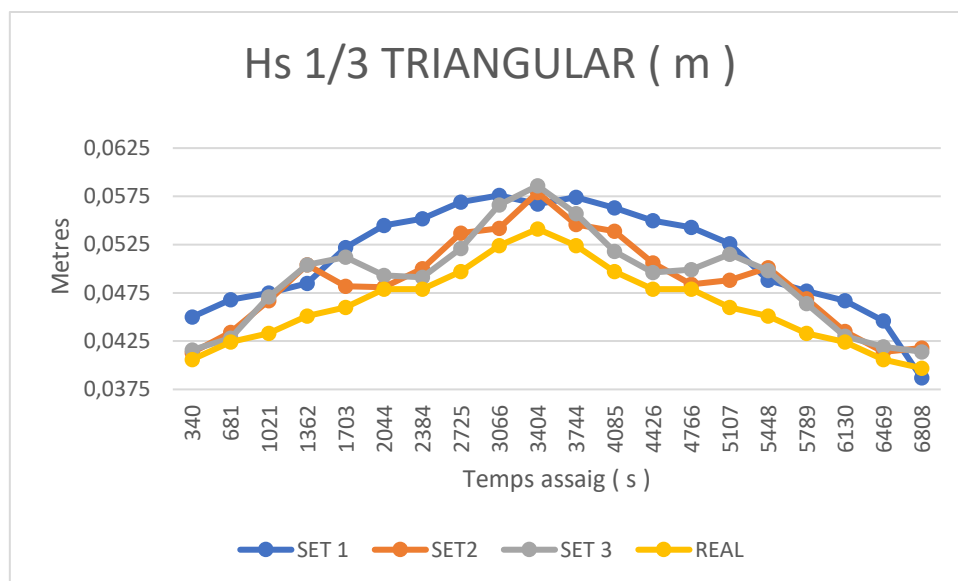


FIGURA 60: comparació de les alçades d'ona generades als 3 sets amb l'alçada d'ona real de la tempesta triangular

A la gràfica d'alçades d'onada significativa relativa a les tempestes triangulars es pot apreciar com la primera sèrie d'onades genera unes onades amb una alçada d'ona superior en gairebé tots els moments a les altres dues sèries d'ona, exceptuant el moment del pic, que és quan es veu superada per la tercera sèrie, que assoleix un màxim de 0,0586m. Per alguna raó la primera sèrie segueix una trajectòria ascendent, que s'assimila molt a la forma teòrica d'un triangle, però en el seu moment de pic, cau. En aquests assajos es repeteix que totes les alçades d'onada significativa generades són superiors a la teòrica assignada. Per altra banda podem observar que la variabilitat entre el primer set i els altres dos és més marcada, assimilant-se entre si molt més el 2n i el 3r set. Tot i així s'està parlant d'una variació molt petita.

ERRORS ALÇADES D'ONA SIGNIFICANT TEMPESTA TRIANGULAR

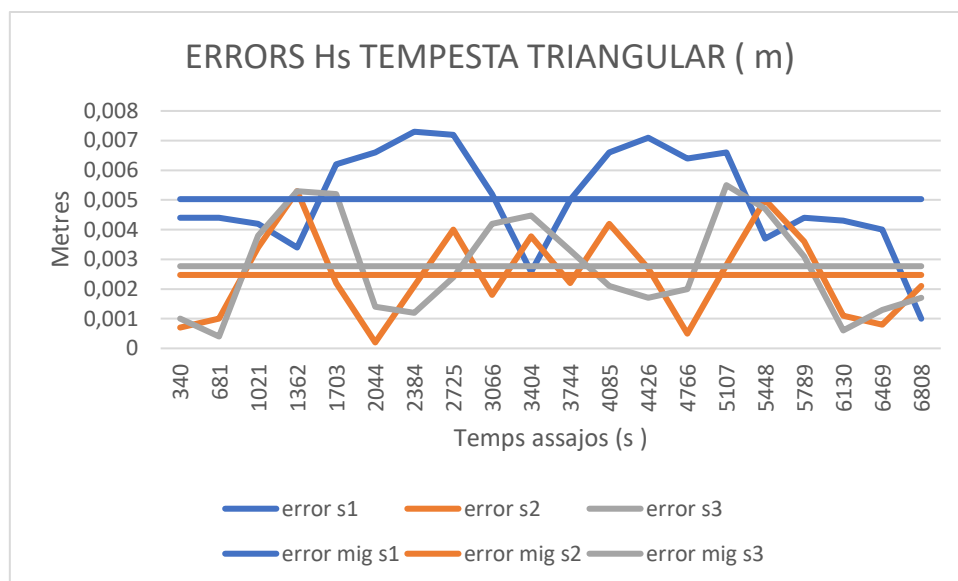


FIGURA 61: errors generats a partir de les alçades d'ona extreïdes dels assajos de la tempesta triangular

De l'anterior gràfica ( FIGURA 61 ) generada a partir dels errors de les alçades d'ona generades seguint les dades de la tempesta triangular teòrica, es pot extreure que el set 1 ( error mig de 0,00503m ) és el set que és més dispar de la tempesta triangular teòrica en quant a l'alçada d'ona es refereix, seguit del set 3 ( error mig de 0,00277m ) i per últim, el set 2 ( error mig de 0,00247m ) que és el que més s'assimila a les dades reals. D'aquí també es pot extreure que les desviacions típiques dels sets 1, 2 i 3 són 0,00170, 0,00152 i 0,00167 respectivament. L'error màxim dels sets és 0,0073m en el primer set d'onades generades, 0,0053m en el segon i 0,0055m en el tercer ( parlant sempre d'alçades d'ona en el canal ). Veient aquestes dades s'extreu que els assajos fets a partir de la tempesta triangular teòrica no disten tant de la pròpia tempesta.

### ALÇADES D'ONA SIGNIFICANT TEMPESTA TRAPEZOIDAL

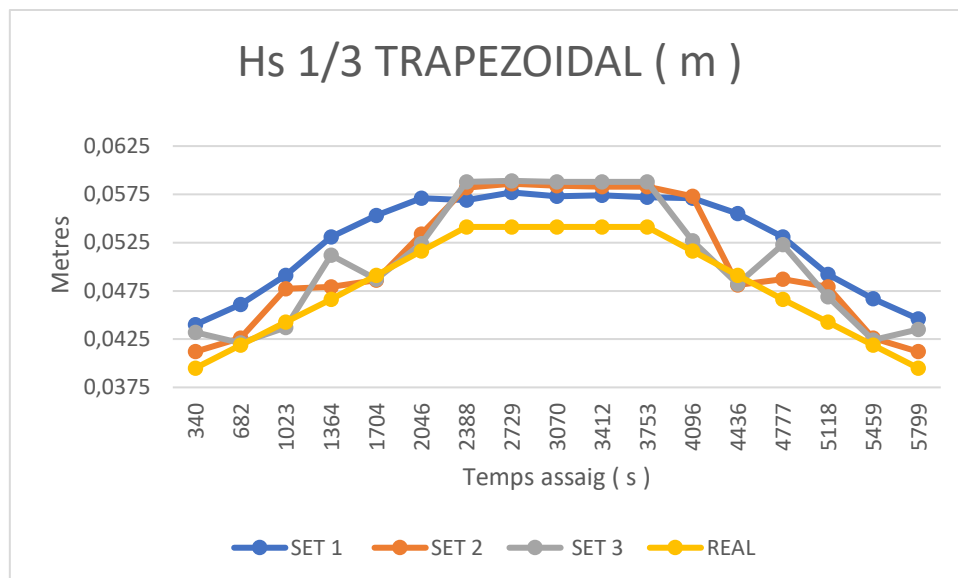


FIGURA 62: comparació de les alçades d'ona generades als 3 sets amb l'alçada d'ona real de la tempesta trapezoidal

De la gràfica d'alçades d'ona significants generades per les tempestes trapezoidals es pot extreure que, una altra vegada i seguint la tònica dels assajos anteriorment descrits, les onades generades sempre estan per sobre de les reals. Aquí es repeteix també que la forma del set 1 dista més en relació a les del 2n i el 3r set, tenint valors superiors a les altres dues en tot moment excepte en el pic, on és la 3ra la que torna a estar per sobre, amb un màxim de 0,589m.

ERRORS ALÇADES D'ONA SIGNIFICANT TEMPESTA TRAPEZOIDAL

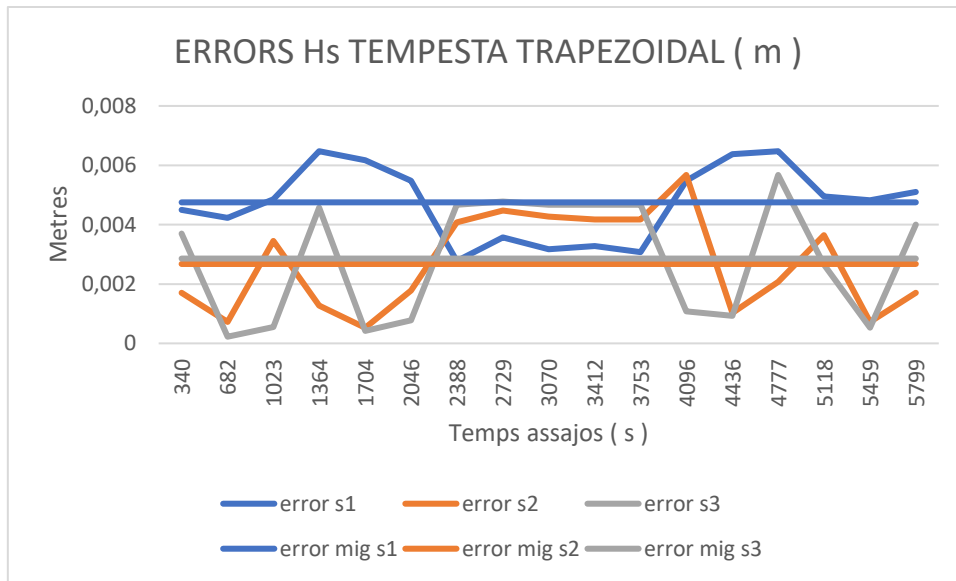


FIGURA 63: errors generats a partir de les alçades d'ona extrems dels assajos de la tempesta trapezoidal

De l'anterior gràfica ( FIGURA 63 ) generada a partir dels errors de les alçades d'ona generades seguint les dades de la tempesta trapezoidal teòrica, es pot extreure que el set 1 ( error mig de 0,00475m ) és el set que és més dispar de la tempesta triangular teòrica en quant a l'alçada d'ona es refereix, seguit del set 3 ( error mig de 0,00286m ) i per últim, el set 2 ( error mig de 0,00267m ) que és el que més s'assimila a les dades reals. D'aquí també es pot extreure que les desviacions típiques dels sets 1, 2 i 3 són 0,00125, 0,00164 i 0,00201 respectivament. L'error màxim dels sets és 0,00647m en el primer set d'onades generades, 0,00567m en el segon i 0,00567m en el tercer ( parlant sempre d'alçades d'ona en el canal ). Veient aquestes dades s'extreu que els assajos fets a partir de la tempesta trapezoidal no disten tant de la pròpia tempesta prèviament creada.

## ALÇADES D'ONA SIGNIFICANT METODOLOGIA CLÀSSICA

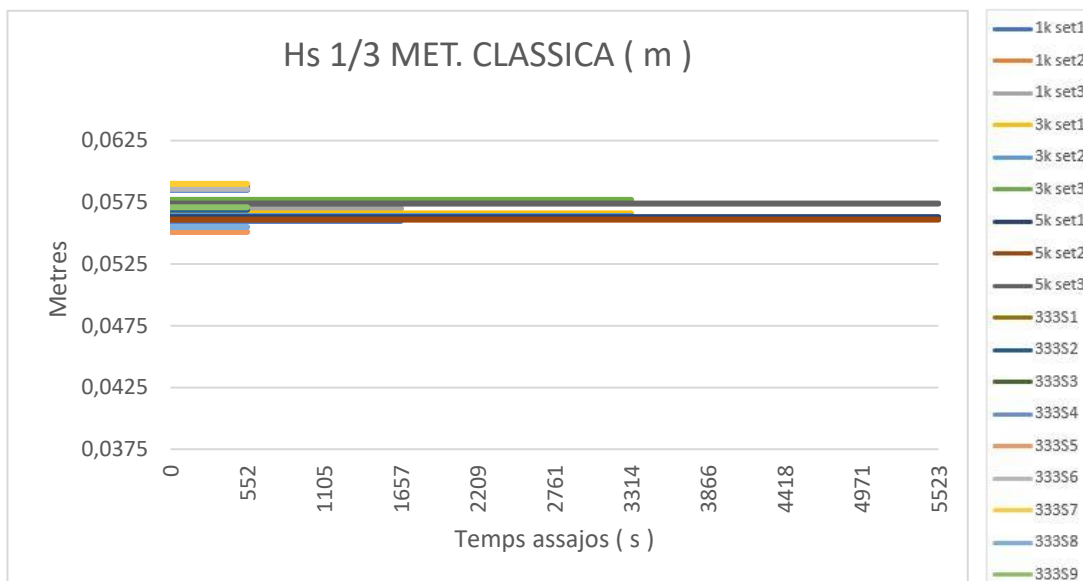


FIGURA 64: comparació de les alçades d'ona generades aplicant la metodologia clàssica d'estudi

De la gràfica d'alçades d'ona vinculada a les sèries realitzades seguint la metodologia clàssica d'estudi, podem extreure diverses dades. La primera és que les Hs són sempre constants al llarg de cada assaig en singular. A partir d'això, s'analitzarà per una banda els sets de 1000, 3000 i 5000 onades i per altra els sets de 333 onades.

De les dades representades a partir de les sèries de 333 onades es pot extreure que, independentment del seu valor d'alçada màxima, es compleix sempre una cosa en cada assaig. El primer i el tercer set de cada assaig tenen valors sempre molt similars entre ells, essent sense excepció el segon molt més baix que els altres dos en tots els assajos. La variabilitat entre les primeres sèries dels 3 assajos és molt baixa, i s'assimila molt en valor, com ja em dit, amb els tercers de cadascuna. La variabilitat entre els segons sets és també molt baixa, però varia bastant en valor en comparació amb els altres dos. El màxim de les 9 sèries s'assoleix al primer set del tercer assaig i té un valor de 0,59m.

Si s'analitzen els valors relatius a les sèries de més onades ( 1000, 3000 i 5000 respectivament ) es pot veure que la variabilitat entre els valors és molt baixa ( les 9 sèries compreses entre un mínim de 0,56m i un màxim de 0,577m ) sent els 3 valors més grans els pertanyents al set 3 ( SEED NUMBER 3 una altra vegada ).

Tots els valors d'alçada d'ona estan una altra vegada per sobre dels 0,54m màxims assolits per la tempesta real.

### 6.1.2 ANALISI I COMPARACIÓ DE RESULTATS A PARTIR DELS PERÍODES MITJOS

En totes les gràfiques que a continuació s'analitzaran per a la seva posterior comparació es representaran, per una banda, els períodes mitjos dels 3 sets generats per a cada tempesta. A la mateixa gràfica també es veurà dibuixada la representació dels períodes mitjos reals ( en el cas de la tempesta real ) o teòrics ( en els casos de les tempestes triangular i trapezoidal ). Per altra banda s'analitzaran també les gràfiques generades a partir dels errors que cada sèrie té respecte a les dades reals de les quals s'han extret les tempestes a generar ( excepte per a la Metodologia Clàssica ). Es crearà una gràfica on es representarà l'error de cada període mig en singular i l'error mig de cada sèrie d'onades, d'on després es podrà extreure la desviació típica de cada assaig i l'error màxim assolit. Els valors d'error es generaran fent el valor absolut de la diferència entre cada valor de període mig mesurat i el seu valor associat de període mig real ( Tempesta Real ) o teòric ( tempestes Triangular i Trapezoidal ).

#### PERÍODES MITJOS TEMPESTA REAL

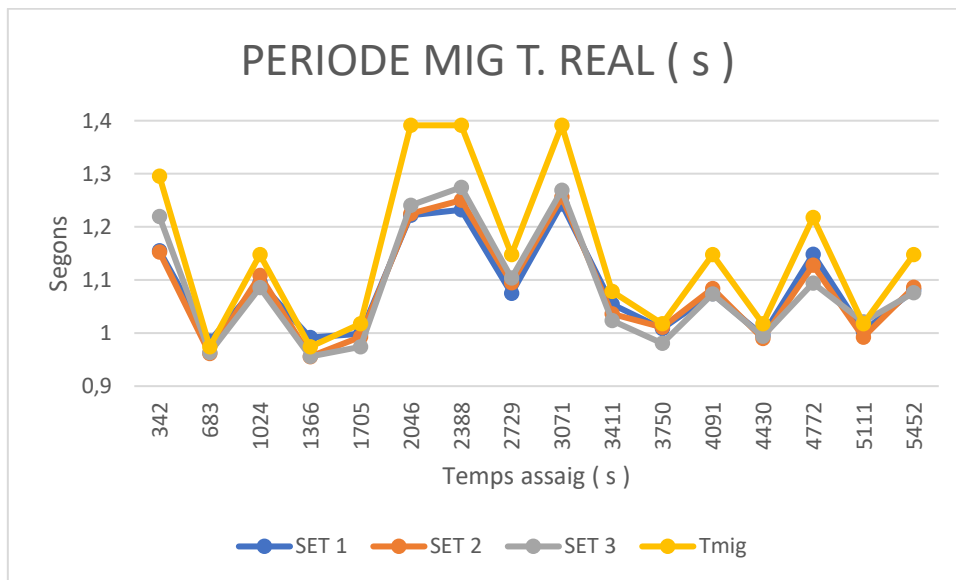


FIGURA 65: comparació dels períodes mitjos generats als 3 sets de la tempesta real amb el Tm de la tempesta

A la gràfica relativa a als períodes mitjos que surten resultants dels sets d'onades amb les dades de la tempesta real es pot veure que els valors generats són pràcticament els mateixos en els 3 sets diferents, tenint el valor més alt i el més baix al tercer set ( 1,2746s i 0,9556s respectivament ). Veiem que els pics de període concorden amb un dels dos pics de la tempesta, però no és amb el més gran dels dos.

