



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**VALORACIÓN NUMÉRICA DE LAS CONDICIONES DE
OLEAJE Y MORFOLÓGICAS QUE PRODUCEN RESONANCIA
EN INSTALACIONES PORTUARIAS**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A N

Hernández Casas Jorge Luis

Zuñiga Castellanos Francisco Manuel

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

ÍNDICE

Introducción.....	5
Justificación del trabajo	6
Objetivos.....	7
Organización del trabajo	8
1 Introducción a la Ingeniería Portuaria.....	9
1.1 Antecedentes Históricos	10
1.2 Los Puertos en México.	12
1.3 Clasificación y tipos de Puertos.	14
1.4 Manual de Dimensionamiento Portuario de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.	19
2 Generalidades del dimensionamiento portuario	21
2.1 Introducción teórica.....	22
2.2 Manuales de dimensionamiento	31
3 Resonancia en Cuerpos de agua Semi-Cerrados	39
3.1 Teoría del oleaje.....	40
3.2 Agitación y resonancia.....	44
3.3 Análisis.....	50
3.4 Mitigación.....	51
4 Modelado Numérico	54
4.1 Ecuación de la pendiente suave.	55
4.2 Software MWAPO4.....	57
5 Casos de Estudio	61
5.1 Formas típicas de recintos portuarios	62
5.2 Primer geometría de estudio, Puerto en forma de U.....	69
5.3 Segunda Modelación, puerto con ampliación interior forma (P).....	87
5.4 Tercer caso de estudio, puerto con 2 zonas interiores (forma de Y)	106
5.5 Puerto De Veracruz	135
5.6 Puerto de Manzanillo	163
6 Conclusiones	203
Bibliografía	206
ÍNDICE DE TABLAS	207
ÍNDICE DE FIGURAS	208
Anexo. Archivos de Generación de Surfer®.....	214

Dedicatorias

Jorge,

A mi madre a quien dedico principalmente este trabajo, donde quiera que te encuentres sé que estarás orgullosa en lo que me he convertido y que siempre soñaste que fuera. A ti que me enseñaste a luchar por mis sueños, que anhelaste con ansias este día en que me convertiría en ingeniero, a ti te dedico esta tesis y este logro. Gracias por ser mi guía, inspiración y motivación, por darme la fuerza para continuar con cada recuerdo y enseñanza.

Para mi padre por ser el pilar al que le debo tanto, gracias por tus enseñanzas, por dar sacrificar todo en las peores instancias con tal de que no parara en mi camino. Me has enseñado tanto de la vida y ahora doy este paso gracias a tu formación, gracias padre por todo tu apoyo y aprendizaje, esto es para ti y espero llenarte de orgullo día a día.

A Estefany que me has apoyado incondicionalmente, este logro te lo dedico por todo lo que haces por mí, me empeño día a día por lograr que te sientas orgullosa de mi y esforzarme por salir adelante, te amo, gracias por todo. Mis hermanos, y familia, gracias por cada palabra y enseñanza que quedaron plantadas y hoy rinden frutos con este trabajo, el apoyo incondicional que me han dado y el esfuerzo que han puesto en mí para hacer cumplir cada uno de mis retos, en verdad gracias, los haré sentir orgullosos día a día ejerciendo de la mejor manera mi profesión.

Por último, a mis hermanos de vida Óscar, Salvador, Virgilio, Daniel, Aldo y Fernando, quienes siempre me han apoyado en cada logro y tropiezo, son parte importante de mi vida y quiero dedicar este trabajo a ustedes por las grandes enseñanzas y momentos compartidos. Y mis demás amigos por su apoyo, esto es para ustedes.

Francisco,

Este logro no hubiese sido posible sin mi familia y amigos, quienes de una manera u otra contribuyeron a esto. Me siento especialmente agradecido a mi familia, quienes me acompañaron desde el principio, y me ayudaron a encontrar mi camino, a pesar de toda la incertidumbre.

A mis padres, les agradezco haberme enseñado a vivir con valores, trabajar con honestidad y dedicación, a aprender la importancia de un trabajo bien hecho. Gracias por todas sus palabras de ánimo y sus “buenos días”, cada día, cada madrugada. Por mostrarme mis errores, y permitirme aprender a corregirlos. Por enseñarme humildad, pero también por enseñarme a valorar mi trabajo. Por enseñarme siempre a mirar más allá. Gracias por darme todo lo que necesite, y mucho más. Por darme las herramientas y ayudarme a encontrar lo que hoy es mi pasión.

Gracias por ayudarme a ser Ingeniero, pero, sobre todo, gracias por convertirme en una buena persona.

A mi hermana, que me ha dado su apoyo y su consejo, y a quién he tomado como guía desde mi infancia, quien me ha protegido y defendido hasta que pude hacerlo por mí mismo, y aún hoy, cuando soy yo el que tiene que defenderla y protegerla, lo hace. A ti, hermana, te agradezco que me hayas impulsado a buscar lo que me gusta, fuera lo que fuera.

A mi tía Angélica, mi tío Francisco, y mi primo Iván, por abrirme las puertas de su hogar, ayudarme a completar mi formación académica y comenzar mi formación profesional, ampliando horizontes que no había visualizado.

A mi prima Rosamaría, otro de mis modelos a seguir, gracias por tus consejos y por los disparates que también viví contigo. Gracias también por tu oído, siempre dispuesta y deseosa de escuchar todas esas cosas que poco a poco he logrado aprender.

A mis amigos, compañeros y hermanos que fui conociendo a lo largo de la carrera, con quienes pasamos innumerables noches y días de trabajo, y no solo trabajo.

A la Universidad, por darme una profesión.

Jorge y Francisco,

A Josué, gracias por tus enseñanzas y tu amistad, en estos años nos has enseñado lo importante de seguir adelante con tus consejos, gracias a ti logramos abrir nuestros horizontes, ver que es posible si lucha por lo que desees, aunque nadie confíe en ti; que el trabajo arduo y dedicado rinde frutos. Has sido parte importante en nuestra formación y te lo agradecemos, cada regaño, cada aliento hoy se ve reflejado en este trabajo y nuestro título.

Gracias Josué, por darnos la oportunidad de completar nuestra formación académica de forma práctica, por enseñarnos que siempre hay que tener humildad en todos los trabajos que hagamos, así como defender nuestro punto de vista. Gracias por dejarnos aprender de nuestros errores, y aprender a escuchar a las personas que nos quieren ayudar, y por dejarnos vivir las primeras experiencias en el mundo ingenieril. Creo que tu figura, como profesor, asesor, y amigo, es y será parte de nuestro desarrollo profesional, y gracias a tus enseñanzas y consejos, esperamos siempre con orgullo poder decir que aprendimos mucho de ti.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería es la base del mundo en el que nos desarrollamos, ha hecho posible materializar y desarrollar las ciudades en las que ahora vivimos, satisfaciendo nuestras necesidades, garantizando nuestro pleno desarrollo, todas las áreas de la ingeniería luchan a diario por hacer esto posible. Actualmente nos encontramos en un mundo cambiante, donde las necesidades crecen rápidamente, y exigen a su vez requerimientos más estrictos para lograrlo.

La ingeniería civil se enfoca en ser un engrane, para que todo esto funcione, desde los ingenieros estructuralistas que son capaces de diseñar grandes edificaciones para satisfacer un problema de crecimiento poblacional. Hasta las nuevas disciplinas que buscan integrar grandes obras en aspectos sustentables antes los problemas ambientales que nos enfrentamos. La diversificación de la profesión es muy grande, lo que pone a los ingenieros en un papel crucial e importante en el desarrollo de nuestra sociedad.

En México el desarrollo de ingenieros se remonta al año 1867, cuando se crea la carrera de ingeniero civil, por la escuela nacional de ingenieros. A partir de esa fecha la profesión ha ido creciendo, nutriéndose y diversificándose ante el crecimiento mundial y los nuevos retos a nivel mundial.

Una de las áreas que se desarrollan rápidamente en la actualidad es la ingeniería marítima y portuaria, debido a su importancia en el sector mercantil y turístico que representa para el país. Es un área que ha tenido un desarrollo reciente con los nuevos cambios normativos en cuestión de gestión portuaria, y que ha venido trabajando fuertemente en las últimas décadas en la parte técnica y de diseño.

El reto de la ingeniería marítima y portuaria, consiste en crear modelos que aproxime el comportamiento de los fenómenos oceanográficos, simplificando el diseño de infraestructura portuaria. Buscando optimizar el diseño eligiendo sitios protegidos, donde las repercusiones ambientales sean las menores, debido a que las costas son sistemas susceptibles. Un ingeniero debe buscar desarrollar su trabajo de manera eficiente, siendo consciente de las problemáticas, preparándose continuamente para dar soluciones concretas, de calidad y en forma íntegra.

JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La elaboración de este trabajo tiene como base la tendencia, tanto de nuestro país como a nivel mundial, del movimiento de grandes volúmenes de carga por la vía marítima. Dicha tendencia, reflejada en el incremento en los tamaños de las embarcaciones, capacidad de manejo, distribución de carga y optimización de las cadenas logísticas.

De esta manera, la infraestructura portuaria debe de actualizarse constantemente para poder seguir a la par de estas tendencias, evidencia de esto es la construcción del nuevo Canal de Panamá, así como la expansión y crecimiento de importantes puertos en América, en países como Ecuador, Honduras, y los puertos de la costa Este de Estados Unidos de Norte América.

Nuestro país cuenta con una privilegiada posición geográfica, teniendo más de 11,000 km de litoral; que no han sido explotados provocando un rezago en el comercio marítimo, comparado con otras potencias mundiales con menor extensión litoral. Sin embargo, las actuales administraciones han reconocido este problema y trabajan en la búsqueda de nuevos proyectos que generen una apertura comercial, mediante la ampliación y desarrollo de nueva infraestructura portuaria, que posicionen a México como un referente del comercio marítimo internacional.

Dada la importancia de estos proyectos, es vital hacer estudios que garanticen su correcto funcionamiento, por lo que es necesario conocer a detalle los efectos del medio físico (océano), que pueden ocurrir dentro de las instalaciones, para así poder brindar condiciones operativas y de seguridad apropiadas en el funcionamiento del puerto. En este trabajo, se da la tarea del estudio de la resonancia y agitación del oleaje en diversas formas geométricas de puertos, lo cual será de gran utilidad para el diseño de nuevos desarrollos y ampliaciones.

OBJETIVOS

El desarrollo de la siguiente tesis se basa en 4 puntos fundamentales, a partir de los cuales se sustenta teóricamente el trabajo. México, en su intento por catapultar los puertos de altura y formar parte de las cadenas logísticas comerciales internacionales, demanda urgentemente profesionales con los conocimientos necesarios para el diseño de la infraestructura requerida para esta labor. A pesar de que las principales dependencias encargadas de esta área cuentan con personal extremadamente calificado para realizar la tarea, es necesaria la elaboración de ayudas y guías básicas que permitan a nuevos profesionales incursionar en el área.

Este trabajo busca compilar los casos analizados de forma que se puedan utilizar como una ayuda de diseño geométrico de un recinto portuario, de manera completamente preliminar, y establecer un parámetro de comparación a partir del cual, el proyectista pueda comenzar a predimensionar la infraestructura.

Se busca utilizar herramientas computacionales, que permitan modelar lo obtenido en la teoría, con el fin de sintetizar información producto del procesamiento de gran cantidad de datos, haciendo uso de las herramientas desarrolladas por Doctores del departamento de puertos y costas del Instituto de Ingeniería de la UNAM, como lo son el Software WAPO y el Atlas Oceanográfico de las costas mexicanas.

Comparación entre las normas y recomendaciones mexicanas para el diseño de puertos contra normas y manuales internacionales, realizando un análisis puntual sobre los criterios más importantes en la infraestructura portuaria.

Comprobar las suposiciones teóricas y generales en casos particulares y reales, como son el puerto de Veracruz y manzanillo.

ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

En el primer capítulo, se hace una introducción histórica al desarrollo de la ingeniería portuaria, poniendo al lector en contexto para comprender la importancia que tienen los puertos en el desarrollo de las antiguas civilizaciones y las actuales naciones y potencias económicas mundiales. Además, se presentan los diferentes tipos de puertos que se han desarrollado debido a las diferentes necesidades que la humanidad ha tenido.

En el segundo capítulo se presentan bases teóricas sobre los métodos de dimensionamiento de la infraestructura portuaria, enlistando los diferentes componentes de un puerto y los factores que influyen para su dimensionamiento; posteriormente, se trasladaran estos principios hacia un área más técnica, aterrizándolos en el breve análisis de distintos manuales y recomendaciones de diseño internacionales.

El tercer capítulo busca responder a: ¿qué es el fenómeno de resonancia? Para ello en una primera parte se lleva el fenómeno a las formas más elementales, definiendo la forma de su movimiento, sus componentes y como una partícula se mueve en este arreglo armónico. En una segunda parte explica fenómenos más complejos de la interacción del oleaje con el medio y por último define las bases de la resonancia para entender cómo se genera y lo efectos que puede tener sobre las instalaciones.

En el cuarto capítulo, se explica el método numérico utilizado para dar solución al problema de la propagación del oleaje, introduciendo al lector a la teoría del oleaje y los efectos del fondo solucionada por la Ecuación de la Pendiente Suave; y así se presenta el software utilizado para el análisis de los casos de estudio de este trabajo de tesis, el software MWAPO_V4.

El quinto capítulo presenta los casos teóricos analizados y se enlistan los resultados encontrados, explicando con detalle aquellos casos cuyo resultado era relevante para el diseño geométrico de un puerto. Posteriormente, aplicando los conocimientos obtenidos a partir de los casos teóricos, se analizan los casos prácticos de aplicación en los puertos de Manzanillo y Nuevo Puerto de Veracruz, analizando con detalle cada uno.

1 INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA PORTUARIA

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La curiosidad natural del ser humano lo ha llevado a intentar conocer todos los ambientes del lugar donde vive, siempre tratando de expandir su conocimiento más allá de las fronteras físicas que lo limitan. Esto se ve traducido en su constante búsqueda de crear nueva tecnología, dispositivos que le permitan llevar a cabo las exploraciones que incluso, se extienden más allá de este planeta.

Los puertos surgen de la necesidad de crear embarcaciones para navegar, conquista de nuevos territorios y el transporte de alimento con aditamentos costeros para conservarlos, resguardarlas y abordarlas.

Los registros más antiguos conocidos indican que el ser humano primero utilizó las ensenadas, bahías y desembocaduras de los ríos, sin embargo, se encontró con el problema de las mareas, ya que en pleamar podía entrar y salir de estos lugares naturales de abrigo, pero en bajamar y con el azolve que generalmente se presenta en estas áreas, sus embarcaciones quedaban varadas sin posibilidades de hacerse al mar.

Para poder superar estos problemas, los pensadores de las antiguas civilizaciones comenzaron a estudiar distintas maneras para resolverlos, surgiendo así la ingeniería portuaria.

1.1.1 Ingeniería portuaria

La ingeniería de puertos es la planeación y diseño de las instalaciones para que los barcos descarguen o reciban carga y pasajeros. Dichas instalaciones abarcan desde las obras exteriores para la protección contra el oleaje, hasta las conexiones con otros medios de transporte y la infraestructura para el manejo adecuado de la carga.

Los orígenes de la ingeniería portuaria como tal, se remontan a la época de los antiguos griegos, quienes practicaban el comercio marítimo a través del Mar Egeo. Es en la ciudad de Biblos, Líbano, donde se encuentra el puerto más antiguo conocido en la historia, este puerto le confirió al pueblo fenicio su fama de grandes navegantes y constructores de embarcaciones. Se considera que el Puerto de Biblos, tenía las instalaciones adecuadas para que hoy en día se le considerara un puerto bien construido. Fue el principal puerto comercial que exportaba madera a los faraones egipcios.