## ERRORS PERÍODES MITJOS TEMPESTA REAL

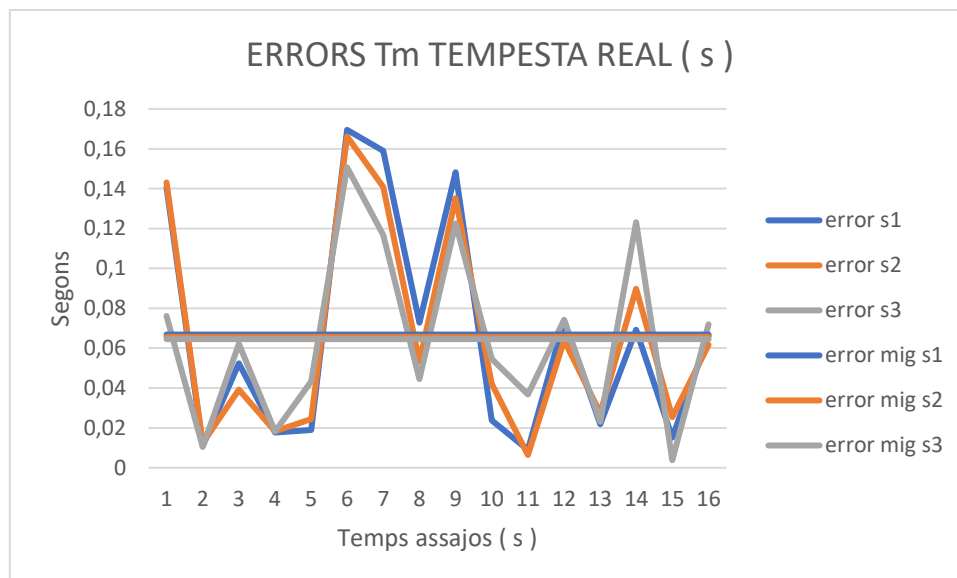


FIGURA 66: comparació dels errors generats a partir de l'alçada d'ona de cada set de la tempesta real

De l'anterior gràfica ( FIGURA 66 ) generada a partir dels errors dels períodes mitjos generats seguint les dades de la tempesta real, es pot extreure que el set 1 ( error mig de 0,0668s ) és el set que és més dispare de la tempesta triangular teòrica en quant al període mig es refereix, seguit del set 2 ( error mig de 0,0656s ) i per últim, el set 3 ( error mig de 0,0645s ) que és el que més s'assimila a les dades reals, ara bé, les diferències són pràcticament mínimes. D'aquí també es pot extreure que les desviacions típiques dels sets 1, 2 i 3 són 0,0572, 0,0529 i 0,0443 respectivament. L'error màxim dels sets és 0,1695s en el primer set d'onades generades, 0,1662s en el segon i 0,1507s en el tercer ( parlant sempre de períodes mitjos generats al canal ). Una altra vegada es veu que els valors dels períodes generats no disten tant dels reals calculats, per tant, es pot extreure que els assajos retornen dades bastant reals.



## PERÍODES MITJOS TEMPESTA TRIANGULAR

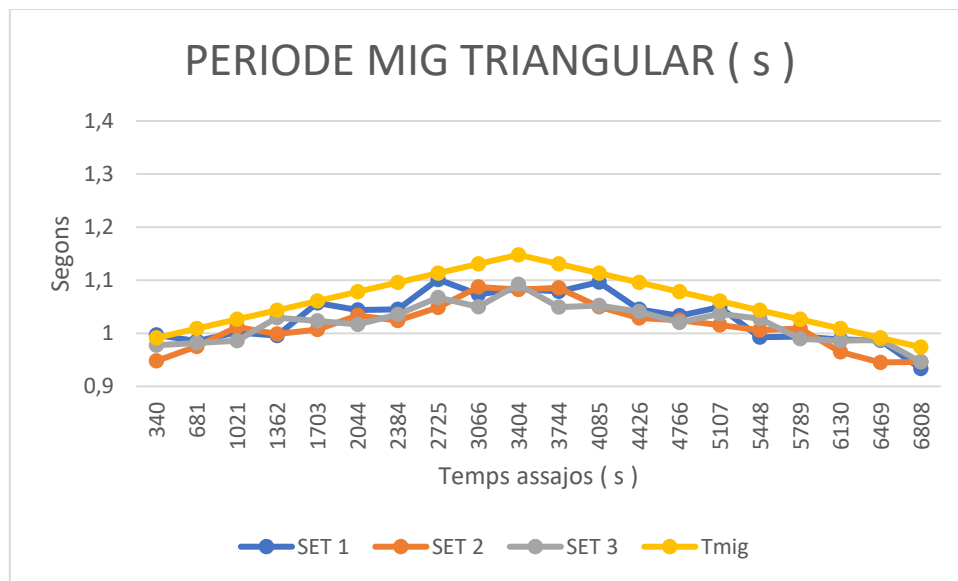


FIGURA 67: comparació dels períodes mitjos generats als 3 sets de la tempesta triangular amb el Tm de la tempesta generada

De la gràfica de períodes mitjos generats a partir dels assajos amb les dades de la tempesta triangular teòrica creada podem extreure que segueixen clarament una forma triangular, que tenen una variabilitat molt baixa i que el període més alt correspon al set 1 i té un valor de 1,1014s. Curiosament aquest valor no està centrat al pic de la tempesta, sinó que es troba un xic desplaçat. Es pot veure també que el segon valor és de 1,0966s i que és el que seria el seu simètric respecte l'eix de simetria del suposat triangle.

### ERRORS PERÍODES MITJOS TEMPESTA TRIANGULAR

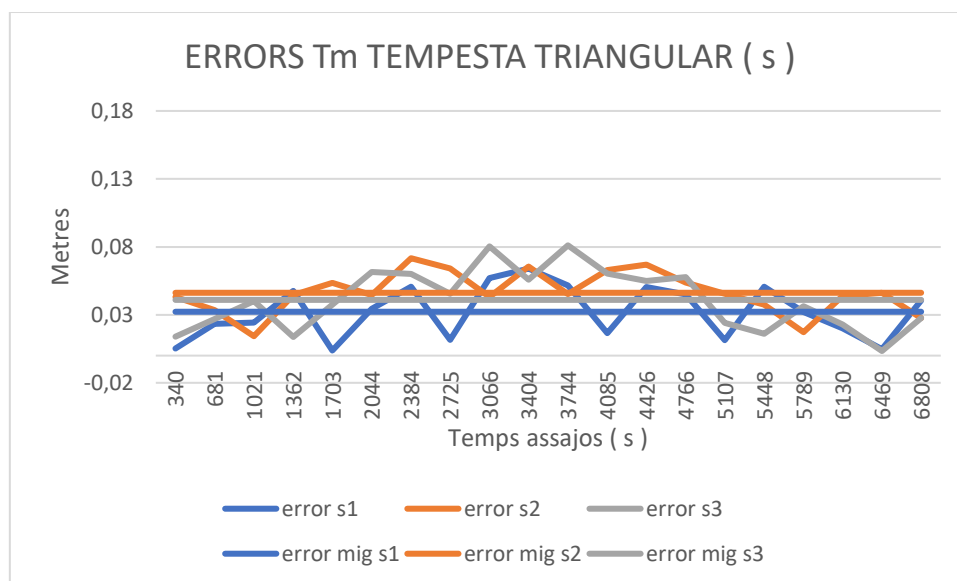


FIGURA 68: comparació dels errors generats a partir de l'alçada d'ona de cada set de la tempesta triangular

De l'anterior gràfica ( FIGURA 68 ) generada a partir dels errors dels períodes mitjos generats seguint les dades de la tempesta triangular, es pot extreure que el set 2 ( error mig de 0,0462s ) és el set que és més dispar de la tempesta triangular teòrica en quant al període mig es refereix, seguit del set 3 ( error mig de 0,0410s ) i per últim, el set 1 ( error mig de 0,0323s ) que és el que més s'assimila a les dades reals, ara bé, les diferències són pràcticament mínimes. D'aquí també es pot extreure que les desviacions típiques dels sets 1, 2 i 3 són 0,0194, 0,0156 i 0,0224 respectivament. L'error màxim dels sets és 0,064s en el primer set d'onades generades, 0,071s en el segon i 0,081s en el tercer ( parlant sempre de períodes mitjos generats al canal ). Una altra vegada es veu que els valors dels períodes generats no disten tant dels reals calculats, per tant, es pot extreure que els assajos retornen dades bastant reals.

## PERÍODES MITJOS TEMPESTA TRAPEZOIDAL

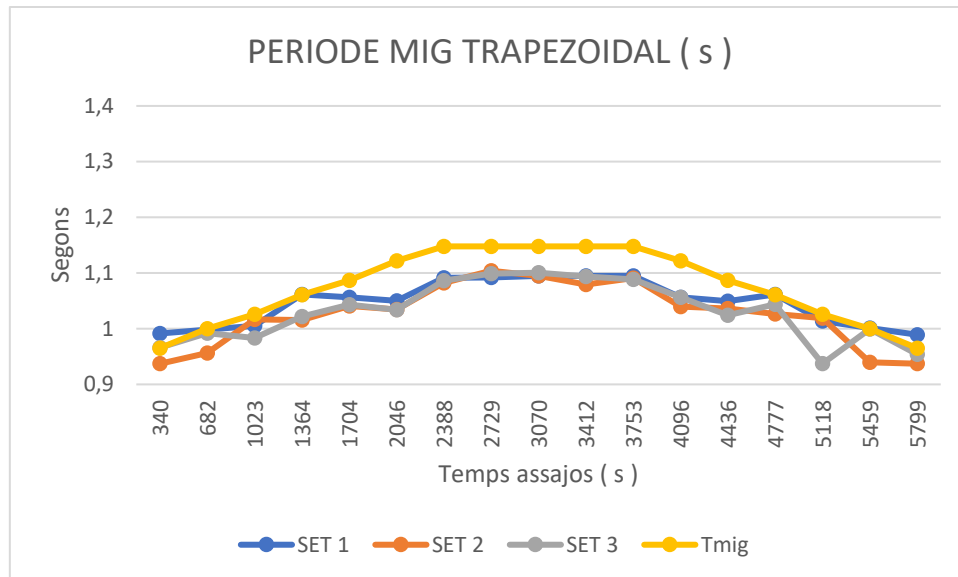


FIGURA 69: comparació dels períodes mitjos generats als 3 sets de la tempesta trapezoidal amb el Tm de la tempesta generada

De la gràfica de períodes mitjos generada a partir de les dades enregistrades al generar les tempestes trapezoidals es pot extreure que els valors són molt d'una variabilitat molt baixa, assolint el màxim a 1,1005s (valor pertanyent al set 3) però amb una sèrie de 15 valors (5 de cada sèrie) pràcticament iguals al pic de la tempesta.

ERRORS PERÍODES MITJOS TEMPESTA TRAPEZOIDAL

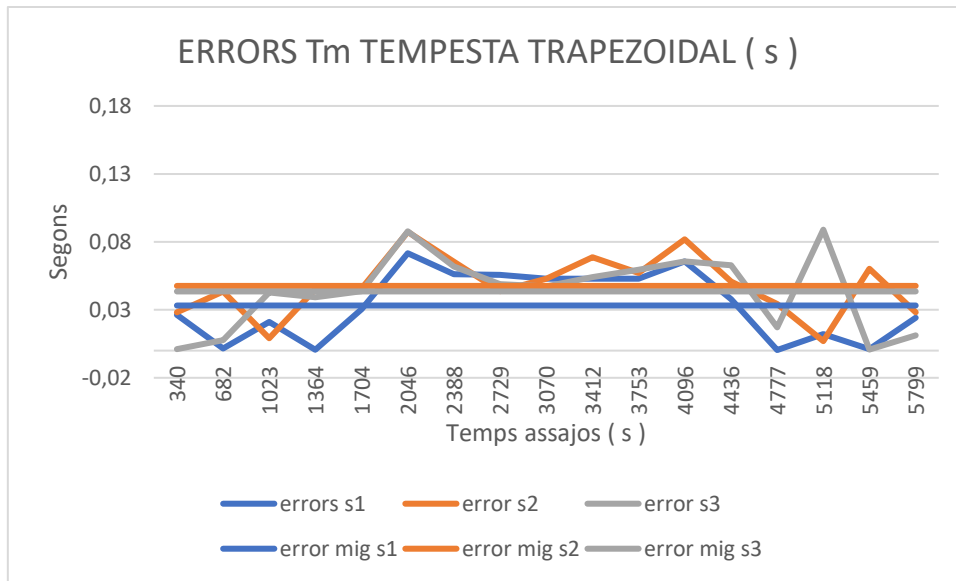
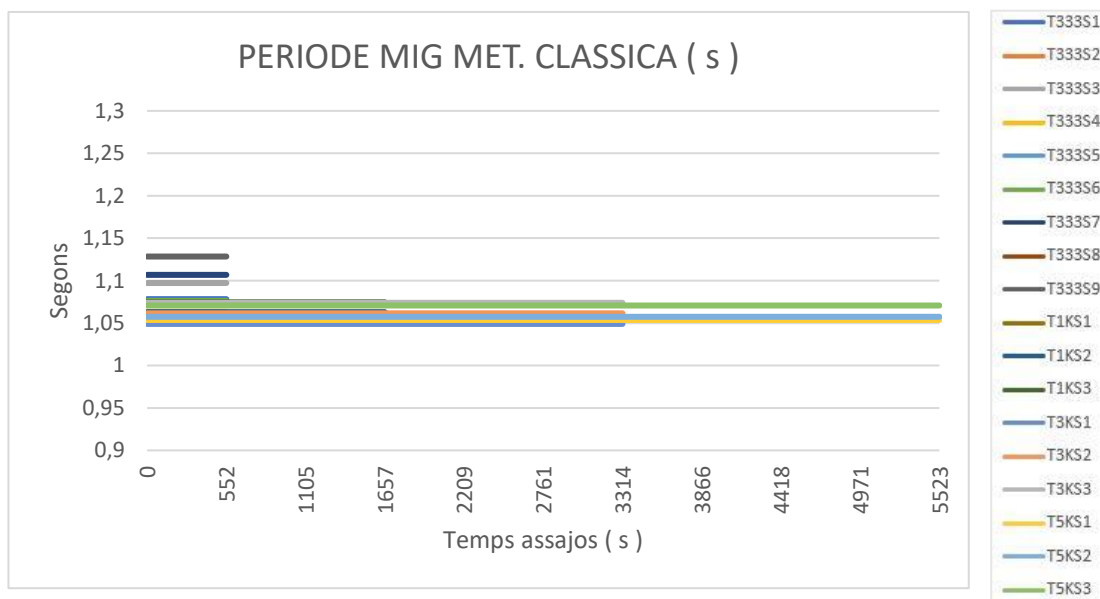


FIGURA 70: comparació dels errors generats a partir de l'alçada d'ona de cada set de la tempesta trapezoidal

De l'anterior gràfica ( XXX ) generada a partir dels errors dels períodes mitjos generats seguint les dades de la tempesta trapezoidal, es pot extreure que el set 2 ( error mig de 0,0476s ) és el set que és més dispar de la tempesta triangular teòrica en quant al període mig es refereix, seguit del set 3 ( error mig de 0,0435s ) i per últim, el set 1 ( error mig de 0,0332s ) que és el que més s'assimila a les dades reals, ara bé, les diferències són pràcticament mínimes. D'aquí també es pot extreure que les desviacions típiques dels sets 1, 2 i 3 són 0,0246, 0,0222 i 0,0277 respectivament. L'error màxim dels sets és 0,0716s en el primer set d'onades generades, 0,0873s en el segon i 0,0889s en el tercer ( parlant sempre de períodes mitjos generats al canal ). Una altra vegada es veu que els valors dels períodes generats no disten tant dels reals calculats, per tant, es pot extreure que els assajos retornen dades bastant reals.

## PERÍODES MITJOS METODOLOGIA CLÀSSICA



A la gràfica de períodes mitjos que surt a l'estudiar les dades emprant la metodologia clàssica, podem veure que, òbviament, els períodes tornen a ser constants. Repetint la metodologia emprada en l'anàlisi de les alçades d'ona, es mirarà per una banda com es comporten els períodes mitjos de les sèries de 333 onades i després s'analitzarà el comportament de les sèries de 1000, 3000 i 5000 onades.

A les sèries de 333 onades generades, es segueix la dinàmica establerta en pràcticament tots els anàlisis. Els períodes mitjos vinculats al tercer set d'onades generades són els més alts, arribant a assolir-se el màxim de tots a l'últim set de l'últim assaig amb valor de 1,1274s. Els períodes mitjos analitzats presenten una variabilitat de fins a 6 segons entre ells.

A les sèries de 1000, 3000 i 5000 onades respectivament, es pot veure com, al igual que es veu repetint en totes les sèries, els valors més grans són els realitzats amb un "seeding number" de 3. Els assajos entre si aporten uns valors d'una variabilitat reduïda, i mostren una semblança molt marcada entre els valors rebuts de cada assaig.

## 6.2 ANÀLISI SOBRE LA QUANTITAT D'AIGUA ULTRAPASSADA

Una vegada analitzada la forma i la similitud dels assajos realitzats amb la realitat, es començarà a analitzar els assajos des d'un altre punt de vista. En aquest apartat es realitzarà un anàlisi i una posterior comparació de les quantitats d'aigua que han superat la nostra estructura, començant pels volums per a després poder-los relacionar amb els cabals, que és en definitiva lo més important a on es vol arribar i lo més important de l'estudi.

### 6.2.1 ANALISI I COMPARACIÓ DE RESULTATS A PARTIR DELS VOLUMS ACUMULATS

En totes les gràfiques que a continuació s'analitzaran per a la seva posterior comparació es representaran els volums acumulats dels 3 sets generats per a cada tempesta.

#### VOLUMS ACUMULATS TEMPESTA REAL

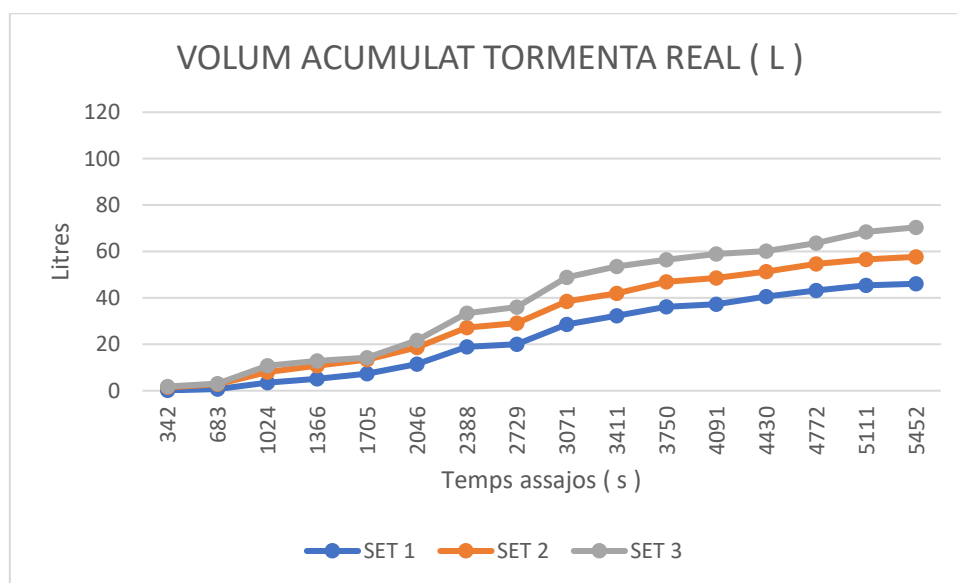


FIGURA 71: comparació dels volums acumulats a cada set de la tempesta real

Si s'analitza la gràfica que retorna el volum acumulat als assajos amb les dades de la tempesta real, es pot arribar a la conclusió de que, a mesura que es va augmentant el "seeding number" el volum d'aigua que sobrepassa l'estructura va augmentant. Els valors de 46,077 L en el primer set, 57,695 en el segon i 70,393 en el tercer ens fan veure que realment és un canvi de pes, i mostren una variabilitat bastant marcada.

### VOLUMS ACUMULATS TEMPESTA TRIANGULAR

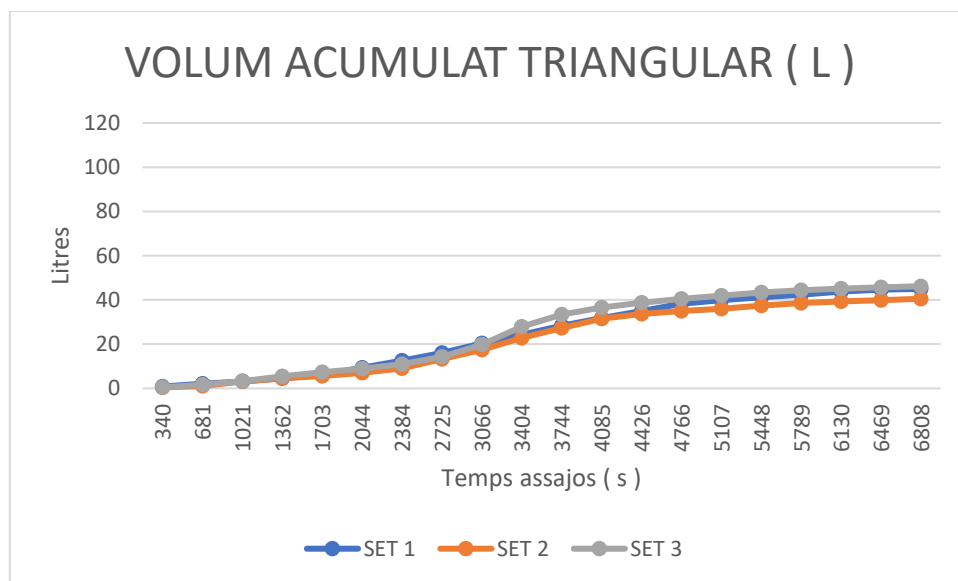


FIGURA 72: comparació dels volums acumulats a cada set de la tempesta triangular

Al fixar-se en la gràfica de volums acumulats referent a la tempesta triangular, podem veure que els valors rebuts de volum són pràcticament iguals en els 3 sets d'onades. Una altra vegada es compleix que el valor més alt correspon al tercer set ( 46,18 L ) però que no dista tant dels 44,984 L i els 40,515 L del primer i el segon set respectivament.

### VOLUMS ACUMULATS TEMPESTA TRAPEZOIDAL

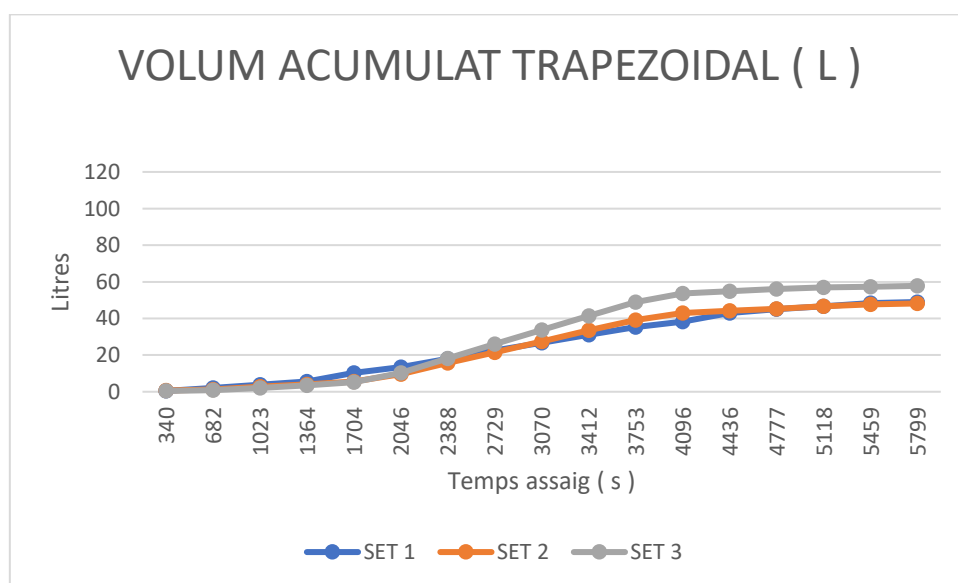


FIGURA 73: comparació dels volums acumulats a cada set de la tempesta triangular

Si es fa un cop d'ull a la gràfica corresponent als volums acumulats una vegada s'utilitzen es dades de la tempesta trapezoidal, es pot comprovar que efectivament el tercer set torna a ser el que més volum d'entrada té. Amb un valor de 57,785 L passa per davant dels 48, 982L i dels 48,188L corresponents als altres dos assajos, que aporten dades pràcticament iguals entre si.

#### VOLUMS ACUMULATS METODOLOGIA CLÀSSICA

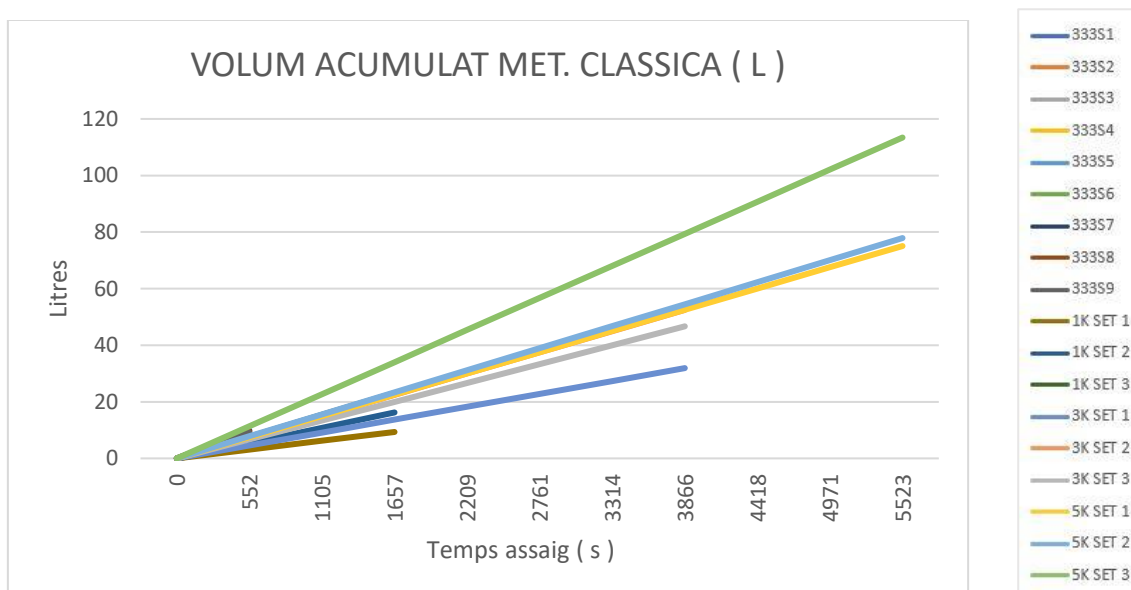


FIGURA 74: comparació dels volums acumulats a cada set aplicant la metodologia clàssica d'estudi

Per analitzar els volums acumulats quan es fa servir la metodologia clàssica d'estudi, es tornarà a dividir l'estudi en dos parts, els sets de 333 onades i els altres. Com també ha passat abans, el volum d'aigua que sobrepassa l'estructura és representat amb una línia recta ( constant ).

Si s'agafen les dades vinculades als assajos de 333 onades, s'observa que la variabilitat en aquests casos és molt elevada, augmentant els valor considerablement al augmentar els "seeding numbers". Les dades vinculades als 3 primers assajos ( valors entre 4 i 5 litres tots ells ) disten de manera notòria dels valors dels assajos assolits en les 3 darreres posicions ( valors entre 9 i 10, assolint el seu màxim als 9,885 L al primer assaig de l'últim set ).

Analitzant les dades vinculades als sets de 1000, 3000 i 5000 onades, es pot veure una altra vegada que, al anar augmentant els "seeding numbers", els valor tendeixen a augmentar, obtenint valors de l'ordre de gairebé 2 vegades més. És difícil comparar els resultats obtinguts aquí, ja que cada assaig és un temps diferent, i òbviament el volum d'aigua sobrepassada va augmentant a mesura que va augmentant el temps.



## 6.2.2 ANALISI I COMPARACIÓ DE RESULTATS A PARTIR DELS CABALS PER METRE LINEAL

En totes les gràfiques que a continuació s'analitzaran per a la seva posterior comparació es representaran els cabals d'aigua sobrepassada per metre lineal d'estructura dels 3 sets generats per a cada tempesta.

Per a poder fer una comparació correcta realitzarem una normalització dels cabals per metre lineal d'estructura que hem obtingut, tal i com recomana l'Eurotop ( font Eurotop ). Els valors representats a les següents gràfiques corresponen a l'expressió següent:

$$\frac{Q}{\sqrt{g * H_{m_0}^3}}$$

On els valors que apareixen són el cabal per metre lineal d'estructura calculat prèviament, l'acceleració per la força de la gravetat i l'alçada d'ona significant associada a cada cabal en singular. Els valors que ens dona són adimensionals, es fa simplement per a poder comparar sempre totes les gràfiques de cabals entre si.

### CABALS ADIMENSIONALS ASSOCIATS A LA TEMPESTA REAL

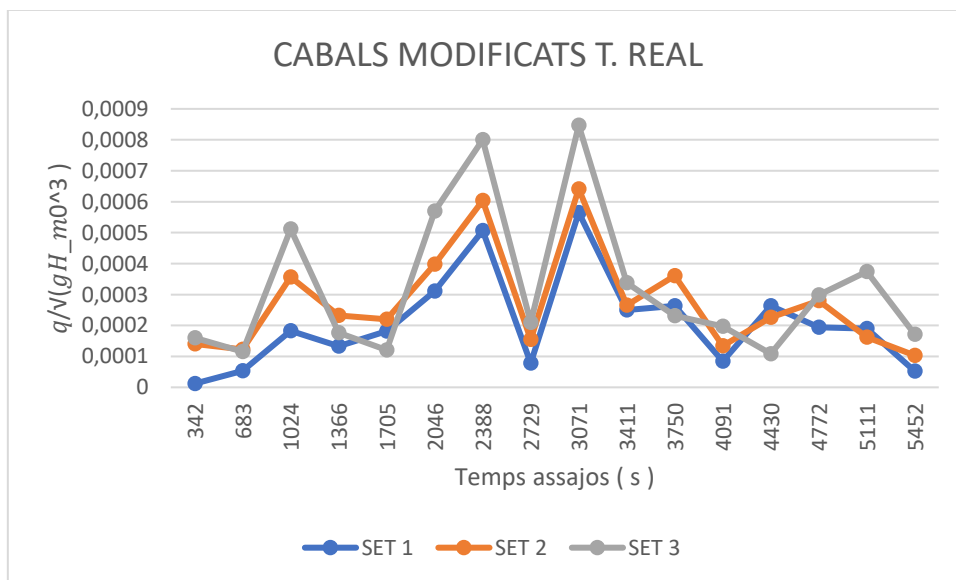


FIGURA 75: comparació dels cabals ja normalitzats de cadascun dels 3 sets de la tempesta real

Com ja passava amb els volums, les dades que retorna la gràfica relativa als valors que han sortit a l'assajar amb la tempesta real, el cabal per metre lineal més gran ( segueix tendència en tota la sèrie ) és el vinculat al tercer set ( "seeding number" igual a 3) assolint el seu màxim en 0,000846787 al segon pic de la tempesta ( notar que els cabals més alts no es donen vinculats a

les alçades d'ona més altes ). Es pot extreure també que la variabilitat entre els cabals és bastant reduïda, i que la forma que generen les seves ràfiques tendeix a seguir la mateixa forma.

#### CABALS ADIMENSIONALS ASSOCIATS A LA TEMPESTA TRIANGULAR

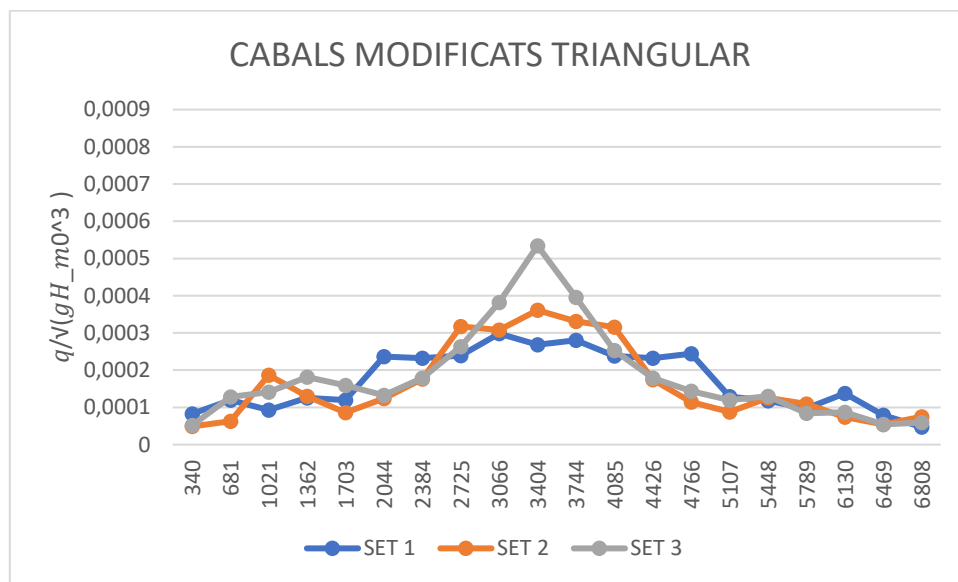


FIGURA 76: comparació dels cabals ja normalitzats de cadascun dels 3 sets de la tempesta triangular

De les dades que s'extreuen dels assajos amb la tempesta triangular, es pot extreure que, una altra vegada i ja com a pràcticament en tots els assajos, el cabal vinculat al "seeding number" més alt és també el més elevat 0,000395879. La variabilitat entre diferents sets no és gaire gran, i tots menys el del primer set compleixen que el valor més alt de la sèrie és el que està centrat amb el pic teòric de la tempesta.