El desarrollo de la ingeniería portuaria continuó con el desarrollo de las civilizaciones humanas, siendo impulsada por las ambiciones militares de las naciones que surgían. Fue también en el Mar Mediterráneo donde se descubrió el potencial que tenía la ingeniería naval y marítima como fuerza militar dominante en las guerras.

Los romanos, utilizando los conocimientos que fenicios, griegos, cartagineses y macedonios recopilaban por siglos de navegación comercial y militar, perfeccionaron el arte del diseño de puertos multipropósito, siendo el Puerto de Alejandría uno de los más representativos de la historia, además de tener gran importancia para el Imperio Romano.



Figura 1. 1. Puerto moderno (izq); restos de antiguo puerto (der)

En la actualidad, el Puerto de Alejandría tiene esencialmente el mismo arreglo que en los tiempos romanos, como se puede apreciar en la Figura 1.1, sin embargo, es considerada como la segunda ciudad más importante y el principal puerto de Egipto ya que maneja más de tres cuartas partes del comercio exterior de aquel país. Se compone en realidad de dos puertos (Este y Oeste) separados por una península en forma de T. El Puerto oriental es poco profundo y no es útil para grandes barcos. El Puerto occidental se utiliza para la navegación comercial.

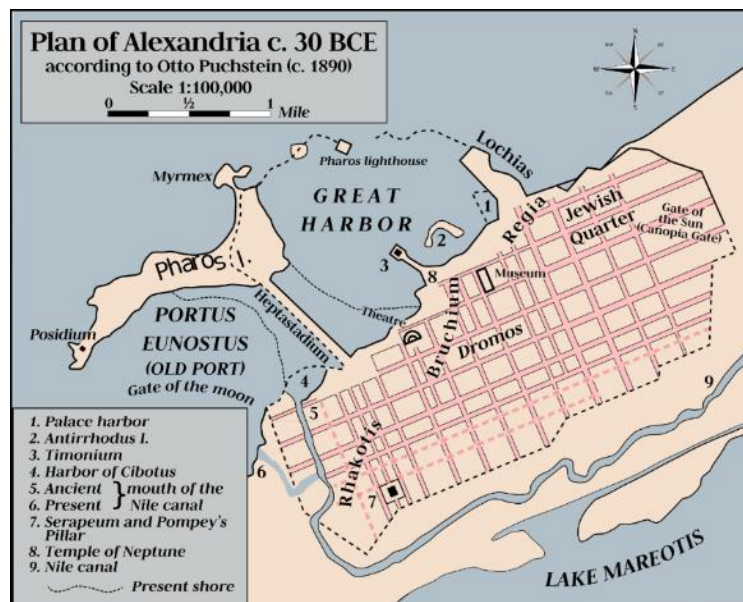


Figura 1. 2 Alejandría en la antigüedad



Figura 1. 3 Alejandría moderna

El desarrollo naval de las civilizaciones se estancó durante la Edad Media y el Oscurantismo, pero experimentó un impulso acelerado con las nuevas generaciones de exploradores y las rivalidades entre las potencias europeas, las cuales buscaban expandir sus imperios conquistando nuevas tierras.

Así, se desarrollaron algunos de los puertos europeos más importantes de la historia, como son el puerto de Rotterdam, el puerto de Cádiz, el puerto de Balboa, entre otros.

La invención de la máquina de vapor dio origen a barcos más grandes y con más capacidad, y con ello, invariablemente se incrementó la capacidad y tamaño de los puertos.

1.2 LOS PUERTOS EN MÉXICO.

A través de los puertos se fomenta el desarrollo económico, el intercambio cultural y el crecimiento de ciudades y naciones. Según estadísticas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de 2012, el transporte marítimo es el segundo más utilizado, sólo superado por el carretero, pues 29% del valor de las importaciones y 28% del correspondiente a las exportaciones se realiza por esta vía y por cada tonelada de carga que ingresó en ese año al país, salieron dos.

Adicionalmente, y dada la facilidad y eficiencia para desplazar grandes volúmenes de mercancías a largas distancias, es el medio que presenta mayor crecimiento, pues en el periodo comprendido entre el 2004 y el 2011, el valor de los flujos movilizados tanto al exterior como al interior presentó incrementos promedio anuales superiores al 15%.

En México existen 117 puertos cuya función es ser el punto de enlace entre el transporte terrestre y marítimo, por lo que cuentan con el espacio físico y la infraestructura que permite el intercambio logístico con otros medios, la realización de maniobras de carga y descarga de buques, así como el acceso y salida al mar de los mismos.

Los puertos de altura comerciales de mayor importancia, dado el tráfico de mercancías que presentan, son los de Veracruz y Altamira, en el litoral del Golfo de México, y los de Lázaro Cárdenas y Manzanillo, en el Pacífico. En conjunto, participan con 57% de la carga total, 95% de la contenerizada y 65% de la agrícola a granel, ésta última movilizada de manera importante, junto con la mineral y general suelta, por los puertos de Coatzacoalcos, Progreso, Ensenada, Guaymas y

Topolobampo. La Tabla 1 muestra un resumen de la carga marítima que se mueve en los puertos mexicanos.

La importancia de los puertos en el comercio exterior es relevante porque conforman nodos en la logística de transporte que permitirá su entrega y recepción apropiada y oportuna en las regiones de consumo; éstos permiten aprovechar el amplio litoral del país y las condiciones naturales locales y, con diferente alcance y especialización, son reconocidos a nivel global por la calidad y eficiencia de sus operaciones, situación determinante en el mantenimiento y consolidación de las relaciones comerciales nacionales e internacionales.

El incremento anual a nivel mundial del transporte de mercancías por mar, hizo que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes tuviera como prioridad la modernización de los puertos mexicanos. Esto se logró a través de la reforma portuaria en el año 1993, a partir de la cual se crearon las Administraciones Portuarias Integrales API's y se dio plena apertura a la inversión privada directamente sobre los recintos.



Figura 1. 4 Escudo de la Coordinación de Puertos y Marina Mercante

Las grandes ventajas que esto acarrió fueron la velocidad de modernización y el aumento de competitividad que experimentaron los puertos mexicanos. Como ejemplo en Manzanillo en un periodo relativamente corto (desde 1990 hasta 2002) mejoraron de manera significativa las condiciones del puerto.

Tabla 1. Movimiento de carga en puertos, 1994-2006

Año	Total	Carga General [Mill ton]	Carga Contenerizada		Granel Agrícola [Mill ton]	Granel Mineral [Mill ton]	Petróleo y derivados [Mill ton]	Fluidos [Mill ton]
			Mill Ton	TEU's				
1994	185.30	9.90	2.50	263,616.00	5.20	36.20	127.20	4.20
1995	186.20	8.00	5.40	569,410.00	5.20	44.80	119.10	3.60
1996	208.50	9.20	6.00	684,362.00	9.30	53.00	126.60	4.40
1997	219.60	11.80	6.70	902,875.00	8.00	51.50	137.30	4.30
1998	237.30	12.70	7.20	1,010,124.00	10.40	54.00	147.40	5.50
1999	231.40	13.10	8.40	1,117,763.00	10.10	51.80	142.20	5.70
2000	244.20	13.90	10.00	1,315,749.00	11.80	56.40	146.50	5.50
2001	244.40	12.70	10.10	1,358,662.00	13.00	51.90	151.40	5.20
2002	253.00	15.20	11.80	1,564,673.00	12.30	51.20	155.60	6.80
2003	264.70	15.20	12.70	1,685,367.00	11.20	54.50	164.30	6.60
2004	266.00	17.50	14.60	1,903,845.00	9.30	55.90	161.70	7.00
2005	283.60	18.50	15.90	2,133,476.00	10.60	63.30	168.40	6.80

2006	287.40	21.10	20.30	2,672,782.00	12.00	62.80	164.20	7.00
------	--------	-------	-------	--------------	-------	-------	--------	------

Fuente: SCT, CGPMM, Anuario estadístico 1994-2006

Los puertos de altura mexicanos son muy importantes, debido a que cumplen una función esencial de enlace y regulación. Manzanillo actualmente es el puerto más importante del pacífico mexicano en el intercambio de mercancía contenerizada, manejando el 68% y el 46% a nivel nacional, con una participación del 67% del PIB de la región centro y bajo; una infraestructura de última generación y con 24.7 km de vía férrea para el manejo de la mercancía. Por otro lado, el puerto de Veracruz es el puerto más importante del golfo de México y del país, primer lugar en el intercambio de vehículos y de granel agrícola con 59.9% y 49% respectivamente, buscando con su ampliación convertirse en el puerto más importante de América Latina.

Lo anterior va de acuerdo también con los tipos de embarcaciones que transportan la misma carga, y las dimensiones de sus áreas de agua y de tierra están obedeciendo a estas dos condicionantes. Por los diferentes tipos de movimientos, el puerto adopta el carácter de punto de embarque o terminal, sin dejar de ser un enlace entre el origen y destino como un eslabón del sistema de transporte.

Esto da como consecuencia que en el propio puerto y sus zonas inmediatas deban localizarse almacenamientos, áreas de maniobra y transferencia; en algunos casos, instalaciones industriales para la transformación de la carga o bien su regulación en el caso de la entrada de estos productos al puerto y en el caso de salida, por vocación o regulación, de áreas para almacenamientos, maniobras y en el caso particular del petróleo de plantas o refinerías.

Aunque existen diversas definiciones de la palabra "Puerto", todas ellas son consistentes en cuanto a su contenido. La definición a continuación presentada, engloba esencialmente las funciones de un puerto:

"Puerto es aquel lugar formado de manera natural o por la acción del hombre que se encuentra en las orillas de un cuerpo de agua navegable, ya sean océanos, lagos o ríos, en donde las embarcaciones pueden anclar o atracar protegidos de las acciones del oleaje y el viento de la zona, además de permitir el intercambio de bienes, servicios y pasajeros entre el ambiente acuático y el terrestre."

Una vez establecidas las funciones fundamentales de un puerto, se pueden desprender puertos "especializados" en diversas tareas, surgiendo así distintos tipos de puertos.

1.3 CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE PUERTOS.

Existen diversas formas de clasificar a los puertos, los criterios para hacerlo abarcan desde el enfoque económico, el uso, su origen y su localización.

De forma general, se clasifican de la siguiente manera:

1.3.1 Por su Origen.

Naturales. Son ensenadas o áreas de aguas protegidas de tormentas y oleaje, de manera natural por la situación geográfica. La formación y localización de la entrada tiene tal forma que permite la navegación interior con gran quietud de oleaje. Los puertos naturales se localizan en bahías, estuarios de marea y desembocaduras de ríos.

Seminaturales. Son puertos que originalmente fueron puertos naturales, aunque no contaban con la suficiente protección para garantizar operaciones seguras y recibieron ampliaciones y obras de protección artificiales para mejorar su eficiencia, seguridad y capacidad.

Artificiales. Son puertos creados a partir de la transformación completa de una zona costera o las riveras de un río navegable. Estos puertos conllevan una gran planificación, requieren una inversión muy grande y requieren de varias etapas de expansión. Incluyen canales creados mediante

dragados, protección mediante rompeolas y zonas de agua con dársenas artificiales. La disposición de estos elementos es muy diferente entre sí. Generalmente son planeados con base en el impacto económico que generará a una región e incluso a un país.

1.3.2 Por su Función.

De Abrigo. *Cumplen con la tarea básica y original de brindar protección a las embarcaciones de las inclemencias del mar, y garantizar el intercambio seguro de bienes y pasajeros entre barco y tierra.*

Comerciales. Son puertos cuyo origen está basado en el comercio local o internacional, por lo que sus instalaciones son especializadas para el movimiento de grandes volúmenes de carga de distintos tipos. Su infraestructura incluye una adecuada transferencia modal y buenas conexiones para agilizar el movimiento desde y hacia el puerto.



Figura 1. 5 Puerto de Miami

Militares. Creados para la protección de las naciones. Incluyen infraestructura de carga pesada, astilleros de reparación, grandes depósitos y generalmente se encuentran cerca de los puertos comerciales de mayor tamaño y puntos estratégicos y vulnerables de las naciones.



Figura 1. 6 Portaaviones de puerto militar

Industriales. Son una variante de los puertos comerciales, aunque su ubicación e infraestructura dependen de las industrias predominantes en la zona de su construcción. Un ejemplo de este tipo de puertos es el Puerto de Coatzacoalcos, el cual está especializado en el intercambio de petróleo y gas natural, e incluso cuenta con una refinería dentro de sus instalaciones.



Figura 1. 7 Puerto industrial

1.3.3 Por su Navegación.

De Altura. Se le llama así a aquel puerto que está en condiciones de recibir embarcaciones de gran calado, por ende, de gran tonelaje y capacidad de carga. Esto es así debido a que requieren un canal con profundidades mayores a los que se pueden encontrar de forma natural, por lo que es importante que estos puertos cuenten con dragados periódicos para mantener los niveles de navegación. Otra característica importante de los puertos de altura es que reciben embarcaciones internacionales, siendo piezas claves de relaciones comerciales globales. En México, los Puertos de Altura están controlados por las Administraciones Portuarias Integrales, ya sea federales, estatales o concesionadas. Los principales 16 puertos de altura en México son: Guaymas, Ensenada, Topolobampo, Mazatlán, Puerto Vallarta, Manzanillo, Lázaro Cárdenas, Salina Cruz, Acapulco, Ciudad del Carmen, Altamira, Tampico, Tuxpan, Veracruz, Coatzacoalcos, Dos Bocas y Puerto Progreso.

De Cabotaje. En términos navales cabotaje es el transporte de carga y pasajeros entre puertos de un mismo país, navegando relativamente cerca de la costa; etimológicamente significa navegar de cabo en cabo y proviene del vocablo francés «caboter», que se refiere a la navegación realizada entre cabos. Esta categoría de puertos es más abundante que las de altura, ya que además, en éstos se puede recibir solo a embarcaciones de menor tamaño dada su limitada capacidad de carga y mediano dragado, por lo general y por la capacidad de las embarcaciones solo se realizan viajes de puerto a puerto cercano dentro del mismo país. Actualmente México cuenta con más de 40 puertos de cabotaje entre los cuales destacan: San José del cabo, Puerto Peñasco, Zihuatanejo, Puerto Escondido, Matamoros, Campeche, Isla Mujeres y Chetumal.

De Marea. Son puertos dedicados cuya actividad está determinada por los regímenes de mareas en la zona de operación. Cuando las mareas son adecuadas permiten su uso para traslado de bienes y pasajeros.

Las clasificaciones anteriores corresponden a criterios específicos para las cuales son útiles, por lo que no son las únicas, las “correctas”, o las más adecuadas en todos los casos, por lo cual, diversas organizaciones, empresas o instituciones tienen sus propias clasificaciones, que les funcionan de mejor manera debido a los objetivos que persiguen.

En México, el control sobre los puertos nacionales corresponde al Ejecutivo Federal a través de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, tal y como se encuentra pactado en la Ley de Puertos de 1993, quedando plasmado en su Artículo 1°:

La presente ley es de orden público y de observancia en todo el territorio nacional, y tiene por objeto regular los puertos, terminales, marinas e instalaciones portuarias, su construcción, uso, aprovechamiento, explotación, operación y formas de administración, así como la prestación de los servicios portuarios. Los puertos, terminales e instalaciones portuarias de carácter militar, destinados por el Ejecutivo Federal a la Secretaría de Marina para uso de la Armada de México, se regirán por las disposiciones aplicables en la materia.