CABALS ADIMENSIONALS ASSOCIATS A LA TEMPESTA TRAPEZOIDAL

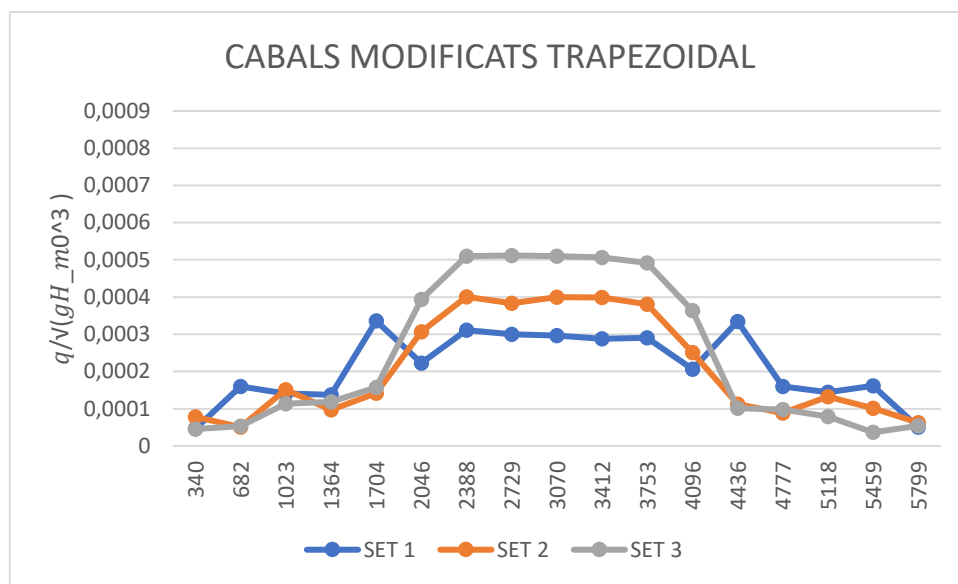


FIGURA 77: : comparació dels cabals ja normalitzats de cadascún dels 3 sets de la tempesta trapezoidal

Si s’analitzen les formes de la gràfica corresponent als cabals adimensionals sobrepassats durant els assajos amb les dades de la tempesta trapezoidal, una altra vegada veiem que el 3r set és el que més cabal aporta. Es torna a complir la dinàmica de que a més alt el “seedin number”, més alts els valors retornats. El màxim de totes les sèries l’assoleix una altra vegada el 3r set, amb un valor de 0,000511823 al primer assaig en arribar al pic de la tempesta trapezoidal. Les formes que segueixen les 3 gràfiques són pràcticament iguals, amb la única variabilitat representada com a pics fora de lo esperat en la primera sèrie d’onades realitzades.

## CABALS ADIMENSIONALS ASSOCIATS A LA METODOLOGIA CLÀSSICA

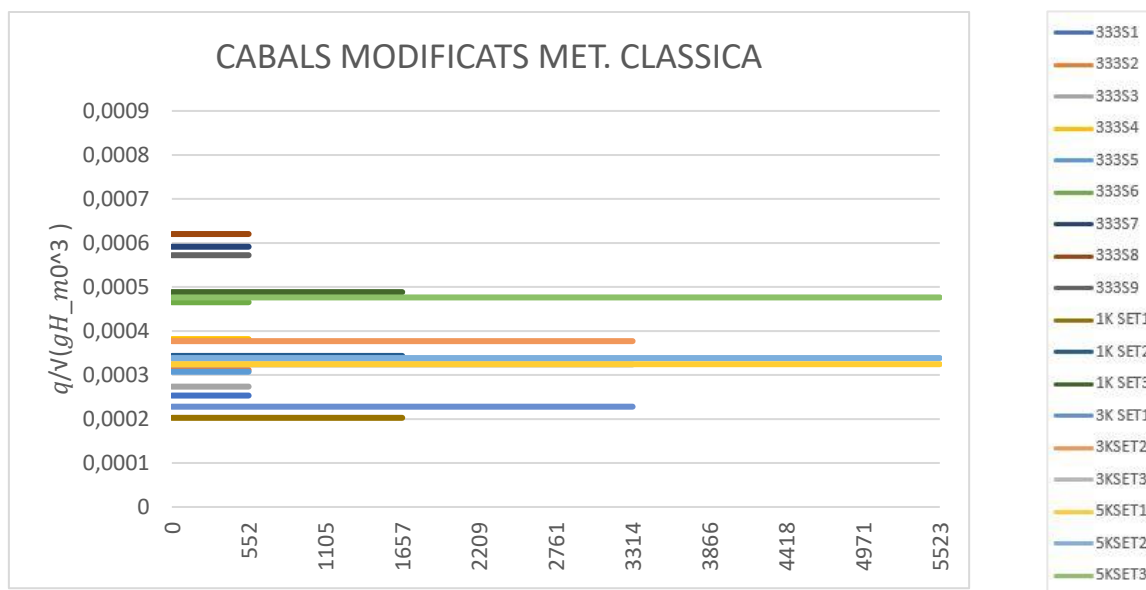


FIGURA 78: comparació dels cabals ja normalitzats de cadascun dels 3 sets aplicant la metodologia clàssica d'estudi

Si s'analitzen les dades dels assajos realitzats amb la metodologia clàssica, el primer que es torna a veure és que els cabals modificats associats tornen a ser constants. Es tornarà a dividir l'anàlisi en dues parts, 333 onades per una banda i les altres per una altra.

Tot entrant a les dades de les 333 onades, es pot veure que els 3 valors més grans de cabal per metre lineal sobreixit corresponen als 3 "seeding numbers" més alts ( 7, 8 i 9 ) dels sets realitzats al 3r assaig. Comparant els valors de l'últim set ( amb un màxim de 0,000620293 quan el "seeding number" és igual a 8 ) amb els del primer ( màxim de 0,0003115 quan el "seeding number" és igual a 2 ) es pot veure que la variabilitat dins dels assajos és molt gran, arribant-se a assolir diferències de l'ordre del doble entre uns i els altres. En tot moment porta una dinàmica ascendent.

La variabilitat entre els assajos de 1000, 3000 i 5000 onades és molt menor que la dels assajos de 333 onades prèviament analitzats. Es segueix complint la tendència de que com major és el "seeding number" major és el cabal sobreixit. El cabal per metre lineal màxim d'aquest grup d'assajos és el vinculat al set de 1000 onades del tercer assaig.

## 7 CONCLUSIONS

Al llarg de la present tesina s'han pogut anar extraient conclusions que seguidament s'enumeraran. Es conclouran coses tant a nivell millora de l'estudi com a nivell de nous coneixements adquirits:

1. La present tesina s'ha basat en tot moment en una tempesta real, que tenia associats uns períodes pic. D'aquests períodes pic s'han extret uns períodes mitjos seguint la següent afirmació:  $T_p = 1,15T_m$ . Realment això no és del tot verídric perquè l'expressió que defineix al període mig és la següent:  $\frac{T_p}{1,1} \leq T_m \leq \frac{T_p}{1,2}$ . És per això que moltes vegades es pot observar que la variabilitat dels assajos és diferent depenent del moment on ens trobem i de cada petita part d'assaig en singular. En una futura investigació potser s'hauria de ser més acurat a l'hora de generar els períodes mitjos, ja que és molt possible que sense aquesta aproximació, els errors haguessin estat més baixos i com a conseqüència les seves desviacions típiques.
2. Tot i que els errors obtinguts són molt baixos, les dades sobre les qual treballen ho són també. La similitud entre els assajos i la realitat és alta, però no ho és tant com cabria esperar. Al final els assajos no deixen de ser una reproducció de la realitat, i en aquest cas no s'ha sigut capaç de reproduir-la al 100%. Com ja s'ha dit durant tota la tesina, petites variacions en qualsevol paràmetre poden desencadenar grans canvis en el desenvolupament dels assajos. Si s'entra en detall als estudis que es fan per definir si la tempesta s'estava generant bé, és a dir, els de les alçades d'ona i dels períodes mitjos, es pot concloure que sí, però entre cometes. Els errors mitjos tenen uns valors molt baixos, i la seva desviació típica és molt propera a zero. Tot i que s'haurien de produir unes gràfiques amb menor variabilitat, mai arriben a distar gaire de la gràfica esperada, i sempre segueixen una forma lògica.
3. S'ha vist que augmentar el número de seeding és una cosa a tenir en compte. Depenent de com comenci a generar-se la sèrie d'onades, tindrem més o menys ultrapassament. Ens la present tesina el número seeding 3 ha estat el més perjudicial per a l'estudi, el que ens ha aportat unes condicions més extremes, de més ultrapassament.
4. Un dels objectius de l'estudi era comprovar com variava l'overtopping amb els assajos de metodologia clàssica, canviant l'increment d'alçades d'ona per la generació de més onades. Després d'analitzar els resultats podem concloure que el cabal no augmenta notòriament amb el número d'onades, sinó que es manté pràcticament constant. El "seeding number" torna a ser un factor més clau que no pas l'augment d'onades.
5. Abans de començar la tesina, tot portava a pensar que seria als pics d'alçada d'ona on es tindrien els màxims cabals d'ultrapassament. Una vegada realitzats tots els estudis, es pot afirmar que no té perquè. Onades amb un períodes més alt però amb menys alçada d'ona donen més ultrapassament que no pas d'altres amb més alçada d'ona. Per tant podem concloure que l'alçada d'ona és un factor important per l'ultrapassament, però no és l'únic que hi participa.

## LÍNIES PER A FUTURES INVESTIGACIONS

En aquest últim apart es s' aconsellaran possibles línies d'estudi futures, basades en l'experiència adquirida durant la present tesina, i sobretot en les conclusions extretes.

- 1- Seria interessant buscar quin és el número de seeding que;
  - a. S'assembla més a la tempesta i així tots els assajos serien més concordants amb la realitat.
  - b. Ens generi una condició més desfavorable, ja que en la natura sempre es pot desencadenar algun fet pitjor. Si es treballa amb el cas més desfavorable, sempre estarem millor previnguts.
- 2- Ser més precisos amb el càlcul del període mig. Ajudarà a acotar les dades i farà que els errors mitjos i les desviacions típiques baixin. Les dades obtingudes seran més reals.
- 3- Seria molt interessant poder crer un model de generació d'onades universal, així tots els laboratoris podrien treballar sempre amb les mateixes sèries. Això comportaria que cada número de seeding fos igual a cada laboratori, i s'estaria unificant tots els assajos a la vegada. De realitzar el estudi així, quan algú trobés la situació més desfavorable respecte a X condicions de contorn, seria molt més fàcil de reproduir-se, baixaria infinitament la repetició d'assajos, es disminuirien els temps d'assaig i la feina feta al laboratori seria molt més efectiva.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- [1] – “*Stability formula for breakwaters armoured with Acropode*”, Van D. Meer, 1987.
- [2] - “*Comportamiento de los diques en talud frente a la acción del oleaje y criterios para el reparto de la probabilidad conjunta de fallo en la vida útil*”, M. Clavero. Tesis Doctoral ICCP – UGR, 2007.
- [3] – “*EUROTOP, manual on wave overtopping of sea defences and related structures*”, Conjunt d'autors, 2016.
- [4] – “*DISCOVER SCIENTIFIC KNOWLEDGE AND MAKE YOUR RESEARCH VISIBLE*”, On-line en: researchgate.net, 2012.
- [5] – “*Technical Report Wave Run-up and Wave Overtopping at dikes*”, Van D. Meer, 2002.
- [6] – “*Diseño de diques verticales. Colección Seinor, Vol. 26*”, O. Varela, V. Negro, J.H. García, 2001.
- [7] – “*Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*”, Steven A. Hughes, 1993.
- [8] – “*US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual*”, Govern EEUU, 2006.
- [9] – “*Optimización de ensayos físicos para la evaluación del rebase en diques de abrigo*”, Marta Pablos, Trabajo final de grado, On-line en: UPC-COMMONS, 2010.
- [10] – “*Random Seas and Design of Maritime Structures*”, Y. Goda, 2000.
- [11] – Laboratorid'EnginyeriaMarítima,UPC. On-line a:  
<https://ciemlab.upc.edu/es/instalaciones/ciemito>
- [12] – “*Master Thesis on the use of trapezoidal synthetic storm for breaker stability design*” Edu García, UPC, 2017.
- [13] – “*Wave Overtopping of Seawalls, Design and Assessment Manual*”, HR Wallingford, 1999.

## 9 ANNEXES

### 9.1 ANNEX 1: OBTENCIÓ DE DADES

En aquest annex es detallen totes les gràfiques ja nombrades al capítol 5 i obtingudes a partir de tots els assajos, per a poder fer els anàlisis de dades corresponents a posteriori ( capítol 6 ).

#### GRÀFIQUES OBTINGUDES A PARTIR DELS ASSAJOS GENERATS AMB LES DADES DE LA TEMPESTA REAL

##### SET 1

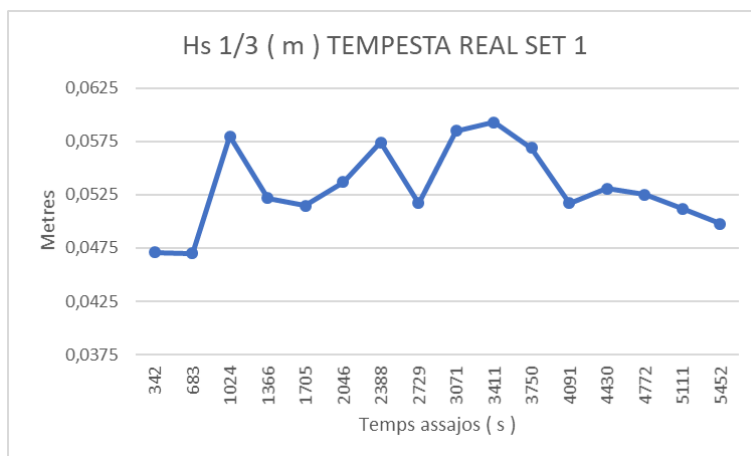


FIGURA 79: alçada d'ona significant set 1 tempesta real

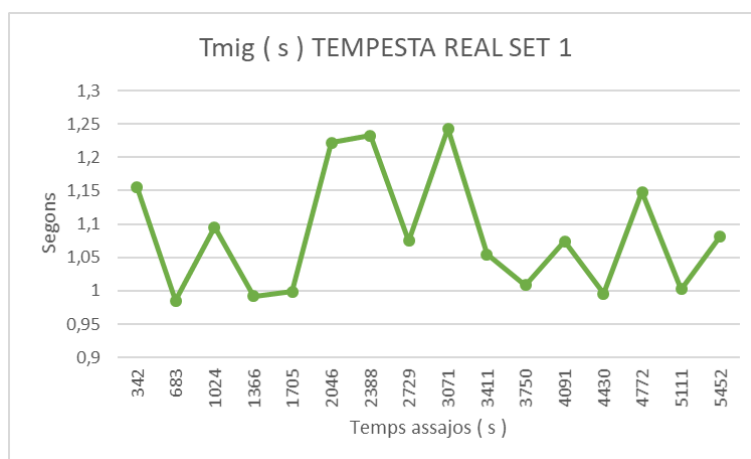


FIGURA 80: període mitg tempesta real set 1



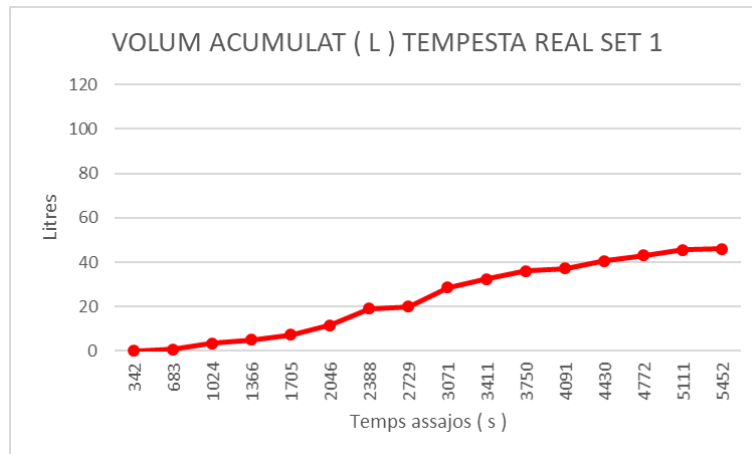


FIGURA 81: volum acumulat tempesta real set 1

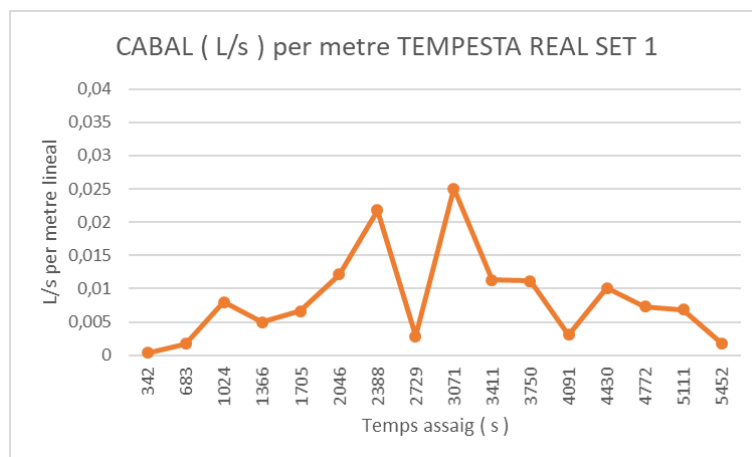


FIGURA 82: cabal per metre lineal generat set 1 tempesta real

SET 2

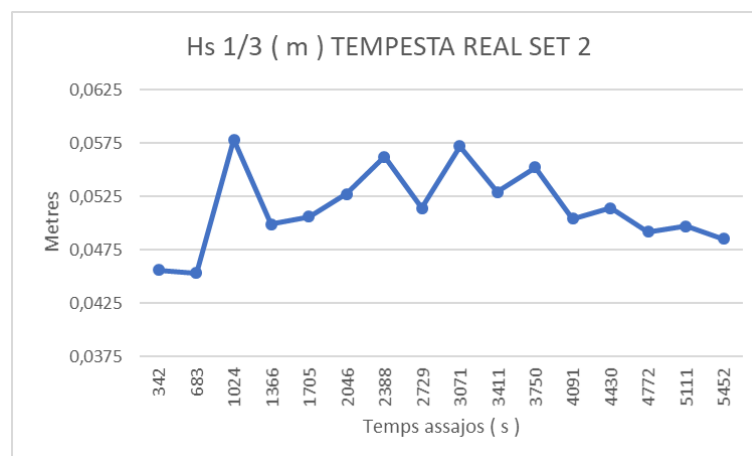


FIGURA 83: alçada d'ona significant set 2 tempesta real

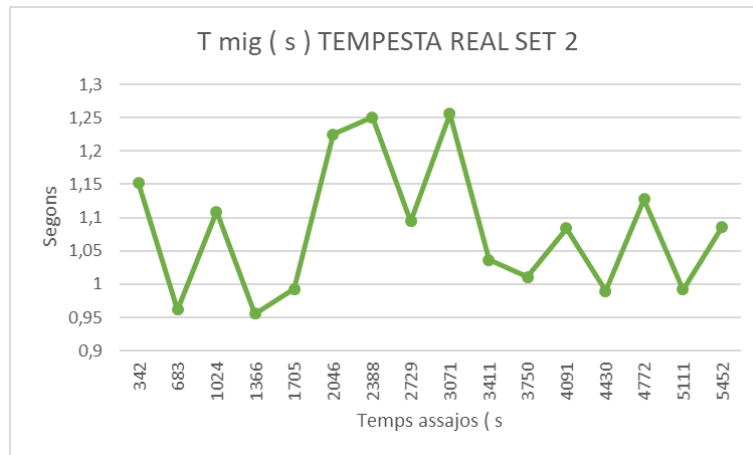


FIGURA 84: període mig tempesta real set 2

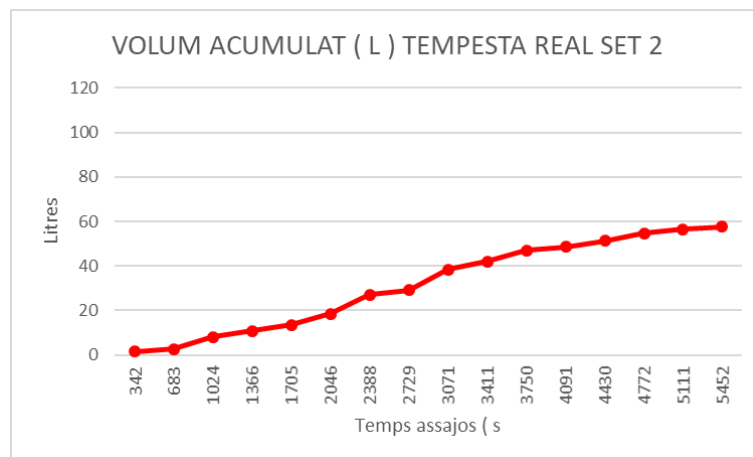


FIGURA 85: volum acumulat tempesta real set 2

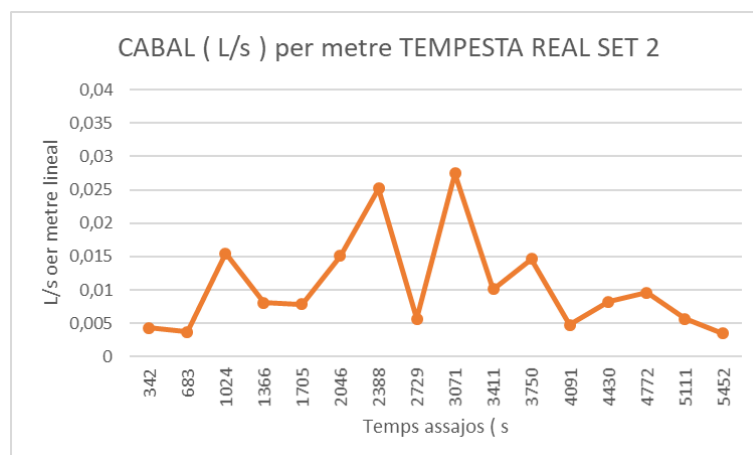


FIGURA 86: cabal per metre lineal generat set 2 tempesta real

SET 3

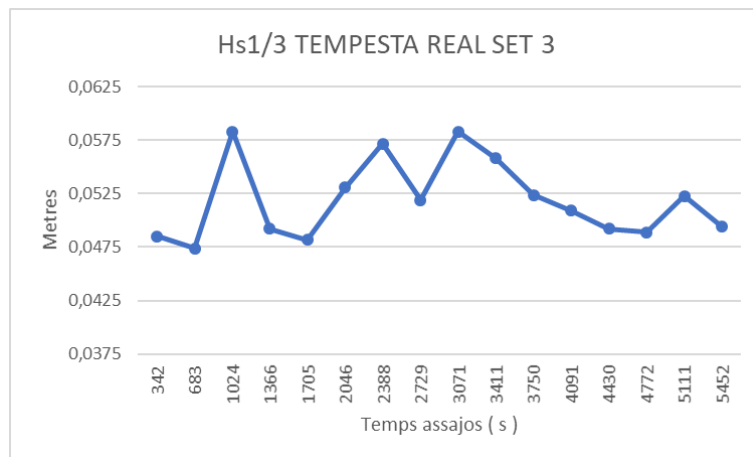


FIGURA 87: alçada d'ona significant set 3 tempesta real

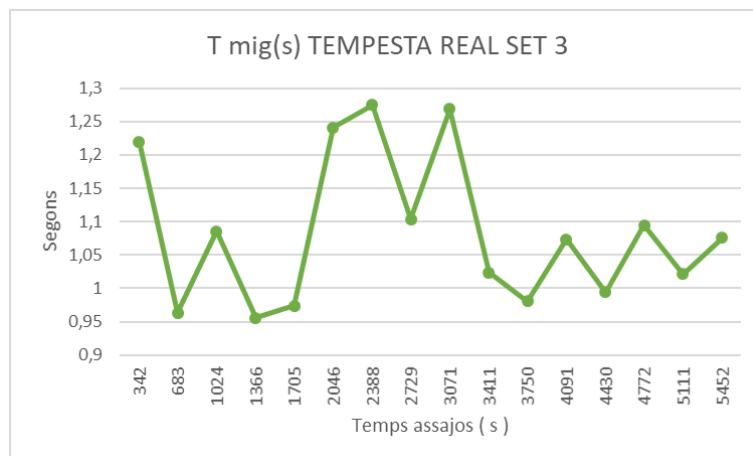


FIGURA 88: període mig tempesta real set 3

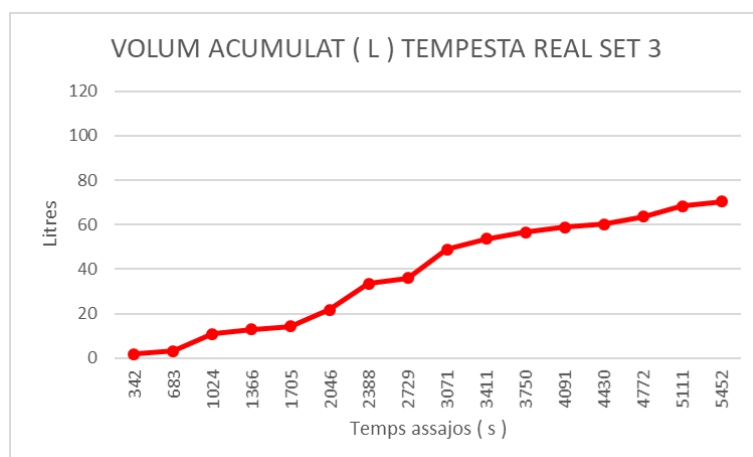


FIGURA 89: volum acumulat tempesta real set 3

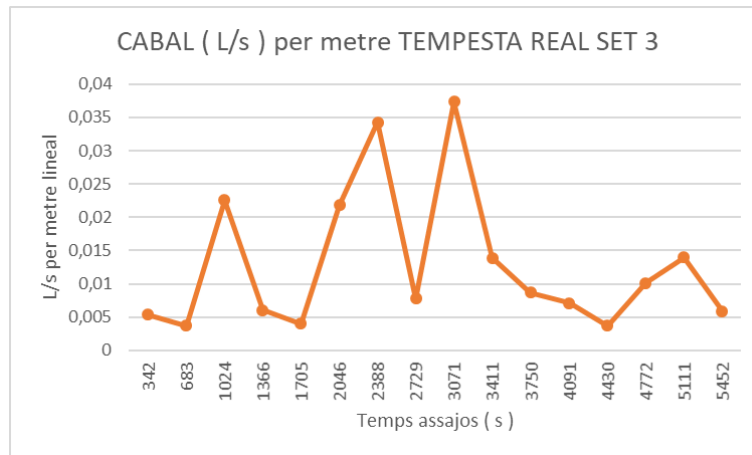


FIGURA 90: cabal per metre lineal generat set 3 tempesta real

GRÀFIQUES OBTINGUES A PARTIR DELS ASSAJOS GENERATS AMB LES DADES DE LA TEMPESTA TRIANGULAR TEÒRICA

SET 1

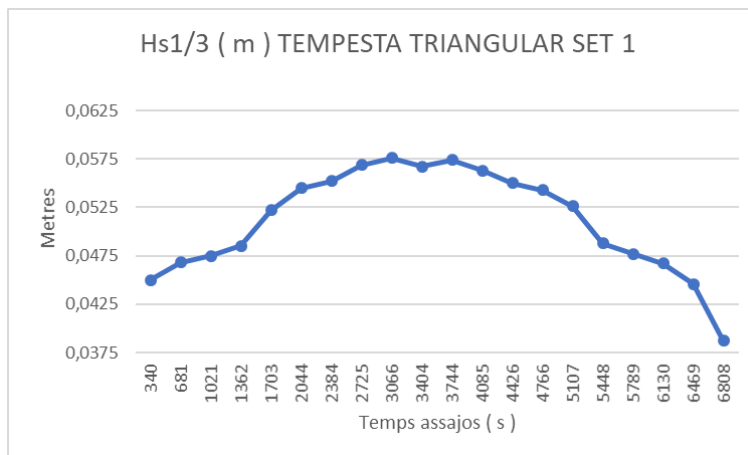


FIGURA 91: alçada d'ona significant set 1 tempesta triangular

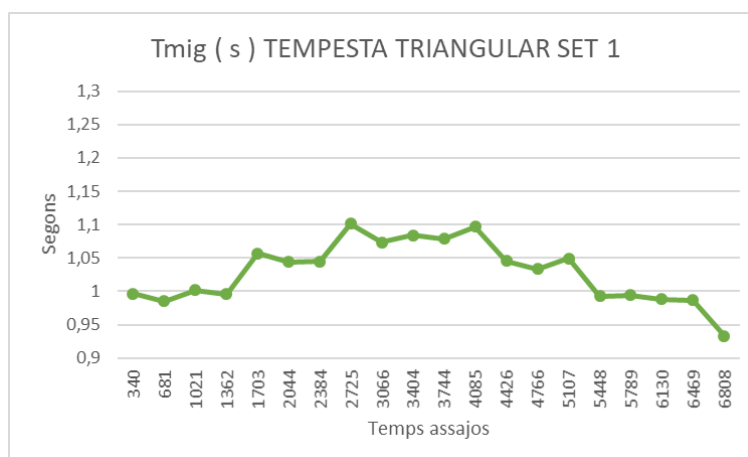


FIGURA 92: període mig tempesta triangular set 1

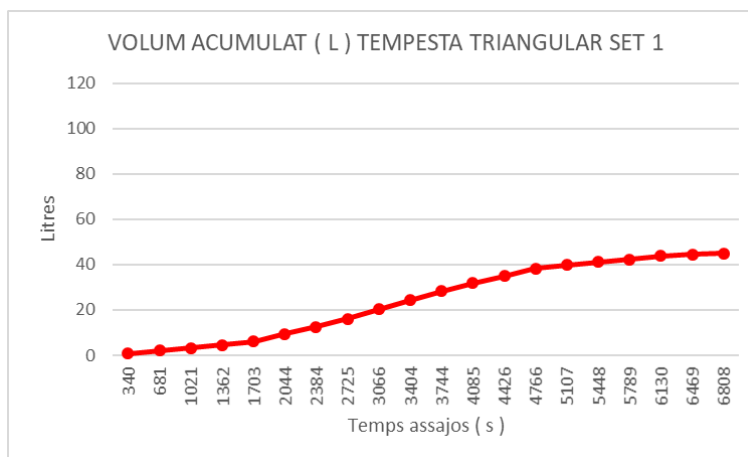


FIGURA 93: volum acumulat tempesta triangular set 1

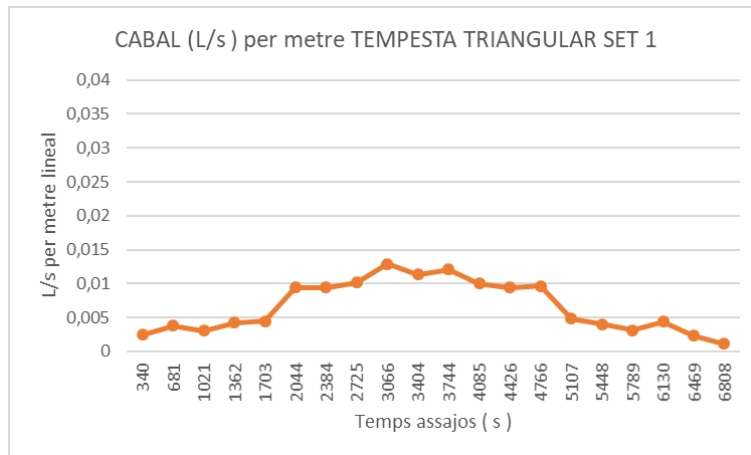


FIGURA 94: cabal per metre lineal generat set 1 tempesta triangular

SET 2

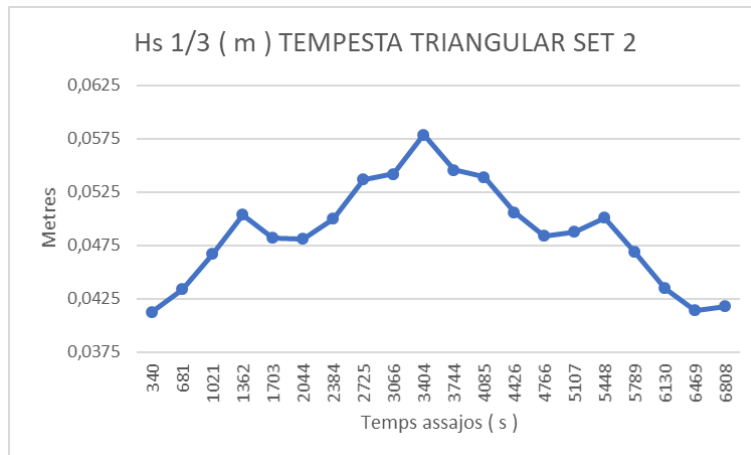