En esta Ley se establece también la naturaleza de las **Administraciones Portuarias Integrales (API)**, a las cuales define como una sociedad mercantil MEXICANA a la que se le encomiende, vía concesión otorgada por el Ejecutivo Federal a través de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la planeación, programación, desarrollo y demás actos relativos a los bienes y servicios de un puerto para el uso, aprovechamiento y explotación de los bienes y servicios portuarios (artículo 38°, párrafo primero de la Ley de Puertos). La creación de estos organismos tiene como fin descentralizar el control y fomentar la competencia entre los puertos nacionales, impulsando así la eficiencia y el desarrollo en pro de la economía nacional.

De esta manera, los Puertos en México están bajo el control de las **Administraciones Portuarias Integrales**, de las cuales algunas están bajo el control de las sociedades mercantiles establecidas en la Ley de Puertos y otras están bajo el control directo de los Gobiernos Estatales o Federal; independientemente del caso, todas responden a la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante de la SCT.

La Secretaría de Marina, administra los puertos expresamente dedicados a operaciones militares, es decir, resguardo y defensa de las aguas y costas nacionales, y garantizar la protección de los recintos portuarios, en colaboración con las demás Instituciones Policiacas Federales y Municipales. Esto lo hace a través de una coordinación denominada Centro Unificado para la Protección Marítima y Portuaria (CUMAR).

La importancia que tienen los puertos en los países provoca que las instituciones gubernamentales encargadas de su manejo, generen lineamientos para la correcta construcción y operación de la infraestructura portuaria. Ejemplo de esto son países como Estados Unidos de América, España, el Reino Unido, la República de Chile, Japón.

En México, estos lineamientos se materializan en la Ley de Puertos, en cuanto a la parte administrativa, y el Manual de Dimensionamiento Portuario en lo concerniente a la infraestructura portuaria.



Figura 1. 8 Portada del Manual de Dimensionamiento Portuario de SCT

El Manual de Dimensionamiento Portuario es un documento editado por la SCT, a través de la Dirección de Puertos de la Coordinación de Puertos y Marina Mercante.

El objetivo de este Manual, es hacer un compendio de aquellos probados en la práctica de ingeniería portuaria, a través de diversas consultas a fuentes nacionales y extranjeras, entre las que destacan la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Navegación (PIANC) y la Agencia Internacional de Cooperación Técnica de Japón.

A pesar de tener una larga historia como HUB comercial (plataforma de intercambio) entre Asia y Europa, en nuestro país no se consideró a la ingeniería portuaria como una rama prioritaria de desarrollo, ya que se privilegió a la ingeniería de caminos para interconectar el territorio. Debido a esto, se carece de experiencia documentada en la construcción de puertos, ya que nuestros puertos actuales de mayor importancia datan de la época colonial, y se han ido expandiendo y modernizando conforme su demanda se incrementa, sin tener un adecuado plan de desarrollo. Un claro ejemplo de esta situación es el Puerto de Veracruz, el puerto de altura más antiguo del continente y el más importante del país en el comercio con Europa. Sin embargo, los conocimientos empíricos de la Ingeniería Portuaria Mexicana son reconocidos a nivel internacional, logrando que estos antiguos puertos sigan siendo operativos y competitivos en el mundo globalizado actual.

El actual Puerto de Veracruz es una expansión del original puerto español, con las adecuaciones necesarias para operar con los buques y equipos más modernos. Sin embargo, debido a su localización se ha llegado al punto en que no puede crecer más por lo que se ve saturado y representa un atasco en el transporte de mercancías, lo que provoca pérdidas millonarias por retrasos y falta de espacio para almacenaje.

De esta manera se pone en claro la necesidad de recomendaciones para la construcción y ampliación de los recintos portuarios, quedando plasmadas en el Manual de Dimensionamiento Portuario de la SCT.

El Manual fue editado en 2001, consta de 9 capítulos. Los primeros cinco capítulos, explican las condicionantes físicas para el diseño de la infraestructura portuaria, los métodos de cálculo, rangos permisibles y recomendaciones de seguridad, además del alcance y glosario de términos que se usa dentro del mismo. Centrándose principalmente en 2 capítulos esenciales; el capítulo cuatro que

establece los modos de interconexión con otros modos de transporte, y el capítulo 5 que es la piedra angular en donde se trata específicamente todo lo relativo al proyecto portuario, para puertos comerciales e industriales de altura.

El resto de los capítulos, se establecen los lineamientos de puertos pesqueros y turísticos, señalamientos marítimos, ayudas a la navegación; así como las normativas ambientales y usos de suelo relacionados con los proyectos portuarios.

1.4 MANUAL DE DIMENSIONAMIENTO PORTUARIO DE LA SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES.

El Manual de Dimensionamiento Portuario de la SCT presenta su propia definición de lo que es un puerto, que atiende a los objetivos de y alcances del documento en materia de regulación portuaria en nuestro país.

Dicha definición se presenta a continuación:

“Puerto. Lugar de la costa o ribera habilitado como tal por el Ejecutivo Federal para la recepción, abrigo y atención de embarcaciones, compuesto por el recinto portuario y, en su caso, por la zona de desarrollo, así como por accesos y áreas de uso común para la navegación interna y afectas a su funcionamiento; con servicios, terminales e instalaciones, públicos y particulares, para la transferencia de bienes y transbordo de personas entre los modos de transporte que enlaza.”

Aunque existen diversas definiciones de la palabra “Puerto”, todas ellas son consistentes en cuanto a su contenido. La definición a continuación presentada, engloba esencialmente las funciones de un puerto:

“Puerto es aquel lugar formado de manera natural o por la acción del hombre que se encuentra en las orillas de un cuerpo de agua navegable, ya sean océanos, lagos o ríos, en donde las embarcaciones pueden anclar o atracar protegidos de las acciones del oleaje y el viento de la zona, además de permitir el intercambio de bienes, servicios y pasajeros entre el ambiente acuático y el terrestre.”

Una vez establecidas las funciones fundamentales de un puerto, se pueden desprender puertos “especializados” en diversas tareas, surgiendo así distintos tipos de puertos.

1.4.1 Clasificación de Puertos de acuerdo con el Manual de Dimensionamiento Portuario de la SCT.

1. Por su Navegación:

- a) **De Altura.** Cuando atiendan embarcaciones, personas y bienes, en navegación entre puertos y/o puntos nacionales e internacionales.
- b) **De Cabotaje.** Cuando solo atiendan embarcaciones, personas y bienes, en navegación entre puertos o puntos nacionales.

2. Por sus Instalaciones y Servicio:

- a) **Comerciales.** Cuando se dediquen preponderantemente, al manejo de mercancías o de pasajeros de tráficos marítimo. Dentro de éstos, se podrán recibir embarcaciones de cabotaje y de altura, así como operar el tráfico comercial internacional; también por sus características físicas, los dedicados al movimiento petrolero y granelero (se incluyen minerales y granos).

- b) **Industriales.** Cuando se dediquen preponderantemente al manejo de bienes relacionados con industrias establecidas en la zona del puerto o terminal.
- c) **Pesqueros.** Cuando se dediquen preponderantemente al manejo de bienes relacionados con industrias establecidas en la zona del puerto o terminal.
- d) **Turísticos.** Cuando se dediquen preponderantemente a la actividad de cruceros turísticos y marinas.
- e) **Militares.** Destinados a la Secretaría de Marina para uso de la Armada de México.

3. Por su Uso.

- a) **Públicos.** Cuando exista obligación de ponerlas a disposición de cualquier solicitante.
- b) **Particulares.** Cuando el titular las destine para sus propios fines y a los de terceros mediante contratos.

Componentes de un Puerto.

Desde el punto de vista de los puertos, se consideran Obras Exteriores aquellas que se realizan en el mar, como son: rompeolas, escolleras, espigones de protección, protecciones marginales y dragados exteriores.

Las Obras Interiores, son las que se llevan a cabo en la zona terrestre de los puertos, como son: el dragado interior de canales y dársenas, obras de atraque, áreas de maniobra, áreas y edificaciones de almacenamiento, accesos y controles de la zona portuaria, así como los edificios administrativos o instalaciones para servicios de reparación y mantenimiento, y aquellas otras que sean necesarias para el funcionamiento del puerto.

Una clasificación objetiva de las obras o elementos constitutivos de un puerto, de acuerdo a la zona donde se localizan es:

AREAS DE AGUA

- Accesos al Puerto.
- Obras Exteriores.
- Bocana.
- Canal de Navegación.
- Fondeadero y Antepuerto Áreas de Maniobra.
- Dársenas de Ciaboga.
- Canales Secundarios.
- Dársenas de Maniobras Áreas de Servicio.
- Dársenas de Servicio.
- Otras.

AREAS TERRESTRES

- Muelles y Atracaderos.
- Zonas de Transferencia.
- Almacenamiento.
- Instalaciones Complementarias.
- Servicios Portuarios Generales y Especiales.
- Equipo y Maquinaria.
- Ayudas a la Navegación.
- Accesos Terrestres.

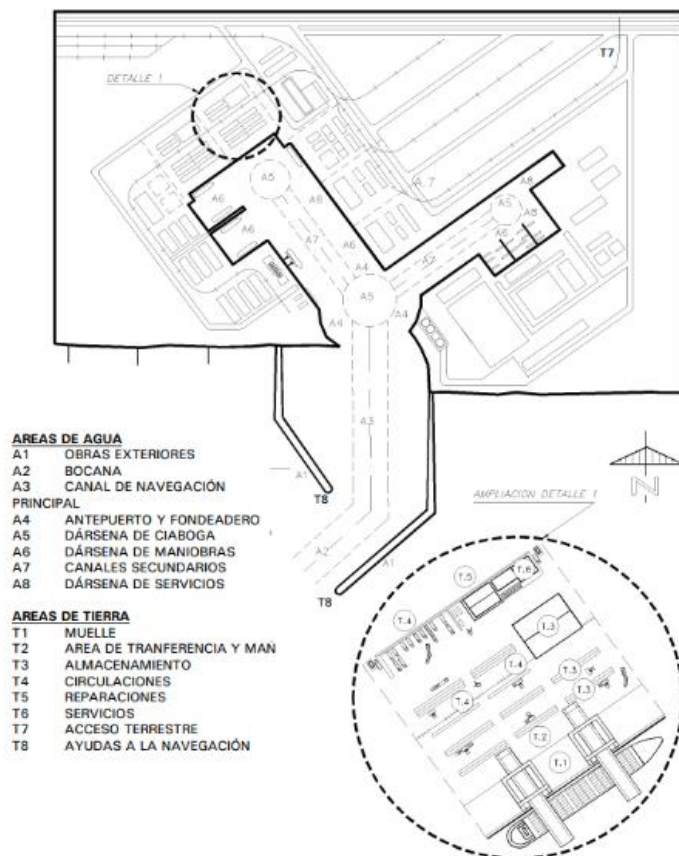


Figura 1. 9 Esquema general de las áreas de agua según el MDPSC

2 GENERALIDADES DEL DIMENSIONAMIENTO PORTUARIO

La ingeniería, en general, es una profesión de alto perfil social, ya que el objetivo primordial es el innovar, mejorar y facilitar los procesos o actividades que se realizan dentro de su campo de trabajo. Sin embargo, la Ingeniería Civil generalmente tiene un impacto aún mayor debido a que actúa directamente sobre el desarrollo social, económico y sustentable de las comunidades, además de verse en ciertas ocasiones limitada o impulsada por intereses políticos, por lo que toda obra de ingeniería debe de realizarse con una calidad ética y moral intachable.

La construcción de un puerto es un proceso complejo que debe ser llevado con extremo cuidado. Es así porque son obras de infraestructura de alto impacto, pilares para el comercio exterior y ejes económicos para el desarrollo de las naciones, además de requerir obras complementarias para que funcione adecuadamente, tales como vías terrestres, ferroviarias o aéreas para realizar una eficiente transferencia modal de carga o de pasajeros.

El dimensionamiento portuario es el conjunto de acciones y elementos que se deben tomar en cuenta para poder llevar a cabo la correcta planeación y construcción de un puerto, cualquiera que sea su tipo. La inversión económica que implica la construcción de un puerto junto con todas sus obras complementarias es muy grande, por lo que se deben de seguir perfectamente las etapas de Planeación, Diseño, Construcción, Operación y Abandono, siendo primordial para este trabajo, las de **Planeación y Diseño**.

La planeación de un proyecto portuario obedece a las principales fuerzas actuantes en el campo de la Ingeniería Civil. Las fuerzas sociales y las fuerzas ambientales. Las fuerzas sociales que influyen en la planeación de un puerto son, principalmente, las económicas, que determinan la importancia que tendrá el puerto en el desarrollo de la región o del país. Estas fuerzas no serán estudiadas en este trabajo, para esto el lector puede consultar libros de texto sobre la Ingeniería del Transporte, recomendando para esto el libro *Operación, Administración y Planeación Portuarias*, escrito por el Ing. Héctor López Gutiérrez y publicado por la AMIP.

Las fuerzas ambientales que afectan la planeación y diseño de un puerto son muy amplias y sus efectos están directamente relacionados con el tipo y tamaño del puerto que se trate, además de su posición geográfica.

2.1 INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Como se mencionó en el capítulo anterior, existen diferentes instituciones y organismos en cada país dedicados a establecer lineamientos para el adecuado diseño de los recintos portuarios. Estos organismos generalmente son de carácter gubernamental, apoyados por institutos de investigación como universidades o gremios ingenieriles. Un ejemplo de esto es Estados Unidos, ya que a través de su Departamento del Transporte emite lineamientos acerca de los rangos permisibles en las dimensiones de la infraestructura portuaria, pero además se basa en los manuales editados por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Estadounidense (US Army Corps of Engineers), por tener amplia experiencia en la construcción de puertos en muchas partes del mundo. Además del cuerpo de ingenieros, también se basan en las publicaciones técnicas emitidas por los diversos gremios de ingenieros como son la American Society of Civil Engineers (ASCE), la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la American Association of Port Authorities (AAPA).





Figura 2. 1. Organizaciones e instituciones con manuales y guías de diseño portuario

Este trabajo no tiene como objetivo el cálculo y dimensionamiento detallado de las estructuras portuarias, así que a continuación se presenta una breve descripción de las estructuras marinas, tanto de protección como de navegación, los factores principales a considerar en su cálculo y los principales métodos de acuerdo con la bibliografía teórica, por ejemplo, el Port Designers' Handbook, de Carl. A. Thoresen. Posteriormente se presenta la comparación entre algunos de los Manuales y Reglamentos más importantes del mundo, resaltando la diferencia entre los criterios de cálculo que consideran.

En el capítulo 1 se mencionan los principales componentes de un recinto portuario, así como sus descripciones generales. En esta sección se hablará un poco de cómo es el proceso de planeación de un recinto portuario, siguiendo los principios de la Planeación. De esta manera se definen los alcances y objetivos que el puerto debe de cumplir y las necesidades que debe satisfacer.

Se debe de establecer el objetivo a lograr con el alcance del proyecto: identificación de las necesidades y fuerzas decisivas dentro del entorno, así como información básica de todo tipo: económica de la región, ambiental, social, del estado de la infraestructura existente, etc.

Es importante contar con el registro de usuarios, tanto potenciales como seguros, para determinar el tipo y volumen de carga que el puerto deberá manejar, así como la conveniencia de planificar la construcción por etapas del puerto.

Con base en la información de los estudios preliminares y la determinación de las necesidades a satisfacer, se procede al pre dimensionamiento para afrontar los retos que se encontraron y hacer que el puerto sea lo más competitivo dentro de lo que la factibilidad económica lo permita.

2.1.1 Condicionantes físicas.

Estas determinan las dimensiones que el puerto requiere para poder manejar los volúmenes y tipos de carga que se han determinado como los predominantes. Con esto también se determinan los buques de diseño con los que se harán los dimensionamientos.

El buque de diseño es el barco más grande que el puerto podrá recibir, para lo cual se deberá tener la infraestructura adecuada, tanto para la navegación como para el adecuado intercambio de su carga con el puerto. Aunque el puerto puede sufrir ampliaciones con el paso del tiempo que obedezcan al cambio del buque de diseño, esto no es posible hacerlo en toda la infraestructura existente como las dársenas de maniobras o las bocanas, por lo cual es de suma importancia escoger adecuadamente este buque.

2.1.1.1 Tipos y especificaciones de los barcos.

- Tipos de barcos, ya sean de pesca, de carga, petroleros, de pasajeros, etc.
- Tamaño de los barcos.
- Frecuencia de uso por horarios del día.

2.1.1.2 Condiciones costeras y marinas del sitio.

- Corrientes dominantes, para prevenir la entrada de sedimentos al canal de acceso y prevenir la erosión en la zona por la disposición de la bocana.
- Determinar si la corriente requiere el uso de remolcadores y las dimensiones y colocación de las áreas para usar de fondeadero.
- Forma del canal de acceso.

2.1.1.3 Anclaje y áreas de tierra.

- Facilidad para el dragado y excavación de los canales y dársenas.
- Espacio disponible para las necesidades actuales y futuras.
- Conectividad con otros modos de transporte.
- Disponibilidad de servicios, como electricidad, agua potable, seguridad policiaca, servicios médicos.

2.1.2 Condiciones meteorológicas.

Las condiciones meteorológicas a considerar dentro del diseño de las estructuras portuarias básicamente son las condiciones del viento y las del oleaje, por obvias razones. Dependiendo la ubicación del puerto, las fuerzas sísmicas pueden tener mayor importancia por las olas generadas por estos movimientos, los tsunamis.

Las fuerzas generadas por el viento y el oleaje se separan en las normales y extraordinarias. Las primeras son las generadas por el régimen anual de viento y oleaje de la región, mientras que las segundas son generadas por eventos meteorológicos como huracanes y tormentas.

- Viento. Es necesario hacer observaciones anuales para establecer el régimen anual de vientos. Se recomienda tener 5 años de registros previos a la construcción del puerto. El régimen se representa por medio de la rosa de vientos con las frecuencias anuales, establecidas en porcentaje de tiempo. También presenta la intensidad del viento, medida en $[m/s]$ a 10 $[m]$ por encima de la superficie del agua. La intensidad se mide en escalas ya establecidas que clasifican la intensidad y la presentan en términos más entendibles. Además, dependiendo la escala, existen factores que correlacionan la intensidad con distintos factores para la obtención de las fuerzas generadas por dicha intensidad.

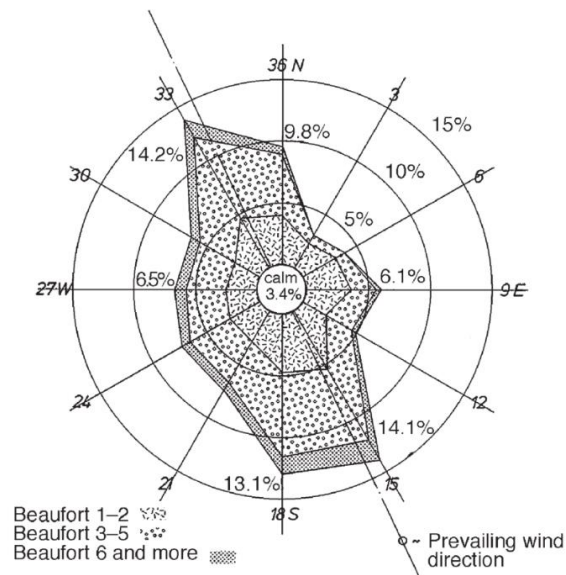


Figura 2. 2. Rosa de vientos, con escala de beaufort [port's Designer Handbook Thoresen. 3ed]

Una de las escalas para medición de vientos más importantes y usadas es la de Beaufort, la cual abarca 13 niveles, desde 0 a 12. La escala se presenta a continuación.

Tabla 2. Escala de Beaufort

Nivel	Nombre	Velocidad	
		m/s	Nudos
0	Calma	0.0-0.2	0-0.5
1	Ventolina	0.3-1.5	1-3
2	Brisa muy débil	1.6-3.3	4-6
3	Brisa Ligera	3.4-5.4	7-10
4	Brisa Moderada	5.5-7.9	11-16
5	Brisa fresca	8.0-10.7	17-21
6	Brisa fuerte	10.8-13.8	22-27
7	Viento fuerte	13.9-17.1	28-33
8	Temporal	17.2-20.7	34-40
9	Temporal fuerte	20.8-24.4	41-47
10	Temporal duro	24.5-28.4	48-55
11	Borrasca	28.5-32.6	56-63
12	Huracán	32.7+	64+

Cuando no se dispone de registros suficientes para establecer las frecuencias anuales de los vientos, se pueden utilizar escalas. Estas escalas funcionan tomando mediciones por periodos cortos de

tiempo y multiplicando las mediciones por valores establecidos para obtener los factores de ráfaga locales. Los factores de ráfaga se utilizan para definir la intensidad promedio a usar en el cálculo de la fuerza generada por el viento.

Las fuerzas que ejercen los vientos se calculan a partir de fórmulas que consideran su velocidad media 10 [m] sobre la superficie del mar. Estas fórmulas estiman las presiones generadas por el viento por [m²]. La siguiente gráfica muestra la relación entre las intensidades del viento según la escala Beaufort y la velocidad media, y la presión que ejerce esa ráfaga. (Fuente: Thoresen, Carl A., *Port Designer's Handbook*).

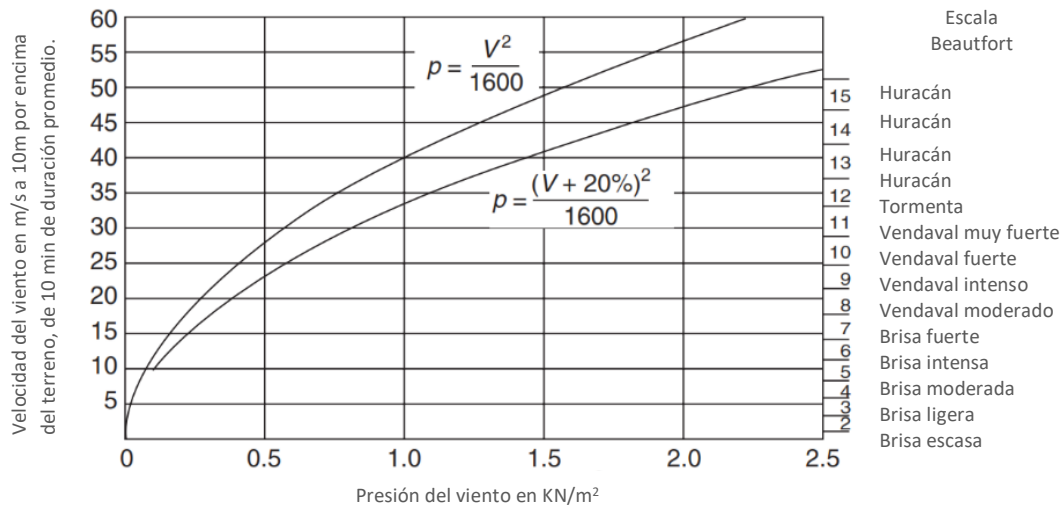


Figura 2. 3. Escala de Beaufort y su relación con la intensidad de viento y la intensidad media

- Oleaje. Las olas se clasifican de distintas maneras. Una de ellas es por su origen:
 - Olas Locales, o Sea. Son producidas por la fricción del bien to con la superficie del agua, en las inmediaciones del puerto.
 - Oleaje distante o Swell. Estas olas también son producidas por el viento, pero se generan mar adentro, a cierta distancia del puerto, por lo que el viento que las provoca, en ocasiones, no llega a sentirse en el puerto.
 - Oleaje de ondas largas o Seiching. Estas olas son de periodos muy largos, desde 30 [s] hasta la duración de las mareas meteorológicas (12 [h] 24 [min]). Son olas estacionarias, generalmente imperceptibles y se generan en espacios cerrados y semi-cerrados.
 - También existen olas generadas por la navegación de los barcos, que en ciertos lugares pueden ser significantes, los Tsunamis, generados por impactos repentinos como erupciones volcánicas, terremotos, etc. Y finalmente las olas de rompiente, las cuales son olas cortas que crean fuertes impactos sobre estructuras verticales, llegando a generar hasta 600 [kN/m²].
 - La otra forma de clasificar al oleaje es de acuerdo con la profundidad relativa, en la relación entre la longitud de onda y la profundidad relativa con el fondo oceánico.

2.1.3 Infraestructura.

En el capítulo 1, se menciona la manera en que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, a través del Manual de Dimensionamiento Portuario, divide a la infraestructura portuaria, Áreas Terrestres y Áreas de Agua. Es común hacer esta división dentro de la ingeniería portuaria, ya que de esta forma generalmente se facilita la administración del puerto. Así pues, la infraestructura que la compone también cae dentro de la separación mencionada.

2.1.3.1 Áreas de Agua.

- **Bocana.**

- Es la entrada del puerto. En términos hidrológicos se refiere a la desembocadura del río hacia el mar. En términos de ingeniería portuaria se refiere a la zona de navegación segura que lleva a las embarcaciones hacia el interior del puerto. Se compone de obras de protección y el canal de entrada. No debe confundirse con el antepuerto o fondeadero, aunque en ocasiones la bocana también da acceso a estas zonas.
- La orientación de la bocana influye en varios aspectos de suma importancia:
 - Su configuración debe ser tal que prevenga la entrada de sedimentos transportados por el oleaje y la corriente tanto como se pueda. Así, se reducirán los costos anuales de mantenimiento por dragado dentro del puerto.
 - Debe de proyectarse de forma que reduzca la entrada y propagación del oleaje dentro del puerto.
 - Debe considerar corrientes que puedan ayudar a la entrada de las embarcaciones.
 - Evitar corrientes de viento que afecten negativamente a las embarcaciones.

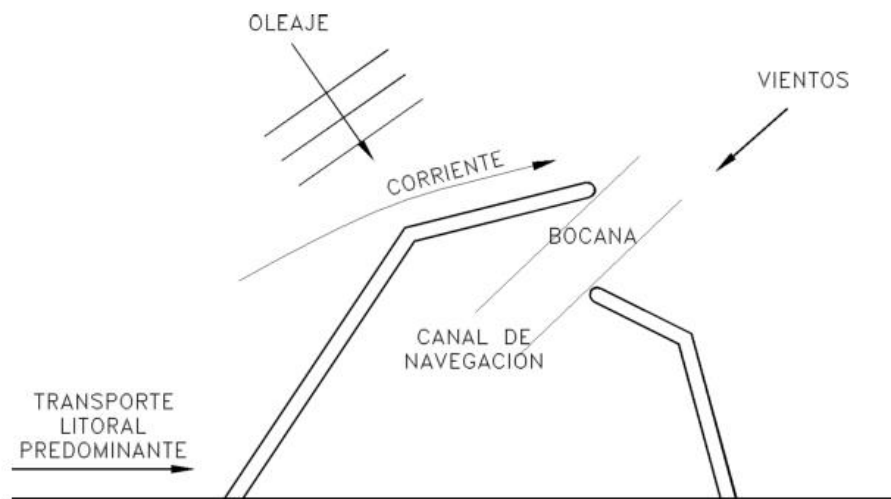


Figura 2. 4. Aspectos que influyen en el diseño de obras de abrigo y orientación de bocana, SCT 2001

Entre otros aspectos también es importante considerar la relación que tiene la bocana con las demás partes del interior del puerto, como el canal de acceso. La bocana debe de ser construida de manera que el canal de acceso tenga suficiente espacio para sus dimensiones proyectadas, de otra manera

se podrían tener afectaciones negativas. Un ejemplo de estas dimensiones es la *distancia de frenado*.

El ancho de la bocana, es el espacio que hay entre las obras de protección por el cual entrarán las embarcaciones. Este ancho tiene que ser definido con respecto al tráfico esperado en el puerto, así como el incremento en los años venideros. El Manual de SCT, recomienda los siguientes anchos, al menos como punto de partida para el dimensionamiento.

Tabla 3. Recomendaciones de ancho de bocana, MDP de SCT 2001

Tipo de Puerto	Ancho de Bocana [m]
Pequeño	90
Mediano	120-200
Grande	200-300

El resto de los manuales tienen sus propios criterios para el ancho de la bocana, incluyendo sí el tráfico es intenso, la dirección de la corriente y la intensidad de la misma.

Debe de cuidarse que el ancho de la bocana no sea mayor al necesario para garantizar la navegación segura, por lo que debe de establecerse el nivel de protección contra oleaje que se requiere. La velocidad máxima de la corriente a la entrada no deberá de superar 1.5 [m/s].

Distancia de Frenado.

La distancia de frenado, es aquella que requieren las embarcaciones para poder detenerse completamente antes de iniciar las maniobras de ingreso al Canal de Acceso. La determinación de esta distancia es un proceso complejo, debido a los muchos factores que influyen en el desplazamiento de un barco, como lo son el tonelaje, el viento actuante, la dirección del viento, el oleaje, la corriente y dirección del oleaje, la velocidad de ingreso del buque, la forma del fondo del barco de diseño, la potencia de sus motores e incluso la habilidad del maquinista a bordo.

De manera burda, se pueden asumir las siguientes recomendaciones, en las cuales se considera que son suficientes para detener un buque:

El siguiente esquema es un extracto del Manual de Dimensionamiento de la SCT, en donde se indican los aspectos a considerar en la orientación de la bocana.

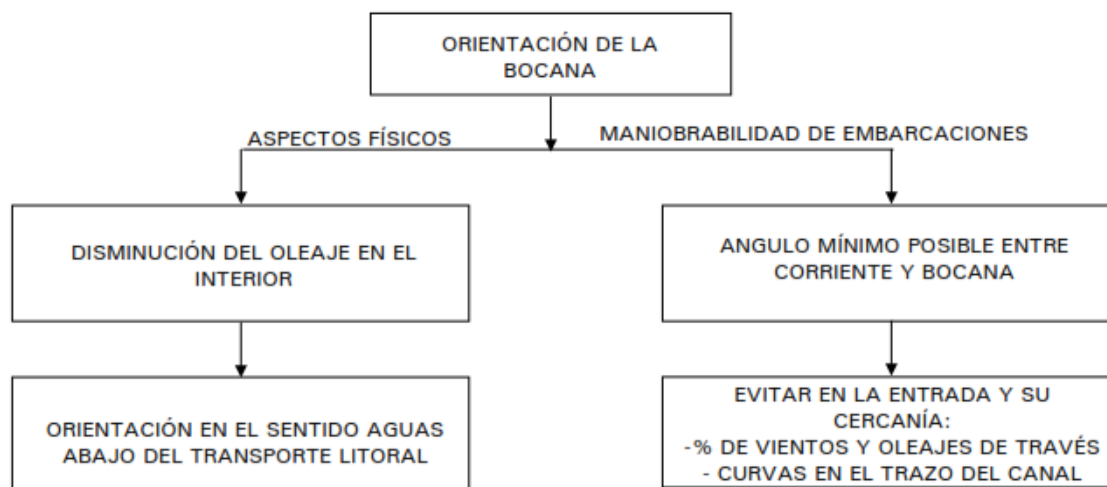


Figura 2. 5. Factores que influyen en la orientación de la bocana

Canales de navegación

Son las “calles” del puerto. Los barcos se transportan hasta sus respectivos muelles a través de los canales. Hay canales principales y secundarios. Dentro de los canales principales el más importante es el **Canal de acceso**.