FIGURA 95: alçada d'ona significant tempesta triangular set 2

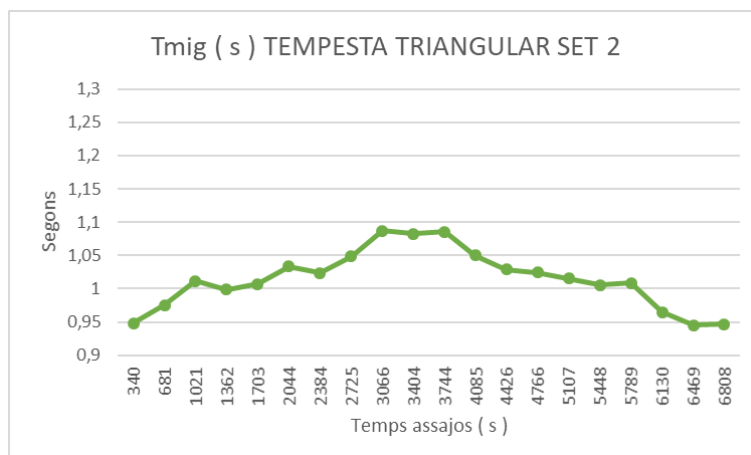


FIGURA 96: període mig tempesta triangular set 2

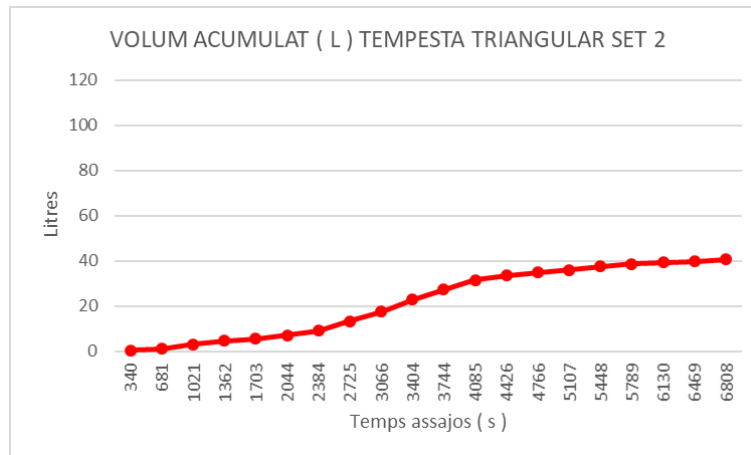


FIGURA 97: volum acumulat tempesta triangular set 2

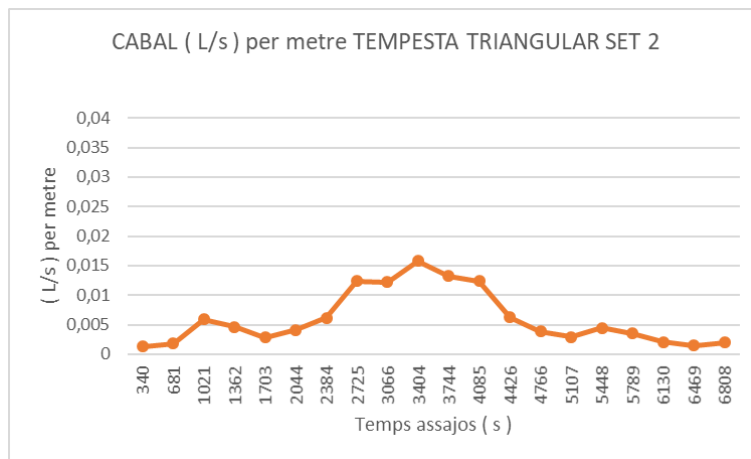


FIGURA 98: cabal per metre lineal generat set 2 tempesta triangular

SET 3

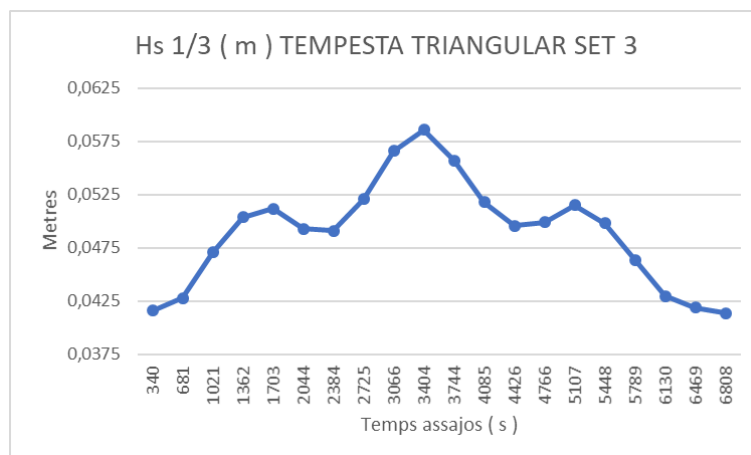


FIGURA 99: alçada d'ona significant tempesta triangular set 3

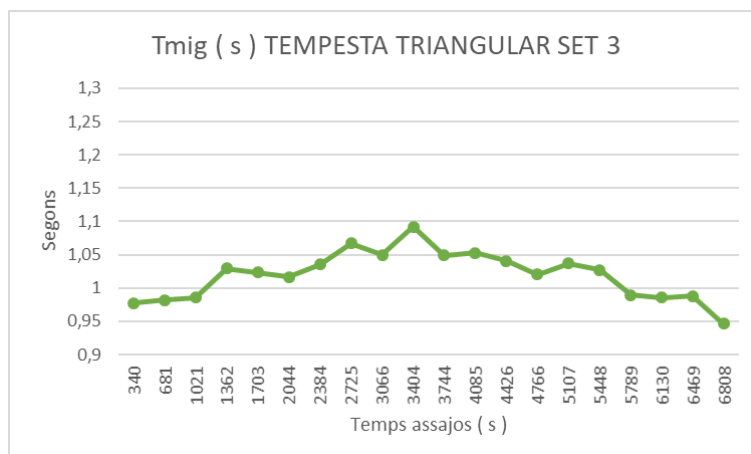


FIGURA 100: període mig tempesta triangular set 3

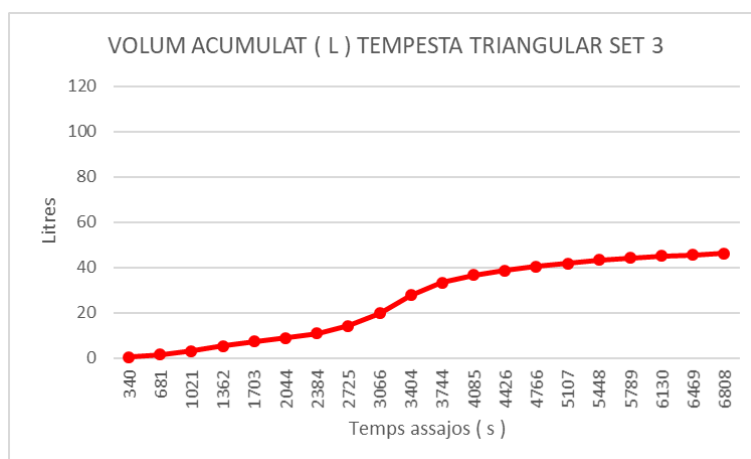


FIGURA 101: volum acumulat tempesta triangular set 3

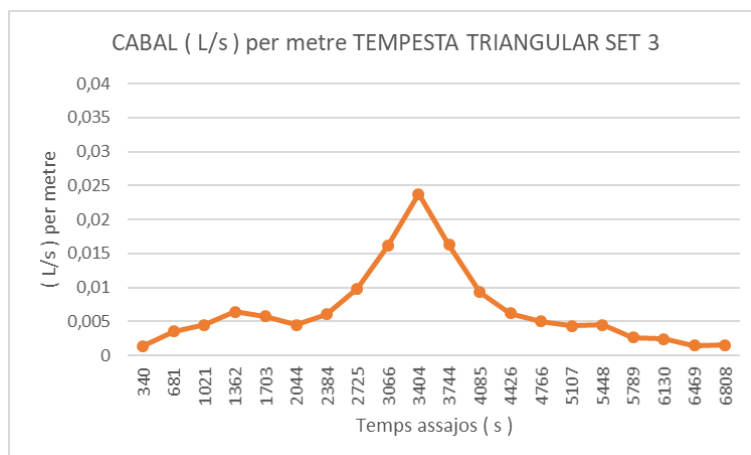


FIGURA 102: cabal per metre lineal generat set 3 tempesta triangular



## GRÀFIQUES OBTINGUDES A PARTIR DELS ASSAJOS GENERATS AMB LES DADES DE LA TEMPESTA TRAPEZOIDAL TEÒRICA

### SET 1

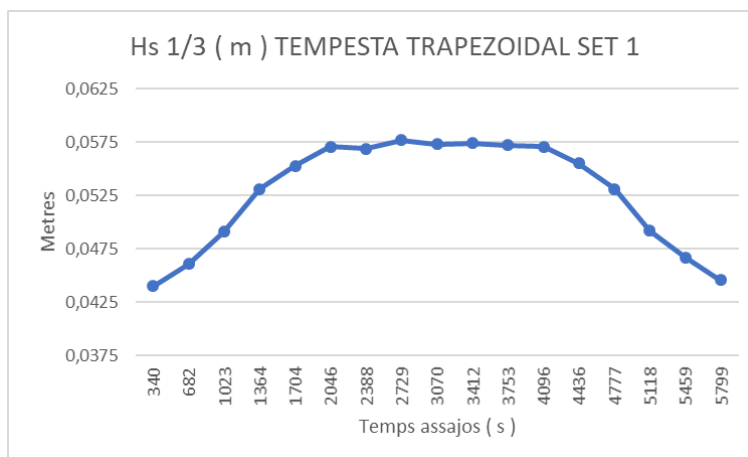


FIGURA 103: alçada d'ona significant tempesta trapezoidal set 1

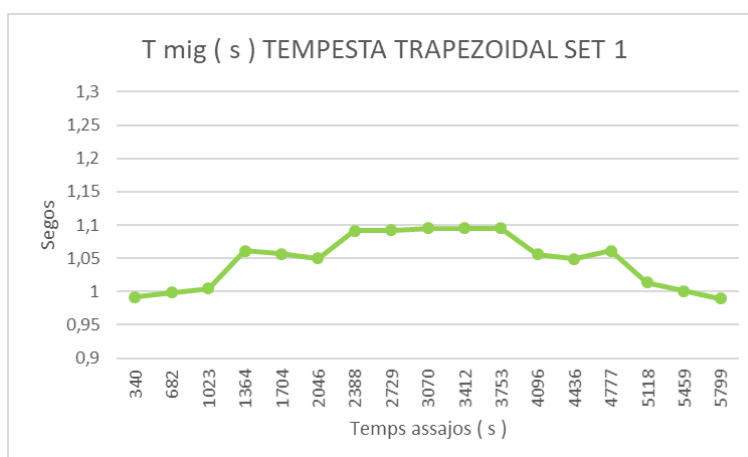


FIGURA 104: període mig tempesta trapezoidal set 1

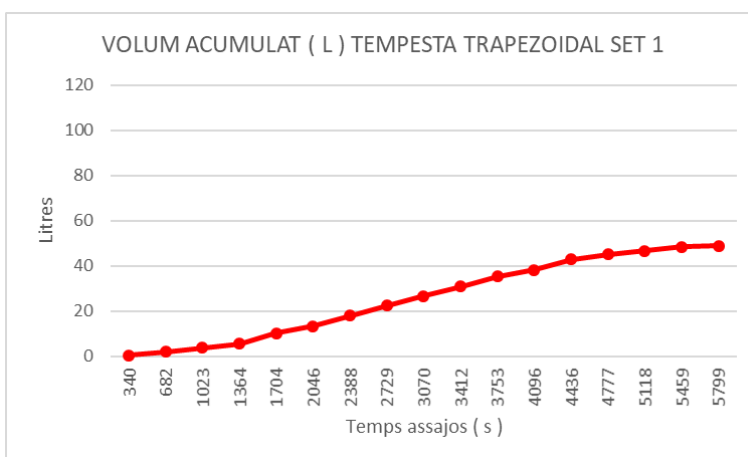


FIGURA 105: volum acumulat tempesta trapezoidal set 1

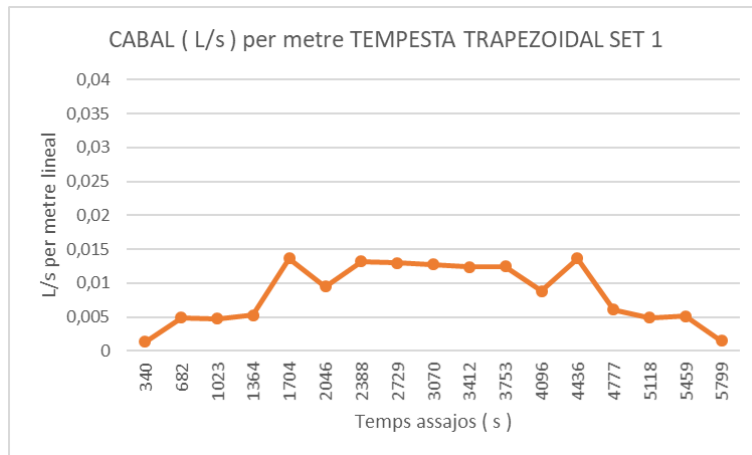


FIGURA 106: cabal per metre lineal generat set 1 tempesta trapezoidal

SET 2

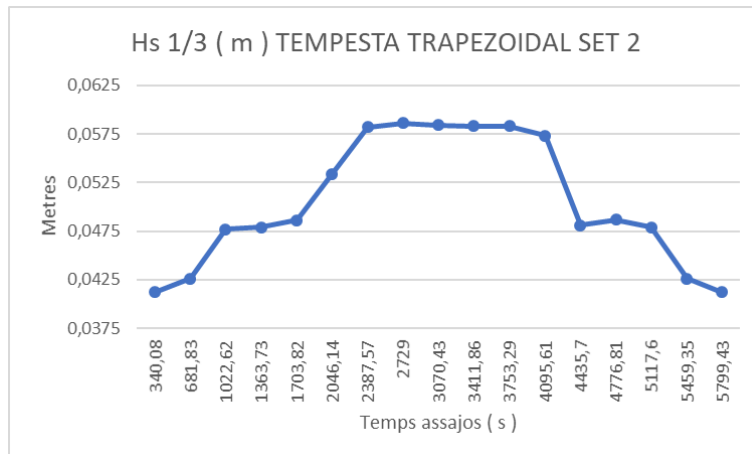


FIGURA 107: alçada d'ona significant tempesta trapezoidal set 2

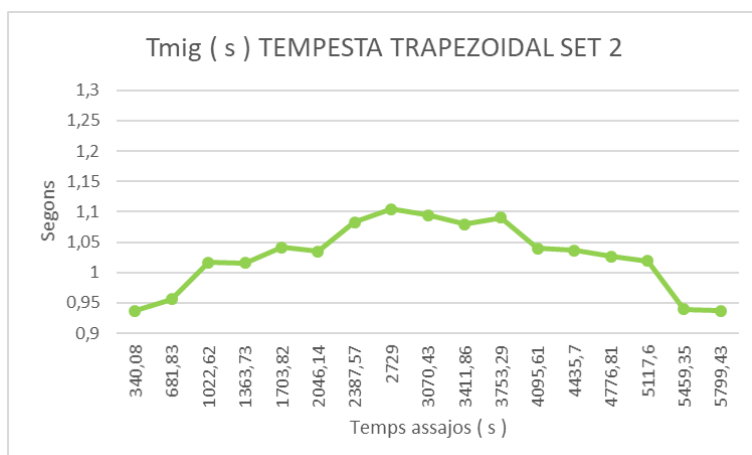


FIGURA 108: període mig tempesta trapezoidal set 2

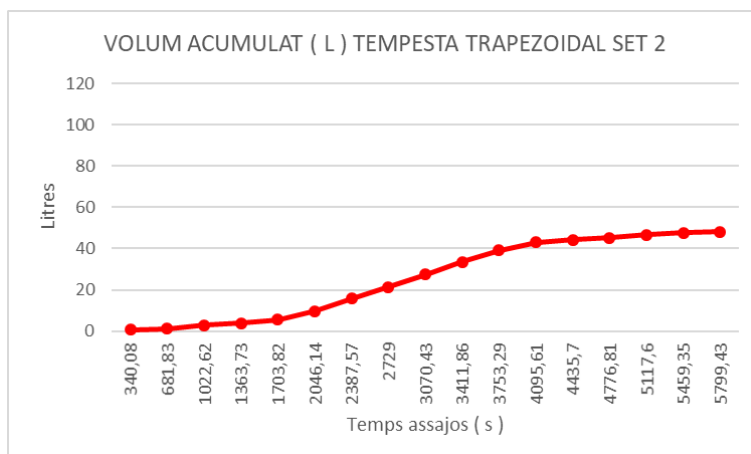


FIGURA 109: volum acumulat tempesta trapezoidal set 2

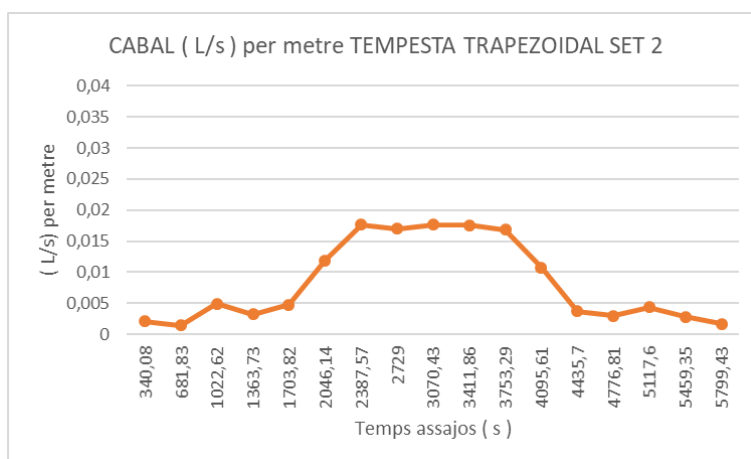


FIGURA 110: cabal per metre lineal generat set 2 tempesta trapezoidal

SET 3

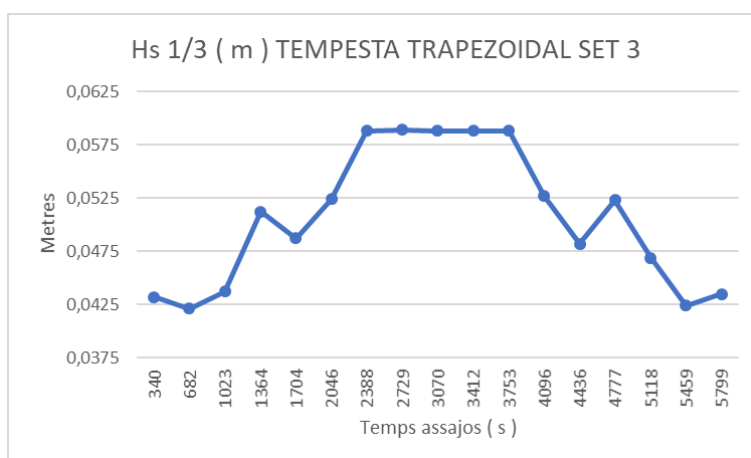