De forma general, los canales de navegación se pueden dividir de la siguiente forma:

- Canales principales. Las rutas más importantes del puerto, con suficientes ayudas de navegación día y noche, y donde las profundidades de dragado están garantizadas.
- Canales primarios. Similares a los principales, pero con menos ayudas de navegación. Las profundidades también están garantizadas.
- Canales secundarios. Rutas importantes. Pueden tener ayudas de navegación y las profundidades son revisadas regularmente, aunque no están garantizadas al 100%.
- Canales auxiliares. Rutas de poca importancia en donde solo se tienen profundidades estimadas.

De igual forma los canales se subdividen en restringidos, semi-restringidos y libres, dependiendo la forma en que se haya dragado su trazo.

- Canales libres. Aquellos en aguas someras con un ancho de al menos 10-15 veces la manga del buque más grande. Estos canales no requieren dragado.
- Canales semi-restringidos. Canales en aguas someras, que sí requieren dragado ligero. Presentan la desventaja de requerir dragado de manera continua para garantizar la profundidad.
- Canales restringidos. Canales construidos artificialmente, completamente dragados.

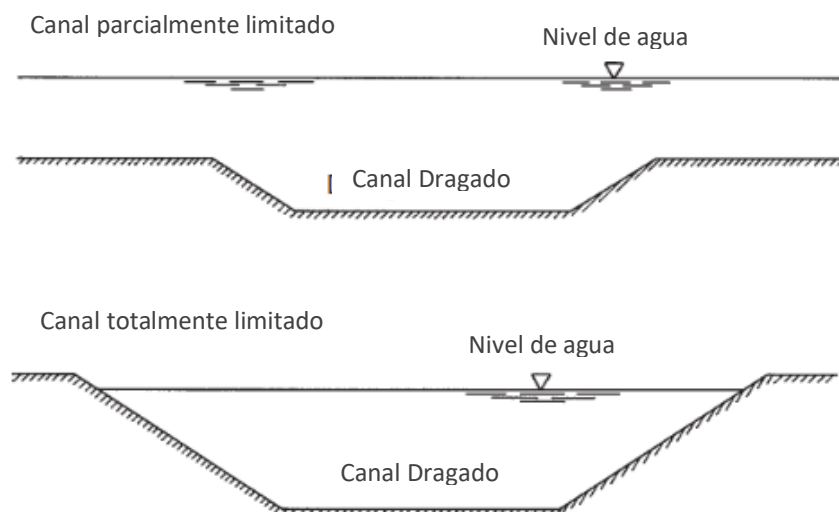


Figura 2. 6. Formas de dragado para canales de acceso (Thoresen, 2014)

El diseño de los canales deberá incluir espacios para maniobras, distancia de seguridad con respecto al borde del canal y, en canales con doble circulación, distancia de seguridad entre ambos barcos.

La medida del ancho del canal debe medirse a partir del fondo dragado del canal. De acuerdo con Carl A. Thoresen, se recomienda que el ancho del área de maniobras sea de 1.6 a 2 veces la manga del barco de diseño, considerando las condiciones de viento, maniobrabilidad y corrientes en el canal.

En los canales y puertos en donde haya tránsito intenso, es importante considerar los efectos que el desplazamiento de las embarcaciones genera sobre otras, ya sea en el mismo sentido (en situación de rebase) o en canales de doble sentido. También existen diversos criterios para determinar la distancia libre mínima entre embarcaciones que debe existir para absorber los efectos mencionados, y Thoresen menciona lo siguiente: deben de existir, como mínimo, 30 [m] de separación entre los barcos o la manga del barco de diseño, lo que sea mayor.

Por la forma en que se desplazan los barcos se genera un efecto de sobre hundimiento entre el fondo del canal y el barco, llamado **squat**. Se debe al paso del agua desde el frente hacia la parte trasera del barco, lo que en ese momento hace que el fluido se comporte de manera similar a una tubería, generando succión y así, hundiendo el barco.

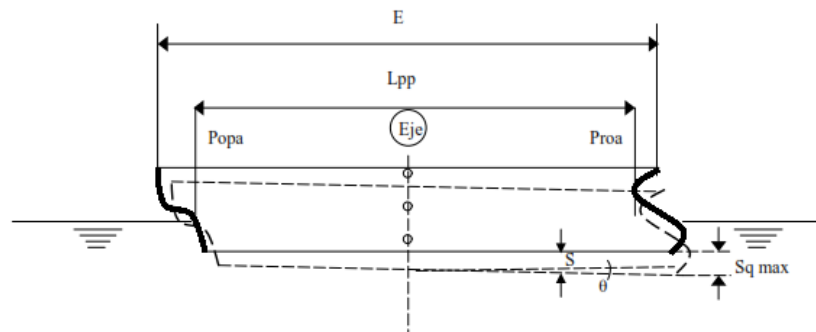


Figura 2. 7. Squat de un barco, SCT 2001

Adicionalmente al sobre hundimiento, también se genera un movimiento de exceso de guiñada (yawing). El fenómeno se puede evitar añadiendo un espacio adicional hacia los bordes del canal de entre 1 y 2 veces la manga del barco más grande. También es importante recalcar que los canales trapezoidales reducen estos efectos.

Finalmente se recomienda que el ancho total de canales principales sea de 3.6 a 6 veces la manga del barco de diseño, para canales de un solo carril, y de 6.2 a 9 veces la manga del barco de diseño para canales de dos carriles.

Generalmente, en el diseño del canal debe de evitarse a toda costa cualquier tipo de curvas o giros; sin embargo, cuando esto no es posible, el ancho mínimo del canal debe ser mayor en la curva al que se tienen en el canal recto, debido a las necesidades obvias por las dimensiones de giro y maniobrabilidad que requieren las embarcaciones. Curvas mayores a 10 grados deben de ser ensanchadas y se recomienda que sean por la parte interna de esta. Entre los factores para determinar las dimensiones de la curva se encuentran las condicionantes físicas del entorno, como las corrientes en el canal y las fuerzas del viento. Es válido considerar el uso de remolcadores para el giro de las embarcaciones, pero no es recomendable.

En caso que se requiera más de una curva en un mismo canal, deberá de existir un tramo recto de 1000 [m] entre cada curva, o 5 veces la eslora del barco de diseño, lo que sea mayor. Las recomendaciones anteriores son recomendaciones obtenidas de un libro de texto o una guía de diseño.

2.2 MANUALES DE DIMENSIONAMIENTO

2.2.1 Comparativo general de los Manuales de Dimensionamiento: Chile, Japón, US ARMY y México.

Como se ha expuesto en los capítulos anteriores los aspectos que influyen el diseño del puerto son muy diversos, desde afectos naturales, hasta las condiciones comerciales para una mejor localización. El dimensionamiento de los elementos que conforman al puerto no se rigen por normas específicas, cada país mantiene normas de acuerdo a las condiciones de sus costas. A continuación, compararemos el “Manual de Dimensionamiento Portuario” de la SCT, con manuales de diseño de otros países.

En su mayoría las diferencias son notorias enfocándose mucho a las condiciones locales, experiencias y modos de construcción de los países. Pero la estructura base de los elementos constitutivos del puerto se mantiene presente en todos, por lo cual no basaremos en este elemento para analizar cada manual. Enfocándonos únicamente en las estructuras de agua.

El principal documento técnico y legal sobre el cual se basan los Ingenieros Japoneses para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de su infraestructura portuaria es el “**Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan**” (de aquí en adelante llamado “Manual Japonés”), el cual es editado, producido y revisado por el Buró de Puertos, el Ministerio de Infraestructura, Tierra, Transporte y Turismo, el Instituto Nacional para la Administración de la Infraestructura y el Territorio, el Instituto de Investigación Portuaria y Aeroportuaria, y el Instituto del desarrollo de las áreas Costeras y Ultramarinas de Japón.

Este documento establece las filosofías de diseño que se deben seguir, además de asignar a cada etapa del proceso de planeación hasta la construcción una jerarquía, como la que se muestra en la siguiente figura.

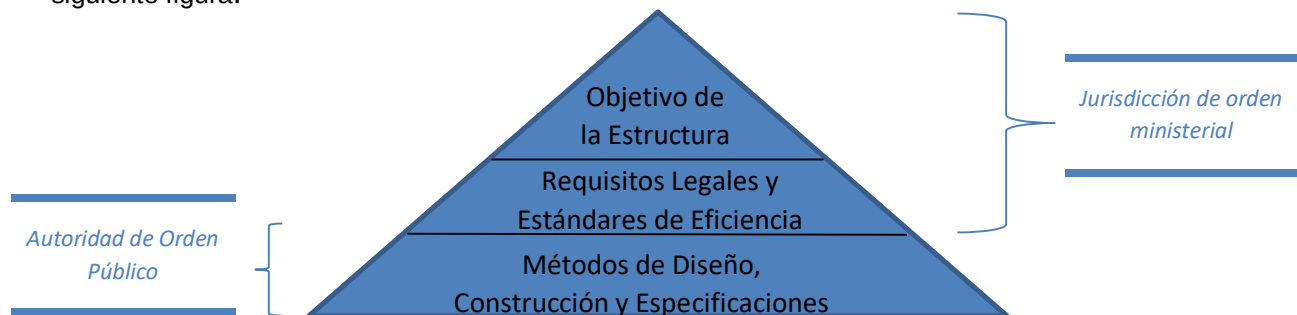


Figura 2. 8. Estructura del Manual de Diseño Japonés

Cada etapa de la pirámide se explica brevemente a continuación:

- **Objetivo de la Estructura.** En esta etapa se establece la necesidad que debe satisfacer la estructura, la razón por la cual será construida.
- **Requisitos Legales y Estándares de Eficiencia.** Establece los estándares de desempeño que debe de cumplir la estructura, así como los requisitos legales necesarios para que pueda cumplir el objetivo.
- **Métodos de Diseño, Construcción y Especificaciones Técnicas.** Aquí se establecen los distintos métodos comprobados por las Instituciones que editan estas normas, así como los requerimientos mínimos a cumplir y la manera de comprobar que las estructuras existentes cumplan con lo establecido en los “*Requisitos Legales y Estándares de Eficiencia*”.

Así mismo, dentro de la Jerarquía establecida, el “*Ministerial Ordinance Jurisdiction*” establece los criterios y especificaciones de mayor nivel, mientras que el “*Public Notice Authority*” establece los requisitos técnicos para cubrir las especificaciones del “*Ministerial Ordinance*”.

La principal diferencia que el Manual Japonés tiene con respecto al Manual de Dimensionamiento Portuario de la SCT, y respecto a la mayoría de las normas y manuales de diseño en el mundo, es el nivel de detalle y sensibilidad que exige aplicar para el diseño y los altos estándares que impone al funcionamiento de su infraestructura.

Cada capítulo provee información introductoria básica para poder comprender los fenómenos analizados, además de establecer los métodos de análisis que recomienda usar, e incluye diversas ayudas técnicas en forma de Tablas, Gráficas y recomendaciones para el diseño.

Los temas en común que comparten el Manual Japonés y el Manual de Dimensionamiento Portuario de la SCT son el de Meteorología y Oceanografía y el de Sismos y Terremotos. Sin embargo, presentan diferencias en cuanto al alcance que tiene en ambos temas.

El Manual Japonés analiza el tema del Viento, el Oleaje y las Mareas por separado, estableciendo las fórmulas para el cálculo de los parámetros usados en el diseño de la infraestructura, además de establecer los valores característicos de los fenómenos, y los casos en los que se pueden usar dichos parámetros en lugar de hacer los cálculos detallados.

En cuestión de oleaje, el Manual Japonés provee información de los conceptos básicos relacionados con las olas, su generación, propagación y transformación, hasta los tipos de oleaje y los efectos que causan en los puertos y barcos.

En el Capítulo de Mareas, el Manual Japonés es de los pocos a nivel mundial que tocan el tema de Resonancia Portuaria debido a las mareas. Proporciona el origen del fenómeno, así como formulas y métodos para determinar el periodo de resonancia de las tres formas más comunes de puertos.

Por otro lado, el Manual de Dimensionamiento Portuario de la SCT solamente presenta análisis estadísticos de las condiciones de marea astronómica, viento y oleaje para las distintas regiones costeras de nuestro país, por lo que su aplicación es estrictamente local, además de que no considera riesgo de Tsunamis.

A pesar de no tener el nivel de detalle que tiene el Manual Japonés, los métodos y los parámetros presentados en el Manual de la SCT, permiten un dimensionamiento más veloz y de manera más sencilla, aunque probablemente esto incurra en menor precisión.

Analizamos generalmente el Manual Japonés ya que los alcances de esta tesis son, dar una visión general de los diferentes criterios de diseño que se pueden tener en diferentes partes del mundo. Nos permitiremos continuar haciendo una revisión comparativa del manual de la SCT con otros manuales de gran importancia alrededor del mundo y con amplios aspectos de diseño.

El siguiente en la lista es el manual americano de diseño de instalaciones portuarias de la US ARMY, el cual basa todos sus criterios de los manuales de ingeniería de costas y estructuras portuarias del cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers). Esta institución es el más grande gremio estadounidense de ingeniería portuaria, su manual no era público en su última versión por tal motivo se decidió hacer el análisis del escrito de la US ARMY que es muy parecido.

El manual inicia de manera distinta a los anteriores ya que propone hacer un pre-análisis referido al lugar de posicionamiento del puerto. Si bien, los demás manuales dan por entendido que se tiene un lugar determinado para su construcción, no establecen estos criterios que llegan a ser importantes y convenir para poder prevenir muchos sucesos futuros que llegaran a complicar el diseño general de la obra. Algunos de estos aspectos son protección natural, la accesibilidad al sitio, área de costa, capacidad de desarrollo y análisis de que el área cumpla con los requerimientos solicitados por la obra, topografía del sitio, condiciones climatológicas e hidrología para un análisis completo.

Después encontramos una configuración general de los elementos constitutivos del puerto, muy parecido al manual de la SCT. Se menciona primeramente la localización y orientación del puerto, junto con los parámetros que debe de cumplir para su realización. Después encontramos el canal de acceso que a diferencia de la SCT no pone tanto énfasis en la maniobrabilidad del barco, si no en las dimensiones y tonelaje. Basado en lo anterior, establece los anchos recomendables para el

acceso, otro aspecto importante que considera son las corrientes, condiciones de agitación dentro y fuera del puerto, además de la posibilidad de tener afluentes en las cercanías del puerto.

Después establece los lineamientos para las obras de abrigo en este caso rompeolas y escolleras, que, a diferencia de la SCT, describe de forma más detallada. Los aspectos de diseño si varían ya que el manual de la US ARMY considera efectos de licuefacción, incluye formas escalonadas en taludes, orientación y considera el seiche (ondas estacionarias amplificadas en cuerpos cerrados). Incluye los rompeolas de pared que son estructuras de un análisis más complicado, ya tiene talud en su desplante y después se construye un muro recto que sirve de contención al oleaje, su forma varía de acuerdo a los requerimientos además que su análisis es más complejo; esta forma de protección no la encontramos en el manual de SCT.

Continuamos con las dársenas de servicio cuyos criterios son muy parecidos y no difieren en mucho, llegando a las cargas de diseño bajos las cuales se calculan las estructuras, el manual estadounidense utiliza un método de diseño diferente basado en los propuestos por el US Army Corps of Engineers. Además, que considera combinaciones de carga adicionales como cargas laterales, empujes y sobrecargas por superficies de rodamiento. Algo también importante de mencionar es que este manual hace mucho énfasis en los procesos constructivos, desde los materiales hasta métodos de construcción y colocación.

Otro aspecto importante que es algo deficiente en el manual de la SCT es la cuestión del señalamiento y la importancia que le dan para la conducción a lo largo del puerto, ya que proporciona criterios para la colocación de señalamientos dependiendo la maniobra a realizar desde el perfilamiento a la entrada hasta el embarque.

A pesar de las diferencias mencionadas entre estos manuales son muy parecidos en general, ya que no son muy técnicos y están referidos a criterios muy generales, a comparación de los otros manuales donde los análisis son más desarrollados e incluyen criterios más amplios de diseño, más técnicos y con mayores tipos de estructuras acorde las condiciones que pudieran presentarse. El manual de diseñamiento portuario de la SCT contiene aspectos básicos de diseños y se puede usar como guía o recomendación pero falta mucho estudio para poder establecer valores a seguir o una metodología adecuada, en cuanto al manual habría que analizar de manera más detalla el manual del US Army Corps of Engineers para poder dar una mejor crítica, ya que está enfocado completamente a las áreas de agua y deja de lado puertos petroleros o turísticos, pero en términos generales sigue una buena metodología con restricciones y una configuración portuaria más completa.

Por último, mencionaremos “Guía de Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras” del ministerio de obras públicas y dirección de obras portuarias del gobierno de Chile, que a nuestro parecer es de los manuales más completos para diseño portuario. Dividido en 5 tomos que incluye los aspectos a considerar en el diseño y criterios que maneja el manual, al análisis muy completo de todos los elementos constitutivos del puerto incluyendo conducciones, monoboyas y estructuras off-shore; algo interesante de este manual es que está bastante actualizado incluyendo estructuras flotantes que no todos los manuales incluyen. Esta guía de diseño es una combinación de varios manuales, británico, USACE, y en especial las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM) españolas, de las cuáles se toman muchos de los criterios y metodologías de diseño.

El manual inicia con los aspectos generales de los elementos constitutivos del puerto, y sus criterios principales de diseño para establecer las bases de los cálculos detallados que se verán en los siguientes capítulos. Es interesante en este apartado que existe un amplio apartado sobre los estudios de geotecnia, geología del sitio, además de un análisis hidrológico, batimétrico y meteorológico a realizar con el fin de obtener los datos necesarios para el diseño; algo muy importante para poder realizar nuestro diseño. Además, detalla un análisis estructural por LRFD y ASD que no se ven los otros manuales, muy interesante.

Después procedemos al diseño de estas estructuras y algo que llama la atención es la consideración de sismo, tsunamis, hielo y nieve, que no se ve en los otros manuales. Las combinaciones de carga utilizadas son muy completas, desde los empujes, licuefacción, estabilidad de taludes y resistencia

del suelo y materiales. Se basan en el principio de Hudson y Van Der Meer para el diseño de rompeolas al igual que el manual de la SCT, pero a un nivel más detallado de las formas de rompeolas.

En los siguientes apartados encontramos aspectos constructivos muy a detalle y de planeación, que describen la operatividad del puerto, con lo cual permite determinar los criterios de diseño de las estructuras faltantes como dársenas o fondeaderos, monoboyas y demás estructuras que dependen de la navegación dentro y fuera del puerto.

Este manual es muy completo, los criterios de diseño, parámetros y metodologías de construcción junto con la planeación dan una guía integral para un buen diseño, a alto nivel de detalle y cuidando todos los aspectos. Para los alcances de esta tesis es muy amplio y se recomienda al lector revisar dicho manual para consulta y como apoyo de diseño.

A continuación, se presenta una tabla resumen con el fin de mostrar los criterios de diseño que pueden ser usados y con fines de consulta, el lector puede utilizarla como guía para una consulta detallada en cada manual. En el primer apartado vemos las condiciones generales que el manual utiliza para diseño, el segundo y tercer apartado se establecen las características de rompeolas, la obra más importante para operatividad y de las más difíciles de diseñar; y la dársena que muestra el diseño de las áreas interiores al puerto que en general no varían mucho.

Tabla 4. Comparativa de manuales de diseño de diferentes países

Condicionantes Físicas			
México SCT	Manual Japonés	US Army	Chile
• Meteorológicas y oceanográficas. • Condiciones extraordinarias de tormenta. • Sismicidad. • Dimensión, maniobrabilidad del buque y control del barco. • El squat máximo del barco. • Condiciones de operatividad del puerto.	• Meteorología y Oceanografía. • Condiciones geotécnicas. • Sismos y Terremotos. • Empuje de Tierras y Empuje del Agua. • Licuefacción del Suelo. • Materiales.	• Localización. • Meteorología y Oceanografía. • Obras de protección. • Cargas laterales, verticales y empujes de agua y suelo, y carga por rodamiento. • Procesos constructivos. • Sistemas de defensa y señalamiento de las estructuras portuarias. • Condiciones e infraestructura de ataque.	• Peso propio. • Empuje de suelo e hidráulico. • Sobrecargas, transporte y maquinaria para movimiento. • Nave de diseño. • fuerzas en atraque. • Viento, nieve y hielo. • Diseño por deslizamiento. • Meteorológicas y Oceanográficas. • Sismicidad y tsunamis. • Cargas especiales. • Dinámica litoral. • Geotecnia (filtaciones, asentamientos, licuación, estabilidad de talud, etc.). • Materiales.

Tabla 4. Comparativa de manuales de diseño de diferentes países (continuación)

	Rompeolas				
	México SCT	Manual Japonés		US Army	Chile
Clasificación	Dependiendo su ubicación: • Paralelos al puerto. • Perpendiculares a la costa. • Convergentes a la costa.	Dependiendo sus funciones: • Funciones básicas (abrigo y protección al interior de los recintos portuarios). • Funciones especiales (protección contra Tsunamis y Marea de Tormenta) Dependiendo de su estructura.		• Factores para su localización. • De montículo, describe condiciones óptimas y materiales adecuados. • De pared. Recomendación de materiales y condiciones para su construcción.	• Gravedad. • Flotante. • Excento. • Sumergido. • Espigones. • Muros costeros.
Altura de Corona	• Determinada por el nivel de oleaje máximo más el remonte de oleaje, el nivel máximo de oleaje será tomado de pleamar o nivel medio dependiendo el criterio de diseño.	• Para puertos de altura y amplio fondeadero $H_b \geq 0.6H$ (1/3). Para puertos pequeños: $H_b \geq 1.25H$ (1/3).		Establece el nivel mínimo de corona en nivel máximo de marea registrado en el área del puerto. Recomendación de buscar protección natural, analizar los efectos locales de oleaje como el seiche.	• La altura de ola es determinada de acuerdo al método de Hudson y van der Meer basándose en el área de la estructura, material y forma del rompeolas. Son criterios bastante amplios y se recomienda su consulta.
Talud	• Depende del tipo de material, se propone un valor acorde a las tablas de van der Meer. Peso del material, estabilidad y condiciones del suelo.	Lado Exterior 1:2	Lado interior 1:1.5	• Dependerá del tipo de rompeolas utilizado, condiciones de desplante y materiales.	• Su determinación se basa en los criterios de van der Meer, en diferentes condiciones de carga, tipo y material.

	México SCT	Manual Japonés		US Army	Chile
Criterios de Diseño	• Nivel de oleaje dentro del puerto. • Deslizamiento, erosión o fractura de elemento de la coraza. • Remonte de ola. • Inestabilidad geotécnica. • Movimiento o fractura de la corona.	Acciones permanentes. • Peso Propio. • Falla circular de la estructura.	Acciones Variables: • Oleaje. • Volteo de la Estructura. • Sismo. • Falla cimentación.	• Tipo de oleaje. • Acción del seiche. • Condiciones del suelo. • Tipo y material de construcción. • Peso y estabilidad de la estructura. Marea, sismo, hielo y efectos de marea.	• Altura de ola. • Run-up y rompiente o no rompiente de la ola. • Empujes de suelo e hidráulicos. • Estabilidad de taludes. • Volteo y deslizamiento. • Falla del lecho marino. • Asentamientos diferenciales.¹
Límites de diseño	G= Límite de falla, >0 S= Sobrecarga del sistema R= Sobrecarga del sistema γ_R, γ_s = factores de seguridad	Acciones permanentes: $P_f=4.5 \times 10^{-4}$	Acciones Variables: $P_f=8.7 \times 10^{-3}$	No establece límites de diseño, da criterios para las posibles condiciones de carga a analizar y parámetros permisibles para cada caso independiente.	• No establece un factor de seguridad general, para cada tipo de rompeolas y condición de carga hay límites de diseño, por lo cual se deja la consulta directa en manual por parte del lector.

	Dársenas				
	México SCT	Manual Japonés		US Army	Chile
Clasificació	- Dársena de ciaboga. - Dársena de maniobra. - Dársena de atraque.	- Dársenas de maniobras. - Dársenas fondeaderos.		- Dársenas de maniobras. - Dársenas fondeaderos.	incluye de traque, maniobra y fondeaderos, pero habla en general de las dársenas para definir criterios de diseño.
Profundidad	- Calado del barco a tope. - Relación tirante-calado. - Squat¹ y trim² del barco. - Resguardo bajo quilla. - Sedimento y error por medición.	Congruente con el calado del barco de diseño y los canales de navegación.		Determinado por el calado del barco de diseño, y tipo de suelo.	- Nivel mínimo del mar en cualquier punto de los canales. - Margen de seguridad por. variación de marea y maniobras - Resguardo por falta de precisión de batimetría.
Criterio de Diseño	- Área de operación. - Maniobrabilidad del barco. - Modos de atraque. - Configuración del puerto y tipo de suelo.	- Tonelaje del barco de diseño. - Condiciones de calma y operatividad de instalaciones (mayor o igual al 97.5% del tiempo). - Capacidad de giro del barco de diseño. - Uso de ayudas para el giro (remolcadores, muelles y anclas).		- Establecer siempre en las cabezas de navegación de los canales. - Las dimensiones estarán relacionadas con el barco de diseño. - En caso de existir mucho tráfico utilizar dársenas secundarias.	- Configuración del puerto. - Maniobra de barco de diseño. - Niveles de agitación y resonancia. - Configuración de muelles. - Vientos y oleaje en la dársena. - Geología y geotecnia del suelo. - Sedimentación y presencia hielo.
Diámetro	- Está en función de la eslora del barco. - Los diámetros dependen del área disponible de maniobrabilidad. - Establece diámetros recomendados para maniobrabilidad y en caso de ser necesario ayuda de remolcadores.	Grandes embarcaciones (desplazamiento mayor a 500 ton).	Embarcaciones pequeñas y limitaciones topográficas.	- Para un giro amplio el radio debe ser igual a 2L, dónde L es el largo del barco. - Para lugares dónde la maniobrabilidad es poca se recomienda un radio igual a L. - En lugares dónde la maniobrabilidad es nula puede hacerse radios de giro menores a L, pero deberá referirse a un punto fijo y con ayuda de remolcadores.	Las dimensiones mínimas de las dársenas vendrán definidas por la longitud de sus muelles y por el ancho del área de flotación, que se determinarán por el método determinístico, enunciado en la ROM 3.1-99, específicamente en el capítulo 8.10.3.
		- Giro por impulso propio del barco D=3Le - Giro con remolcadores: D=2Le	Giro por impulso propio		

3 RESONANCIA EN CUERPOS DE AGUA SEMI-CERRADOS

Uno de los principales modos de transporte de mercancías hoy en día es el transporte marítimo, por medio de él se transportan miles de toneladas diarias de productos con costos de movilidad muy bajos, lo que lo hace el medio de transporte más eficiente. Esto ha generado que en las últimas décadas la ingeniería marítima haya crecido considerablemente, desde el estudio de los procesos naturales del mar, hasta el desarrollo de terminales portuarias para dicho modo de transporte y todos los fenómenos físicos generados de su interacción con los procesos marítimos.

En este último comentario entra la ingeniería portuaria, una rama de la ingeniería marítima que basa su desarrollo en el estudio del oleaje, tanto local como distante, y procesos costeros; con el fin de obtener parámetros y condiciones bajo las cuales se puede analizar la interacción entre las estructuras, que dependen del tipo de obra que esté realizando, y dichos fenómenos. Los resultados obtenidos determinarán las características finales de nuestra estructura que cumplirá con los requerimientos solicitados por los criterios de diseño.

Por lo cual uno de los principales objetivos de esta tesis es analizar la interacción de estructuras portuarias bajo ciertas condiciones de oleaje, en términos de efectos de resonancia. Para ello, en este capítulo explicaremos como es que se produce resonancia dentro de un puerto, analizaremos el fenómeno y cómo es que se forma. Dicho análisis permitirá establecer recomendaciones generales para los casos estudiados y sea una guía rápida para un pre-diseño.

3.1 TEORÍA DEL OLEAJE

Para explicar más a detalle los efectos de resonancia partiremos desde las condiciones básicas, con el fin de facilitar el entendimiento del fenómeno de una manera más completa. Partiremos de conocer el movimiento que sigue la partícula a causa del oleaje, lo cual nos permitirá definir de mejor manera todos los procesos que lo generan.

3.1.1 Oscilación de onda

Se puede idealizar una partícula que se mantiene en reposo en un medio cualquiera como puede ser el agua, aire o algún medio sólido, etc. Su estado se mantiene estable hasta que una fuerza perturbadora altera la partícula, ocasionando que se genere un cambio en su estado inicial, la partícula se transmite por ese medio generando una trayectoria en su recorrido; la onda continúa moviéndose hasta llegar a un punto en otro extremo, o se encuentre con otra fuerza que frene su movimiento.

La idea anterior, incide en una idea muy elemental, las acciones que se ejercen sobre la alteración de una partícula, por lo que analizaremos más a detalle la descripción del movimiento del cual partiremos para la explicación del oleaje.

Haciendo más complejo el análisis supongamos que la partícula se mueve de un punto a otro a causa de una perturbación, generando una trayectoria que llamaremos onda. El cuerpo se encontraba en estado de reposo donde a pesar de estar estático tenía energía interna, la cual conocemos como energía potencial. Al recibir una fuerza actuante se origina un cambio de estado, haciendo que se “mueva” por tal motivo la energía potencial se transformó en energía cinética.

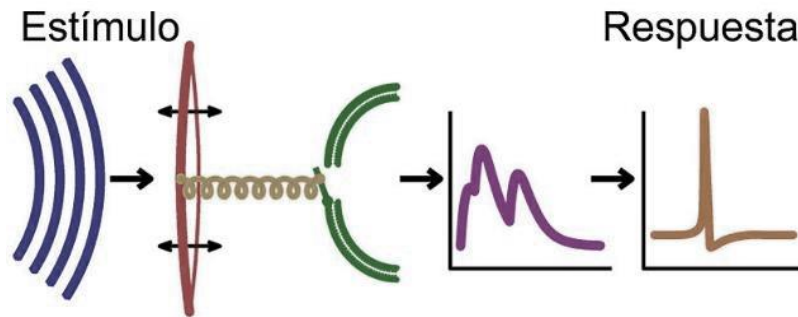


Figura 3. 1. Representación diversas formas de onda

Cuando hay transmisión de una perturbación de un punto a otro del espacio, se habla en general de la propagación de una onda, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- Exista transmisión de energía de un punto a otro.
- Que exista una fuerza que "saque" al material de su posición "normal" y otra fuerza que trate de hacer volver al material a su situación original. A la primera se denomina "fuerza perturbadora" y la segunda "fuerza restauradora".

Las olas del mar es uno de los modelos más familiares de ondas. Se trata de ondas que ocurren en la frontera entre dos medios, que son el aire y el agua, además es de los fenómenos más conocidos y estudiados. Las fuerzas que generan estas ondas son varias y se describen a detalle en el siguiente apartado, además de los efectos que causan sobre el mar.