FIGURA 111: alçada d'ona significant tempesta trapezoidal set 3

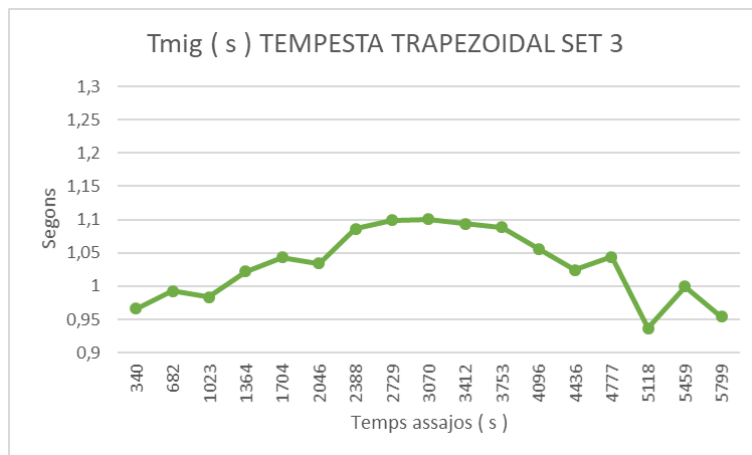


FIGURA 112: període mig tempes trapezoidal set 3

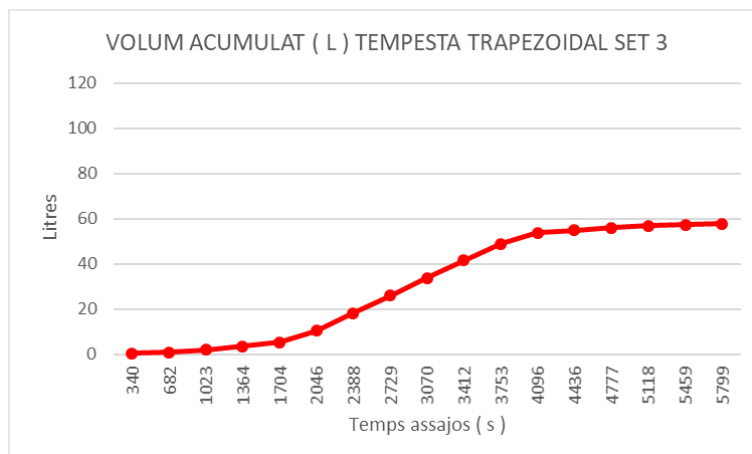


FIGURA 113: volum acumulat tempesta trapezoidal set 3

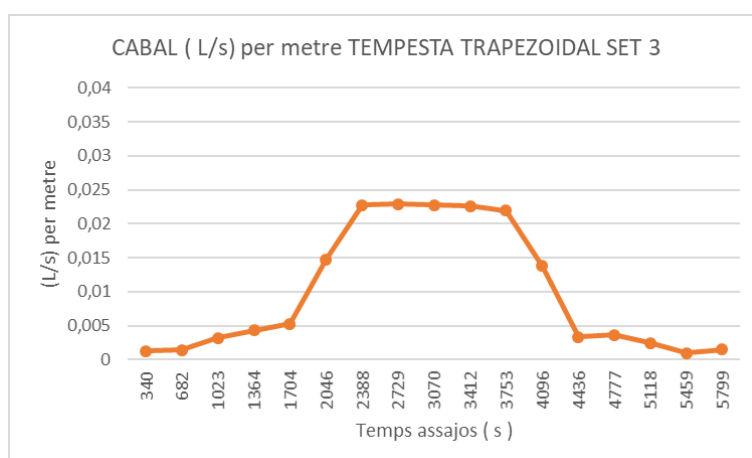


FIGURA 114: cabal per metre lineal generat set 3 tempesta trapezoidal

## GRÀFIQUES OBTINGUDES A PARTIR DELS ASSAJOS GENERATS APLICANT LA METODOLOGIA CLÀSSICA

En aquesta part de l'annex, les taules no estaran ordenades per sets sinó per tipologia de dades representades, ja que dona una visió més clara del general:

### ALÇADES D'ONA:

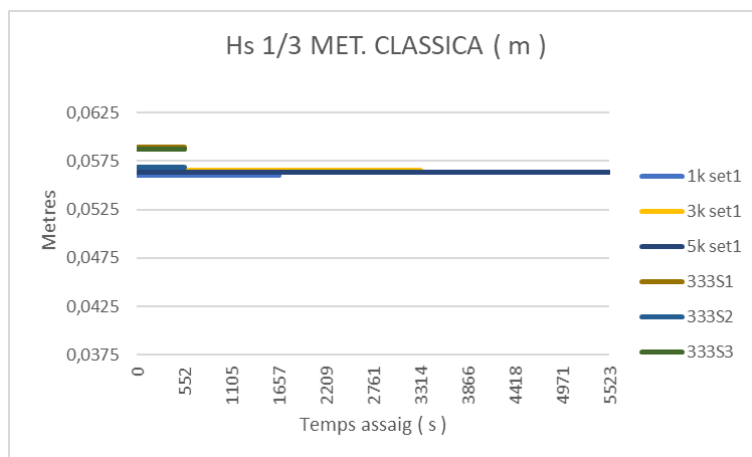


FIGURA 115: alçada d'ona significant set 1 assajos metodologia clàssica

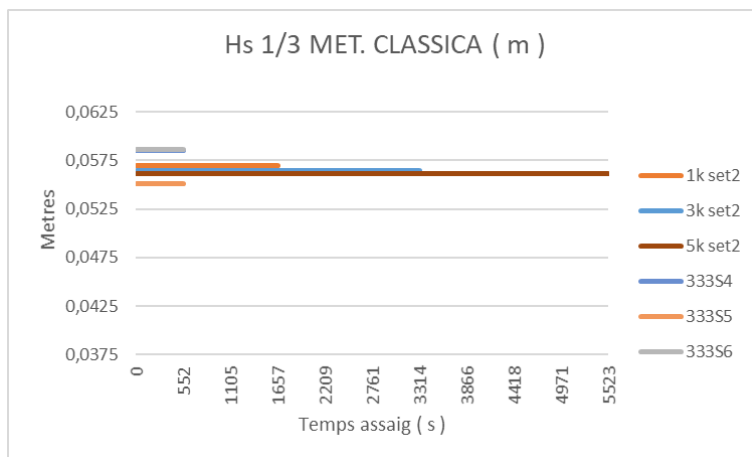


FIGURA 116 alçada d'ona significant set 2 assajos metodologia clàssica

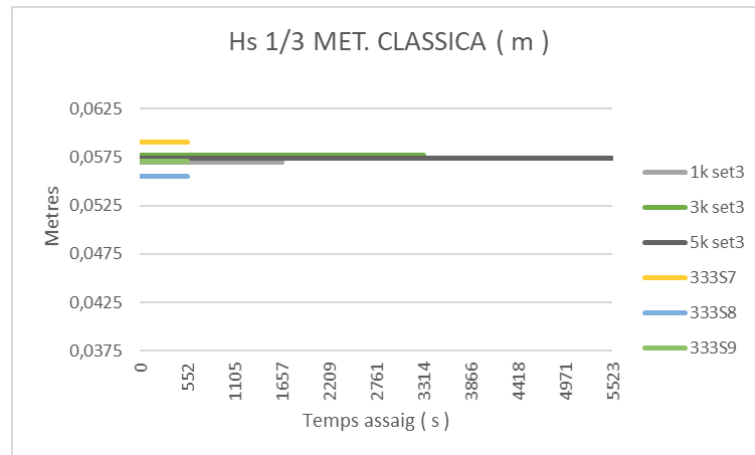


FIGURA 117: alçada d'ona significant set 3 assajos metodologia clàssica

## PERÍODES MITJOS

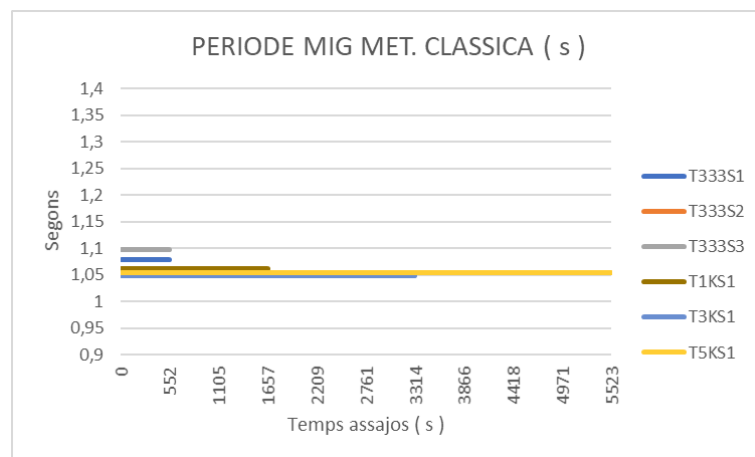


FIGURA 118: període mig assajos metodologia clàssica set 1

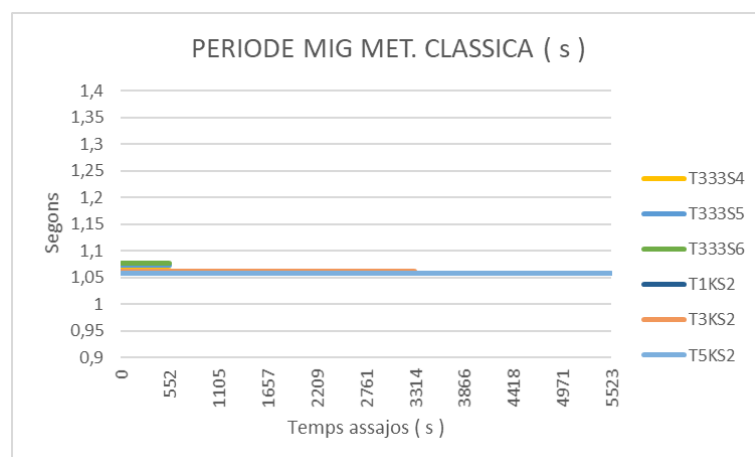


FIGURA 119: període mig assajos metodologia clàssica set 2

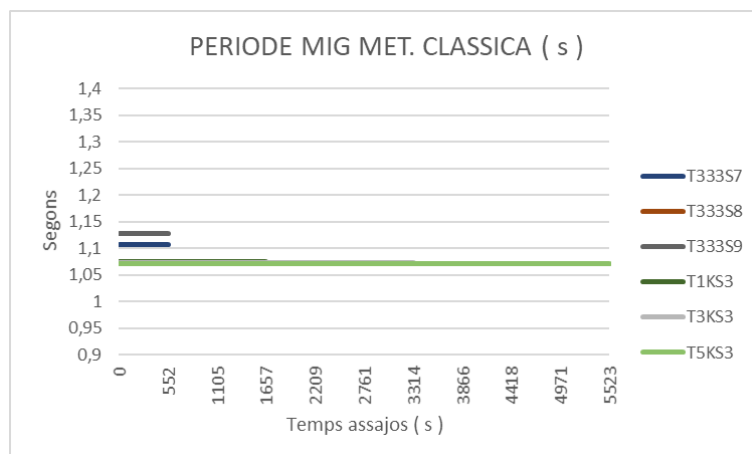


FIGURA 120: període mig assajos metodologia clàssica set 3

VOLUMS

ACUMULATS

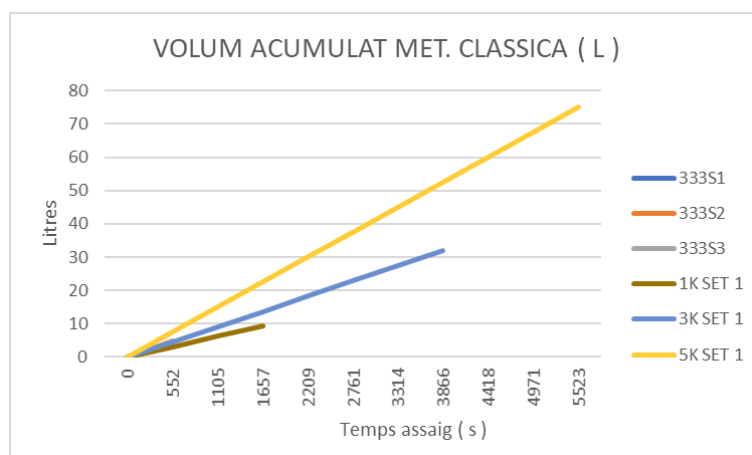


FIGURA 121: volum acumulat assajos metodologia classica set 1

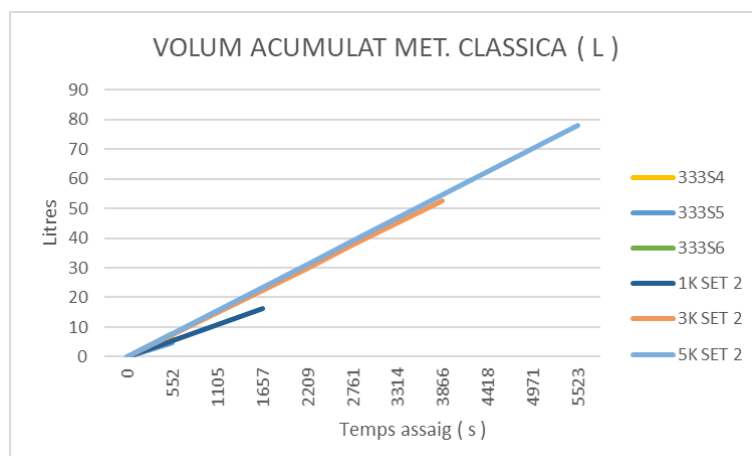


FIGURA 122: volum acumulat assajos metodologia classica set 2

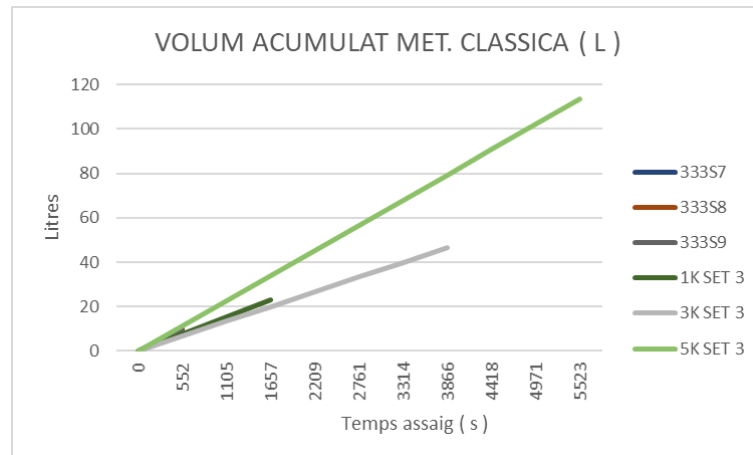


FIGURA 123: volum acumulat assajos metodologia classica set 3

### CABALS MODIFICATS

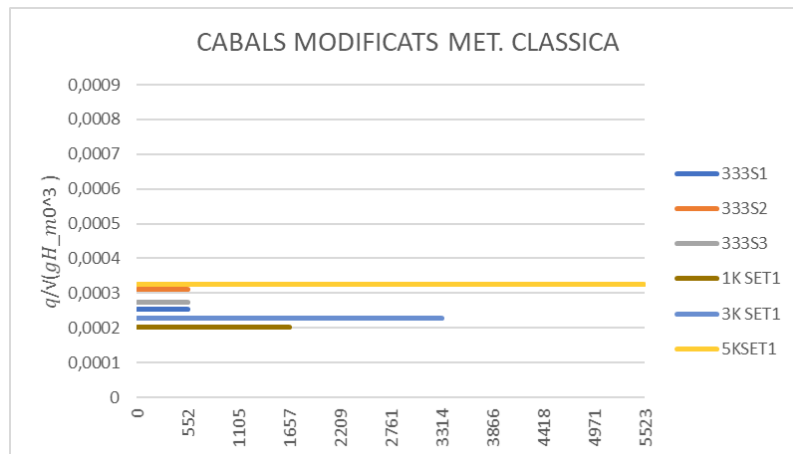


FIGURA 124: cabals modificats per a la comparació obtinguts d'assajos fets amb la metodologia clàssica set 1

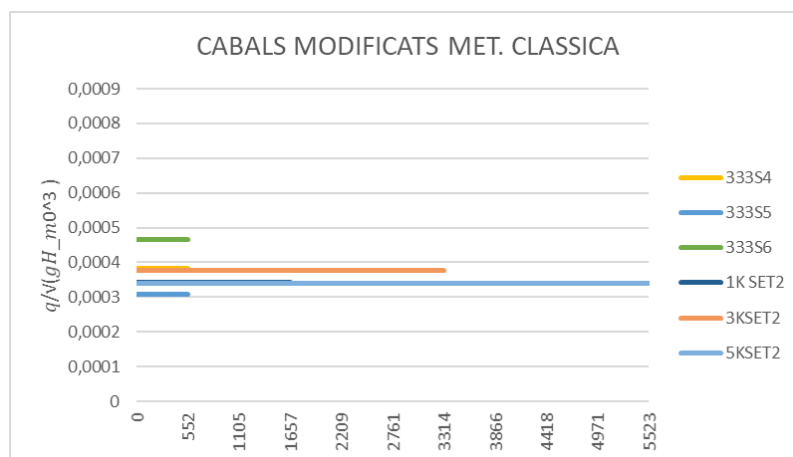


FIGURA 125: cabals modificats per a la comparació obtinguts d'assajos fets amb la metodologia clàssica set 2



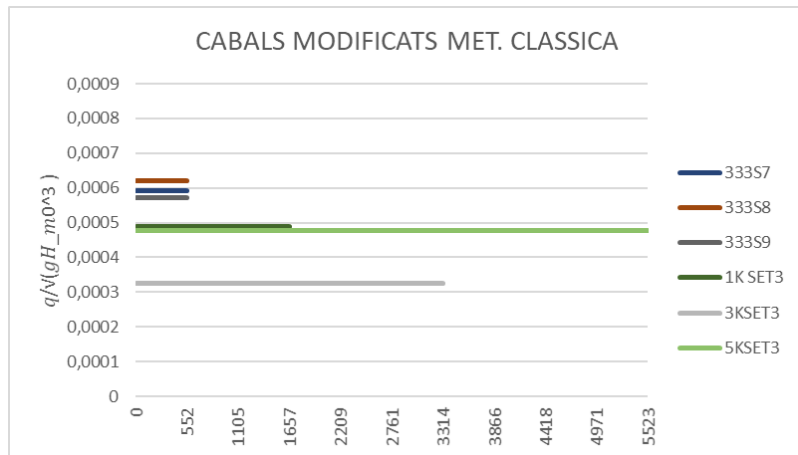


FIGURA 126 cabals modificats per a la comparació obtinguts d'assajos fets amb la metodologia clàssica set 3

## 9.2 ANNEX 2: CÈL·LULES DE CÀRREGA

Seguidament es detallen les prestacions i les característiques geomètriques de les cèl·lules de càrrega utilitzades en el sistema.



**Z6...**  
Load cells

Data Sheet

### Special features

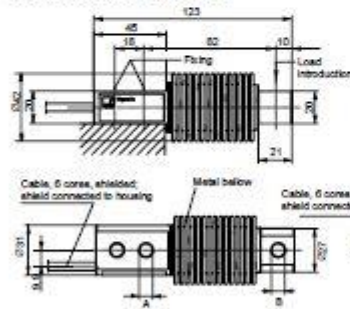


- Welded on metal bellow
- Max. capacities 5 kg...1 t
- Load cells and mounting aids entirely made from stainless material
- Complies with OIML R60 regulations up to 6000 d
- Six-wire circuit
- Optimized for parallel connection with corner-preadjustment
- Meets today EMC/ESD requirements according to EN 45501
- Explosion proof version acc. to ATEX 95 optional



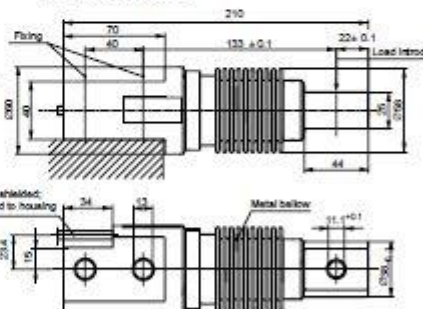
Dimensions (in mm; 1 mm = 0.03937 inches)

Z6; Max. capacities 5 kg...500 kg



	A	B
5, 200 kg	8.2	8.2
500 kg	10.5	11.1

Z6; Max. capacity 1 t



B1010-2.2 en



### Specifications

Type		Z6FD1	Z6FC3	Z6FC3MI	Z6FC4	Z6FC8				
Accuracy class according to OIML R 60		D1	C3	C3MI7.5	C4	C8				
Maximal numbers of load cell verif. intervals ( $n_{LC}$ )		1000	3000	3000	4000	6000				
Max. capacity ( $E_{max}$ )	kg	5; 10; 20; 50; 100; 200; 500	10; 20; 50; 100; 200; 500	50; 100; 200	20; 50; 100; 200; 500	50; 100; 200;				
	t	1	1	-	-	-				
Minimum load cell verification interval ( $v_{min}$ )	% of $E_{max}$	0.0360	0.0090		0.0068					
Min. dead load output return ( $D_{DR}$ )		-	-	$0.5 E_{max} / 7500$	-	-				
Sensitivity ( $C_n$ )	mV/V			2						
Tolerance on sensitivity	%	+1; -0.1		$\pm 0.05^{(1)}$						
Temperature effect on sensitivity ( $(TK_C)^{(2)}$ )	% of $C_n / 10 K$	$\pm 0.0500$	$\pm 0.0060$	$\pm 0.0060$	$\pm 0.0070$	$\pm 0.0040$				
Temperature effect on zero balance ( $(TK_0)$ )		$\pm 0.0500$	$\pm 0.0125$	$\pm 0.0003$	$\pm 0.0003$	$\pm 0.0093$				
Hysteresis error ( $d_{hy}$ ) <sup>(2)</sup>	% of $C_n$	$\pm 0.0500$	$\pm 0.0170$	$\pm 0.0066$	$\pm 0.0130$	$\pm 0.0080$				
Linearity deviation ( $d_{lin}$ ) <sup>(2)</sup>		$\pm 0.0500$	$\pm 0.0180$	$\pm 0.0180$	$\pm 0.0150$	$\pm 0.0110$				
Creep ( $d_{CP}$ ) in 30 min.		$\pm 0.0490$	$\pm 0.0166$	$\pm 0.0068$	$\pm 0.0125$	$\pm 0.0083$				
Input resistance ( $R_{i,C}$ ) (black-blue)	$\Omega$			350...480						
Output resistance ( $R_o$ ) (red-white)		$358 \pm 0.2$		$358 \pm 0.12$						
Reference excitation voltage ( $U_{ref}$ )	V			5						
Nominal range of excitation voltage ( $B_U$ )				0.5...12						
Insulation resistance ( $R_{iA}$ )	G $\Omega$			> 5						
Nominal temperature range ( $B_T$ )				-10...+40 [15...+105]						
Service temperature range ( $B_{Su}$ )	$^{\circ}C$ [ $^{\circ}F$ ]			-30...+70 [-20...+160]						
Storage temperature range ( $B_S$ )				-50...+85 [-60...+185]						
Safe load limit ( $E_1$ )	% of $E_{max}$			150						
Breaking load ( $E_2$ )				$\geq 300$						
Max. capacity	kg	5	10	20	50	100	200	500	1000	
Permissible dynamic load ( $F_{dmax}$ )	% of $E_{max}$	100	100	100	100	100	100	70	100	
Deflection at max. load, ( $\varphi_{nom}$ ) approx. ( $\pm 15\%$ )	mm	0.24	0.3	0.29	0.27	0.31	0.30	0.6	0.55	
Weight (G), approx.	kg	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.3	
Protection class (IP) acc. to EN60529 (IEC529)		IP 68 (more rigorous test conditions: 100 h at 1 m water column)								
Material	Measuring body Metal below Cable entrance Cable sheath	stainless steel stainless steel stainless steel / Viton <sup>®</sup> PVC								

<sup>1)</sup> With Z6FC3/10kg load cell:  $\pm 0.1\%$

<sup>2)</sup> The data for deviation of linearity, hysteresis and temperature effect on sensitivity are typical values. The sum of these data meets the requirements according to OIML R60.

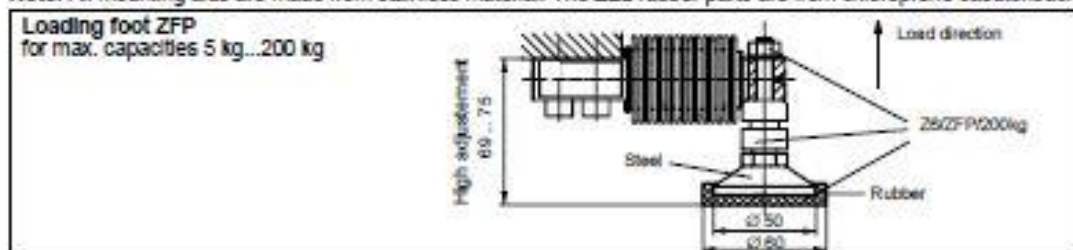
### Options:

Explosion-proof versions according to ATEX 95:

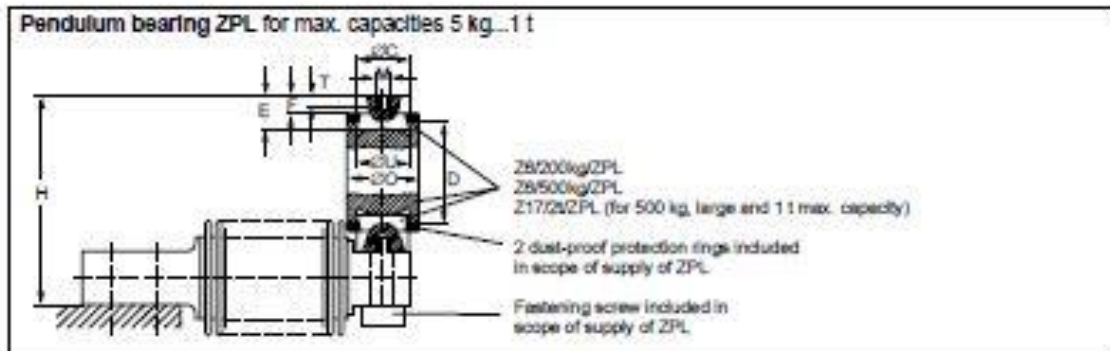
- II 2 G EEx Ia IIC T4 resp. T6 (Zone 1) <sup>\*)</sup>
- II 3 G EEx nA II T6 (Zone 2)
- II 2 D IP68 T80 $^{\circ}C$  (Zone 21) <sup>\*)</sup>
- II 3 D IP68 T80 $^{\circ}C$  (Zone 22 for non-conductive dust)
- <sup>\*)</sup> with EC-type examination certificate

Mounting aids, not included in scope of supply (Dimensions in mm; 1 mm = 0.03937 inches)

Nota: All mounting aids are made from stainless material. The ZEL rubber parts are from chloroprene caoutchouc.



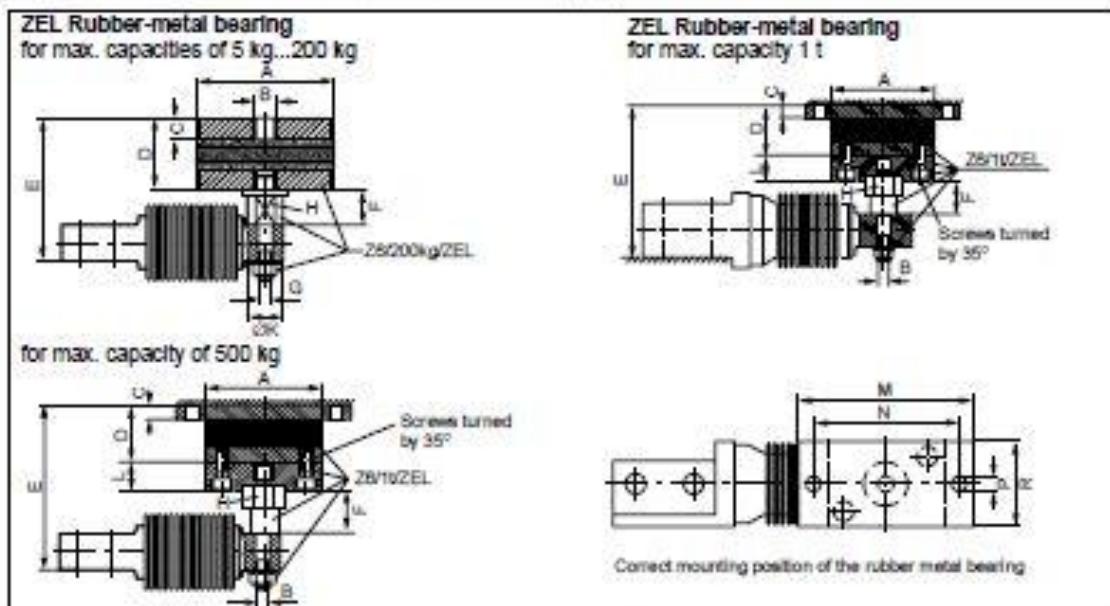




Max. capacity	Pendulum bearing ZPL	∅ C	D	H	M	∅ O	T	E	F	∅ U	$F_R^*$ (% of applied load)	$S_{max}^{**}$ (mm)
5...200 kg	ZB/200kg/ZPL	20 <sub>-0,2</sub>	45	80 <sup>+0,8</sup> <sub>-0,8</sub>	M8	30	6.5	17	9	20 <sup>h10</sup>	2.8	3.5
500 kg	ZB/1t/ZPL	20 <sub>-0,2</sub>	45	80 <sup>+0,8</sup> <sub>-0,8</sub>	M8	30	6.5	17	9	20 <sup>h10</sup>	2.8	3.5
1 t	ZB/1t/ZPL	30 <sub>-0,5</sub>	60	126.5	M10	46	8	22	14	20 <sup>h10</sup>	2	7.5

\*  $F_R$ : restoring force in N for  $s = 1$  mm

\*\*  $S_{max}$ : max. lateral displacement of load introduction loaded with max. capacity



Max. capacity	ZEL Rubber-metal bearing	A	B	C	D	E	F	G	H	K	L	M	N	P	R	$F_R$ (N)	$S_{max}^{**}$ (mm)
5 kg...200 kg	ZB/200kg/ZEL	75	M12	12	40	79 <sub>±1,3</sub>	18.5	M8	a.f. 17	19	-	-	-	-	-	163	3
500 kg	ZB/1t/ZEL	80	M10	10	39	106 <sup>+2,1</sup> <sub>-2,2</sub>	26	-	a.f. 27	-	20	120	100	9	80	400	4.5
1 t	ZB/1t/ZEL	80	M10	10	39	117 <sup>+2,1</sup> <sub>-2,2</sub>	26	-	a.f. 27	-	20	120	100	9	80	400	4.5

\*  $F_R$  = restoring force in N for 1 mm lateral displacement

\*\*  $S_{max}$  = in mm, max. lateral displacement of load introduction loaded with max. capacity

Modifications reserved.  
All details describe our products in general form only. They are not to be understood as express warranty and do not constitute any liability whatsoever.

**Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH**

In Tiefen See 45, D-64293 Darmstadt, Germany  
Tel.: +49 6151 803-0 Fax: +49 6151 803 9100  
Email: support@hbm.com Internet: www.hbm.com



measurement with confidence

B1010-2-2 en