3.1.2 Oleaje

Como se vio en el apartado anterior la descripción del movimiento se ajusta a la forma de ondas que viajan de un punto a otro en un medio, pero dicha suposición empieza a ser demasiado corta cuando analizamos de una manera más formal el oleaje, con lo cual es este apartado analizaremos las fuerzas que lo generan, sus características principales y las afectaciones que se presentan a causa de su interacción con la costa y estructuras marítimas.

La caracterización del oleaje es importante para el enfoque de la tesis ya que estableceremos condiciones básicas para el análisis y como resultado de los fenómenos de deformación del oleaje, analizadas por el programa WAPO, obtener los coeficientes de propagación dentro del puerto y poder establecer si existe resonancia.

3.1.2.1 Formación de oleaje

Existen muchos fenómenos que propician la formación del oleaje la descripción de su movimiento vista en los apartados anteriores se realiza en condiciones ideales, debemos considerar que se ve perturbada por varios aspectos como viscosidad del agua, la fricción que existe con el fondo litoral en aguas someras. Además, que su movimiento se ve afectado por una fuerza restauradora que afecta el fenómeno.

La dinámica de la ola es de los fenómenos más estudiados en la hidráulica marítima, por lo cual existen diferentes niveles de onda que describen el movimiento debido a las variantes climatológicas y físicas del fenómeno. Cubriendo un amplio espectro de frecuencias y sus características que varían con el tiempo, lo que implica que en todos los casos es necesario para su análisis tener en cuenta este proceso. Es por ello que la medición de un tren de olas en un punto determinado del mar u océano, es respectiva solamente de ese instante de medición. En consecuencia, para conocer las

características de las olas en un dado lugar, es necesario realizar mediciones sistemáticas por largos lapsos de tiempo, que permitan efectuar el análisis estadístico de su variabilidad en el tiempo.

La onda que describe el movimiento del oleaje se constituye por varios aspectos medibles que se encuentran a lo largo de su trayectoria y a partir de ellos podemos conocer la variabilidad del fenómeno, para poder clasificarlos.

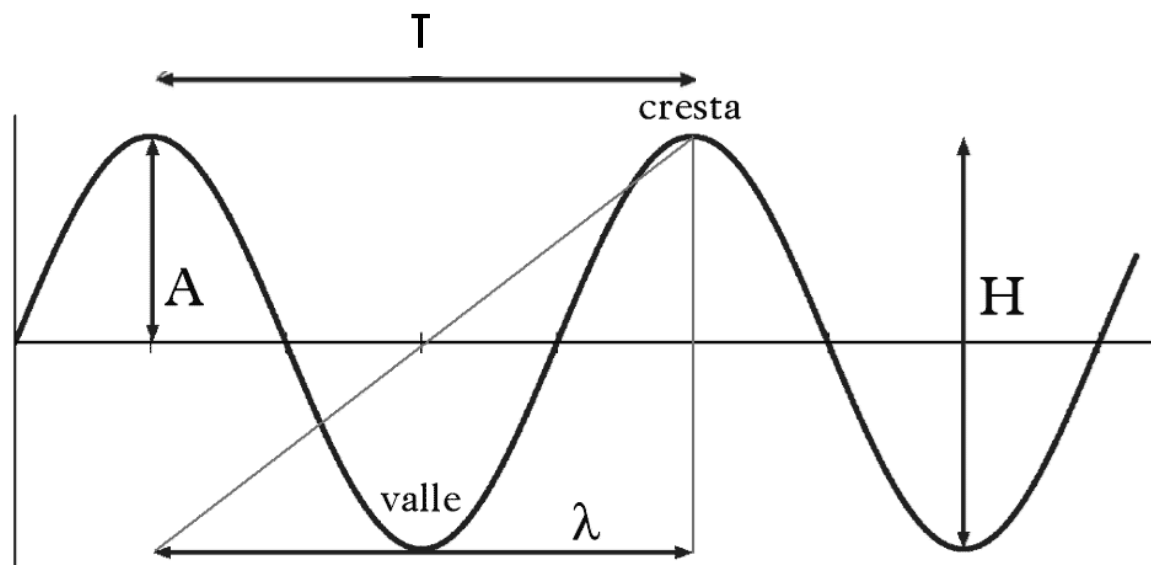


Figura 3. 2. Partes que conforman una onda

La línea horizontal que divide la onda en 2 partes iguales la conocemos como línea nodal, que se encuentra definida por el nivel medio del mar, todos los movimientos ascendentes a partir de la línea nodal son positivos y su punto máximo al que llega se le conoce como “cresta de la onda”, por el contrario, existe movimientos descendentes por la naturaleza del movimiento, al punto mínimo inferior se le conoce como valle. El ciclo de una onda se cumple cuando, partiendo de la línea nodal llega a una cresta, para después descender al valle y volver a la línea nodal. Para efectos de cálculo nos interesa saber que altura presenta la ola en el lugar de estudio, para poder determinarla se considera la distancia entre una cresta y el valle como la altura “H” de la ola, por lo regular su medición se realiza con instrumentos que miden la diferencia de presión entre el punto más alto con el más bajo, de dicha diferencia se obtiene la altura de la ola.

Debido a que el oleaje no es regular, puede variar bastante dependiendo de la época por lo cual se considera una altura de ola significativa, la cual se define como $\frac{1}{3}H$ del tercio mayor del promedio de altura de ola. La altura de ola que se puede llegar a presentar depende de 3 factores velocidad, duración del viento y el fetch. Corresponde hacer un estudio adecuado para su determinación.

Recordemos que definimos el movimiento de la onda como la variación de energía a causa de una perturbación, en el caso del oleaje la energía máxima se presenta en el punto más alto o bajo al que llega la ola con respecto su nivel medio, a esta diferencia de niveles se conoce como Amplitud de onda “A”, que también se puede definir como un medio de la altura $\frac{1}{2}H$. Su valor puede variar desde unos cuantos milímetros hasta algunos metros, dependiendo del fenómeno.

Pero el oleaje no sólo se mueve verticalmente, también existe un desplazamiento por lo regular desde el lugar dónde se origine la ola hasta llegar a la costa o alguna estructura que impida su camino. En los párrafos anteriores se mencionó el concepto de “tren de olas” llamamos así a la cantidad de ondas consecutivas que se generan entre 2 puntos, la distancia entre la cresta de las ondas se le conoce como longitud de onda “λ”, esta puede ser de centímetros o hasta kilómetros

dependiendo de la naturaleza del oleaje. Un parámetro que está también relacionado con la distancia entre las crestas de 2 ondas es el periodo, éste parámetro es el más importante ya que nos permitirá clasificar la onda para diversos periodos.

El desplazamiento de la onda tiene una velocidad de propagación que se conoce como celeridad, su valor depende de la interacción con el fondo marino. El criterio de Arry atiende estos aspectos definiendo la celeridad y la longitud a partir de una función tipo tangente hiperbólica.

Considera la celeridad como: $C = \frac{L}{T}$

Donde la longitud la definimos de la siguiente forma cuando se encuentra en aguas intermedias.

$$L = \frac{g}{2\pi} * T^2 * \tanh\left(\frac{2\pi * d}{L}\right) ; \text{ cuando } \frac{L}{2} \leq d \leq \frac{L}{25}$$

Siempre partiremos de la condición de aguas profundas, considerando lo siguiente:

$$\tanh\left(\frac{2\pi * d}{L}\right) = 1$$

Y en aguas poco profundas:

$$L = \sqrt{g * d} * T$$

3.1.3 Clasificación de onda y fuerzas generadoras

La clasificación de onda más conocida es la clasificación de Kinsman (1965) la cual divide al oleaje de acuerdo a los periodos de la ola:

- Las primeras son las ondas capilares, que son producidas por vientos con velocidades entre 0.25 y 1.00 [m/s]. Están controladas por la tensión superficial y la gravedad de la tierra, se caracterizan por tener un periodo menor que 0.1 [s], longitud menor de 1.73 [cm].
- La segunda clasificación son las ondas de ultra-gravedad, tienen un periodo mayor a 0.1 [s] y menor a 1 [s], su longitud es mayor que 1.73 [cm], con velocidades entre 1 y 5 [m/s], y están controladas por la gravedad.
- El tercer tipo de onda son la gravedad, son producidas principalmente por vientos con velocidades que varían entre 6.5 y 7 [m/s], con periodos entre 1 y 30 [s]. Este tipo de oleaje es al que se lo denomina oleaje local o “sea” su distribución es muy irregular, se origina cerca de la costa. Este es el tipo de oleaje bajo el cual analizaremos nuestras estructuras y qué dominará para el análisis en esta tesis.
- Después tenemos las ondas de infra-gravedad, son ondas de gravedad con periodo entre 30 [s] y 5 [min], que causan oscilaciones notorias en la superficie del mar y se producen en grandes tormentas y huracanes.

- Las ondas de largo periodo, son ondas con longitud mayor que la profundidad, es decir $d/L \ll 1$. En la naturaleza se pueden distinguir dos tipos de ondas de periodo largo, un producto del deslizamiento de tierra submarina o plataformas continentales que reciben el nombre de Tsunami y las otras producidas por las mareas que tienen la característica de que su periodo varía entre 12 y 24 [hrs], generadas por la atracción del sol y/o la luna.
- Por último, las ondas de transmarea o transtidales, se caracterizan por tener periodos mayores de 24 [hr], son producidas por la atracción del sol y la luna.

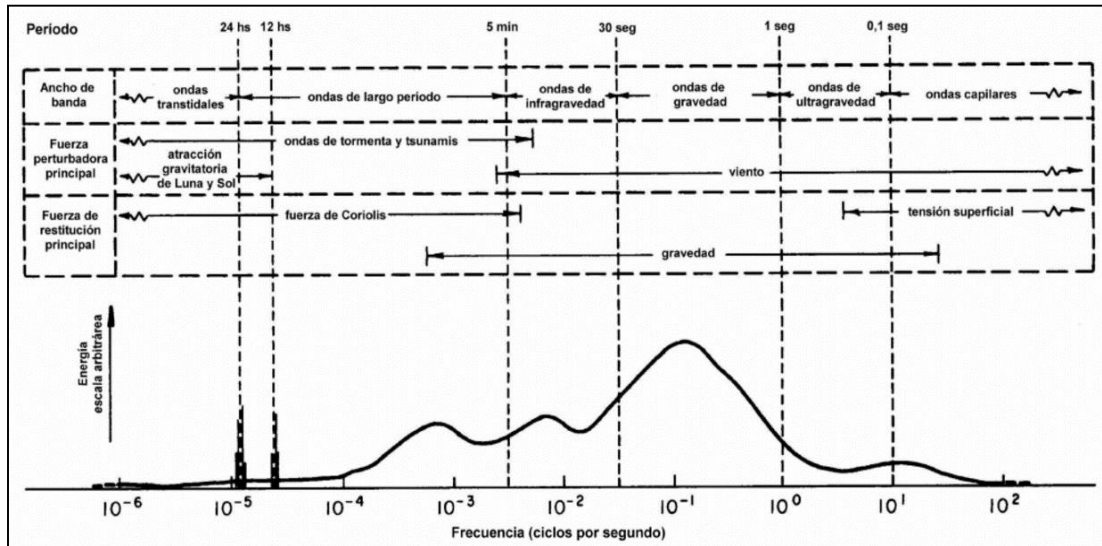


Figura 3.3. Clasificación de ondas por periodo (Kinsman 1965)

Esta clasificación de Kinsman es la más usada (Fig. 3.3.) ya que incluye no sólo los periodos de clasificación de la onda, también muestra las fuerzas perturbadoras y restauradoras que generan dicho fenómeno, como se mencionó en el párrafo anterior para término de esta tesis nos enfocaremos en el análisis de oleaje local, con dos consideraciones, el producido por viento para el análisis secciones tipo de puertos y condiciones de tormenta para el análisis de los puertos reales. Podemos observar que el oleaje no sólo es generado por vientos existen otras fuerzas como las gravitacionales que son causadas por la atracción entre los astros y las fuerzas generadas de los movimientos propios de la tierra. Sin dejar de considerar los movimientos tectónicos que generan sismos los cuales a su vez generan tsunamis, que deben de ser considerados ya que como se ha visto pueden llegar a ser devastadores.

Todas estas fuerzas y fenómenos tienen estudios particulares bastante amplios e interesantes que quedan fuera de los alcances de ésta tesis y que necesitarían de un artículo especial para describirlos completamente, por ahora sólo nos enfocaremos en casos particulares del oleaje de viento local y su interacción con las estructuras portuarias. El conocer los fundamentos básicos de oleaje nos permitirán poder entender de mejor forma el fenómeno resonante que se explicará en los apartados siguientes.

3.2 AGITACIÓN Y RESONANCIA

En los apartados anteriores nos hemos enfocado únicamente en explicar los fenómenos generadores, características y clasificación del oleaje. Ahora estableceremos las condiciones de agitación, es decir, las deformaciones de oleaje que permitirán llegar al análisis de la resonancia.

Es importante definir estas deformaciones porque son los procesos a los que se somete el oleaje antes de presentar resonancia en algún cuerpo de agua semi-cerrado, y son considerados por el

programa WAPO para poder obtener el coeficiente de propagación que define a la resonancia, dicho análisis se presenta a detalle más adelante.

3.2.1 Refracción

El oleaje puede llegar a viajar kilómetros de distancia desde el punto dónde se originó hasta llegar a la costa conservando su periodo, y la mayoría de sus condiciones iniciales cuando viaja por aguas profundas, pero existe un límite de aguas dónde el fondo marino empieza a perturbar las condiciones del oleaje, conocido como límite de aguas profundas.

El límite de aguas profundas se encuentra a una distancia aproximada de 50 [m] sobre la línea de playa, en este punto el movimiento oscilatorio de las partículas a causa de la onda empieza a resentir una fuerza de resistencia generada por el “roce” con el fondo marino. Analicemos el efecto con el siguiente diagrama:

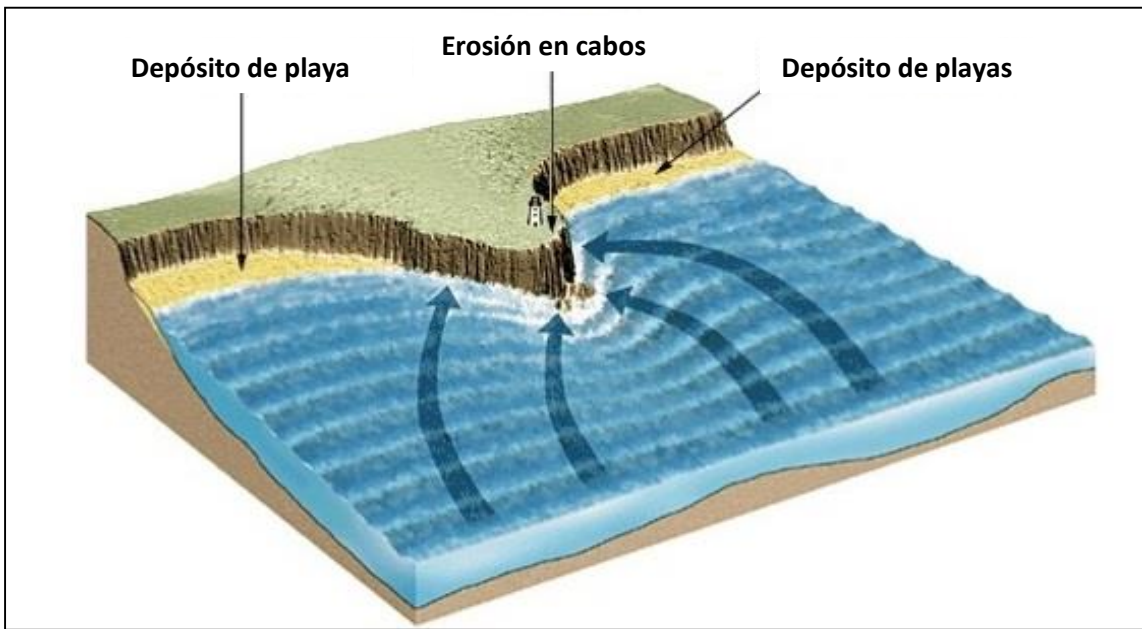


Figura 3. 4. Efecto de refracción en una bahía

Conforme la ola se acerca a la costa la batimetría va subiendo hasta buscar el nivel de playa por lo cual la interacción entre la onda y el fondo marino se ve en aumento distorsionándola. Entonces podríamos definir a la refracción como las distorsiones de oleaje a causa del fondo del mar, en el fondo por el roce con el fondo marino se genera una fuerza de fricción la cuál va “frenando” el oleaje, disminuyendo su longitud, pero conservando su periodo. La longitud se ve distorsionada por la reducción de la profundidad, por ende, también cambia la velocidad de propagación de la onda, altura y amplitud.

Debido este hecho se genera un fenómeno interesante de distorsión, pues recordemos que la geometría de una costa, principalmente de una bahía, no es recta tienden a ser semi-circulares por la erosión litoral. Este hecho genera que se deformen las ondas conforme se acercan a la costa ya que, en la parte central de la bahía, la onda aún tendrá una altura y longitud considerable, pero en las orillas la onda se encontrará desvanecida por llegar al nivel de costa, esto ocasiona la distorsión del oleaje y la pérdida de energía. La deformación depende del ángulo de incidencia de oleaje, forma de la costa y profundidad de la costa.

Se puede calcular un coeficiente de refracción que nos permitirá saber el comportamiento del oleaje alrededor de la costa y cómo se desarrolla el fenómeno, además que permite obtener la altura de ola en ese punto multiplicándolo por la altura de ola actuante.

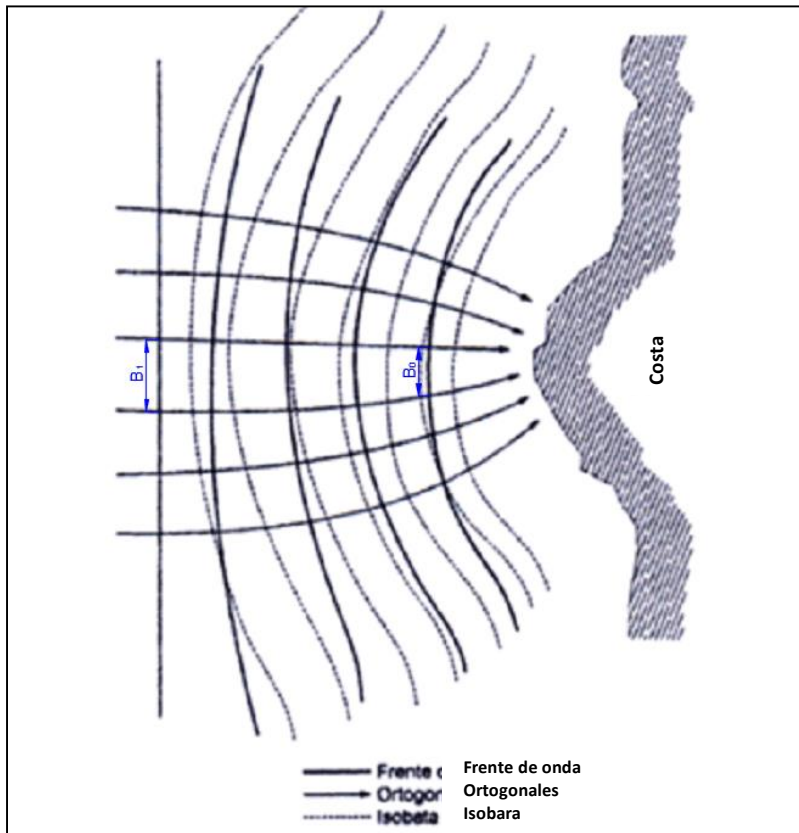


Figura 3. 5. Refracción de oleaje en costa

El coeficiente de refracción se puede obtener principalmente de la relación entre la altura de ola incidente con la altura de ola un punto de la bahía, también se puede obtener estableciendo una relación en el ancho de las ortogonales, ellas representan la energía del oleaje y como se va moviendo con respecto a la incidencia de la ola en la costa.

Definimos la altura de ola en el punto "0" como:

$$H_0 = H_1 * K_r$$

Dónde:

H_0 = Altura de ola refractada.

H_1 = Altura de ola incidente.

K_r = coeficiente de refracción.

Definimos el coeficiente de refracción como:

$$K_r = \sqrt{\frac{b_1}{b_0}}$$

Dónde:

K_r = Coeficiente de refracción.

b_1 = ancho de los ortogonales incidentes.

b_0 = ancho de las ortogonales refractadas.

El análisis de difracción es un cálculo sencillo existen varios métodos tanto gráficos como métodos numéricos para desarrollar.

3.2.2 Difracción

Una vez entrado el oleaje en la costa va rompiendo contra la playa terminando su “tránsito”, pero hay ocasiones en que el oleaje no llega a romper a la costa y se encuentra con una estructura a su paso que provoca una completa distorsión del oleaje, generando un cambio en su dirección y disipando gran cantidad de energía, éste fenómeno se llama difracción.

Aquí entra en juego las obras de abrigo, generalmente este fenómeno es provocado poniendo intencionalmente una estructura para generar esta pérdida de energía.

La mayoría de los puertos o estructuras portuarias, tanto de turismo como mercantes, se encuentran protegidas de los daños que puede llegar a causar una onda impidiendo la operatividad del puerto. Como protección se diseñan rompeolas o estructuras de abrigo cuya función es impedir el paso de oleaje importante que pudiera causar el paro de operaciones, por ende, se estudia las condiciones de oleaje predominante en el sitio para poder construir una estructura que la proteja afectando la ola provocando junto con la refracción que la ola disminuya su altura y energía considerablemente; es ahí donde entra la definición de refracción.

En caso de que el oleaje se encuentre con algún obstáculo, (isla, rompeolas, etc..) se generará una transferencia lateral de energía y una zona “oscura” o de abrigo protegida de la acción del oleaje. El proceso de difracción puede provocar que parte de la energía del oleaje que no haya encontrado la interferencia se meta en la zona protegida. Las ondas que se forman tras el objeto como consecuencia de la cesión de energía son ondas difractadas.

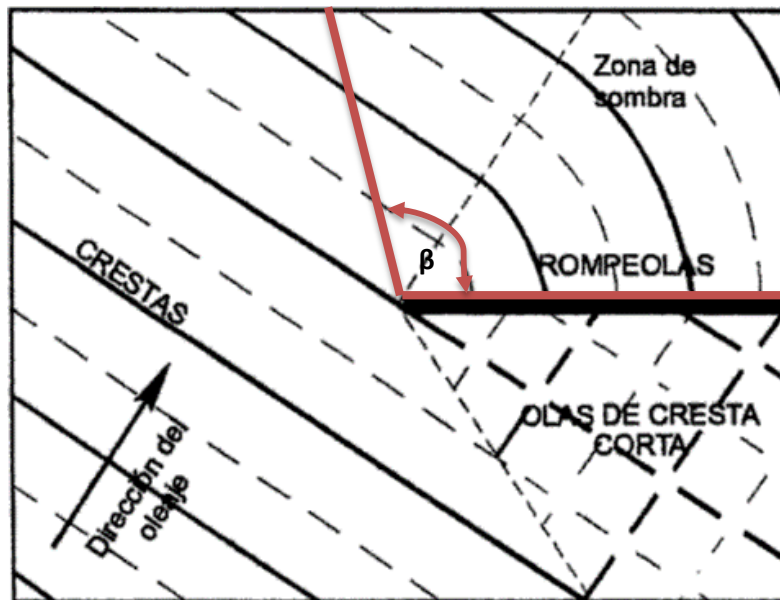


Figura 3. 6. Difracción de oleaje en una estructura de abrigo

Como se puede observar en la figura 3.6., un tren de olas se acerca a la costa con cierto ángulo de incidencia, una altura y longitud de onda que van variando conforme avanzan. El fenómeno de la difracción se genera en el momento que el oleaje choca con el rompeolas, generando un cambio en sus condiciones, con la energía restante del choque las nuevas ondas se desplazan hacia dentro de la estructura de abrigo, generando un abanico de oleaje que parte de este punto a causa del choque. Entre el oleaje y la disipación de la nueva onda se tiene un área libre de este fenómeno llamado zona de sombra.

La difracción nos ayuda a disipar la energía y obtener una altura de ola deseada, para esto existen formas de calcular esa altura de ola deseada, a continuación se explica el método. Primero trazamos una línea recta desde el punto de puerto dónde se desea obtener la altura de ola, hasta el punto dónde se genera la difracción; esta línea será el límite de influencia del fenómeno sobre este punto.

Se traza una perpendicular al frente de incidencia del oleaje en el punto de la difracción, partiendo de esa línea se traza los horizontes de propagación que son líneas de 45° a cada lado de la perpendicular. El ángulo formado entre el horizonte de propagación y la línea de incidencia de la onda refractada sobre el puerto se le llama ángulo “ β ”, el cual definirá el coeficiente de difracción.

La altura de ola deseada en el punto de interés se define:

$$H_0 = H_1 * K_d$$

Dónde:

H_0 = Altura difractada.

H_1 = Altura de ola incidente.

K_r = Coeficiente de difracción.

Definimos el coeficiente de refracción como:

$$K_d = \cos(\beta)$$

Dónde:

K_d = Coeficiente de difracción.

β = Ángulo entre el horizonte de propagación y la línea de incidencia de onda refractada.

Este fenómeno es muy importante para el diseño de puerto ya que se puede escoger la forma de las protecciones para difractar la ola a la altura que deseamos o simplemente evitar agitación. Pero existen casos dónde esto no sucede por falta de un buen estudio de las deformaciones de oleaje, generando que ondas entren al puerto y puedan causar efectos de resonancia. Por tal motivo la difracción es de los fenómenos que más atención se le debe tener y se considera como un antecesor para el estudio de la resonancia.

3.2.3 Reflexión

Es el fenómeno producido por la superposición de la amplitud de dos olas que coinciden en sus crestas a causa del “rebote” en un talud vertical o casi vertical. La reflexión se genera principalmente en muelles de gravedad, muros con taludes poco inclinados o paredes verticales. Una onda logra entrar y choca contra estos muros, que por su forma reflejan prácticamente toda la energía de la ola, al ser rebotada la onda puede llegar a encontrar con otra que esté entrando en esa misma dirección, cuando un valle y una cresta se encuentran el fenómeno prácticamente se anula pero cuando los periodos de las olas son parecidos al de oscilación del puerto se juntan dos crestas, amplificando la

amplitud de la onda y generando resonancia en el puerto, impidiendo su operatividad por las altas olas. A continuación, se detalla de mejor manera el fenómeno de resonancia.

3.2.4 Resonancia

El objetivo principal del diseño de puerto es evitar que exista perturbación en un su interior para poder mantener la operación en todo momento, ya que si se generan condiciones de perturbación en su interior provocaría un paro de operaciones lo cual puede generar una pérdida económica considerable no sólo para el puerto, también para los barcos que se encuentran a la espera de atraque para descarga de mercancías o salir a cubrir una ruta. Los daños también pueden ser materiales ya que si la perturbación es muy grande dañaría las embarcaciones y puede provocar daños estructurales en los muelles o canales de acceso.

El fenómeno de resonancia se ve definido principalmente por la geometría del puerto, debido a que la reflexión de la ola en las paredes tanto del canal como es las dársenas originará que exista o no resonancia, generalmente los canales de acceso suelen tener una longitud considerable y geometría constante conectadas a una dársena que tiene un volumen mayor de agua, esta situación origina que la resonancia se presente en la entrada del canal y en la conexión con la dársena. Para que se origine resonancia deben cumplirse 2 premisas:

- 1) Tiene lugar una transferencia de energía a la masa de agua confinada tal que hace que ésta comience a oscilar.
- 2) La transferencia de energía es producida por un trabajo físico favorable al movimiento, con una variación periódica de la frecuencia similar a la natural de oscilación del puerto.

La mayoría de los estudios de resonancia son causados por onda larga que como vimos anteriormente puede llegar a tener periodos entre 30 [s] y 5 [min], en esta tesis nos enfocaremos en el oleaje local con periodos de ola entre 5 [s] y 30 [s] para condiciones normales y de tormenta.

De igual manera existen otros factores que interfieren directamente en la resonancia del cuerpo de agua como lo son el viento, las variaciones de presión atmosférica y la sismicidad de la zona o movimientos de las placas marinas. Pareciera no ser de gran importancia, pero un tren de baja o alta presión atmosférica que genera un oleaje con altura y periodos realmente elevados que han llegado a destruir puertos, como es el caso de la bahía de Nagasaki. De la misma forma debido a perturbaciones en el suelo marino por sismos pueden generar trenes de olas que llegan a perturbar los puertos cercanos.

Se hace mucho énfasis en la geometría ya que es determinante para que no afecte la resonancia, y muchos proyectos suelen no tomar las precauciones necesarias para prevenirlo. A continuación, se muestran 2 casos, uno en un antiguo puerto de Chile y otro en la isla de Menorca España, en ambos casos los efectos fueron catastróficos.



Figura 3. 7. Puerto Chile destruido por efectos de resonancia



Figura 3. 8. Barcos dañados a causa de resonancia

Las figuras 3.7. y 3.8., son hechos que muestran el poderío del agua y lo peligros que puede llegar a ser si se presenta resonancia, si imagináramos la amplificación del fenómeno con buques de gran tamaño los resultados pueden ser aún peores y económicamente malignos. Más adelante estableceremos recomendaciones que pueden ayudar a prevenir situaciones de resonancia.

3.3 ANÁLISIS

La resonancia es un efecto conocido en otras áreas de la ingeniería y la física, que tiene que ver con la “forma de vibrar” de dos objetos que se relacionan, analizándolo desde el punto de vista ingenieril al generarse una perturbación en las aguas calmas del puerto la onda oscila dentro de él, cuando existe una armonía, es decir el modo de oscilación de la onda se aproxima al modo de oscilación interno del puerto se genera el fenómeno.

El estudio de resonancia es muy complejo ya que existen muchas variantes que pueden afectar la onda que se dirige al puerto, así como aspectos internos como la geometría o el calado que pueden llegar a afectar dichos fenómenos. Podemos considerar al puerto en una primera aproximación como un sistema en estado estacionario, con un arreglo armónico simple donde el agua un cuerpo de masa $[m]$, se encuentra pegado al muelle el cual se considera elástico de constante “K”. Al producirse una onda ésta choca con cierta velocidad contra la pared del muelle y se ve reflejada de regreso a lo largo del puerto, dicho reflejo se junta con la fuerza oscilante, ocasionando que se crucen las ondas. La reflexión repetida de dichas ondas genera el efecto llamado onda estacionaria que deriva en la resonancia dentro del recinto portuario.

La interacción de las ondas que generan la resonancia se ve reflejado en la amplitud de onda y la frecuencia, ya que se puede observar que la amplitud de onda después de un cierto tiempo $[t]$ tiende exponencialmente a la posición cero. Esta pérdida es debido a la fuerza de fricción viscosa que ejerce una fuerza en sentido contrario a la velocidad haciendo que vaya perdiendo energía. Todo este proceso se explica en 3 puntos clave del proceso de resonancia:

- Si la frecuencia de excitación es muy pequeña (lo que equivale a hacer oscilar el extremo superior del muelle muy lentamente), el muelle oscila prácticamente en fase con la excitación y con su misma amplitud.
- Si la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia característica del muelle, la amplitud de oscilación va creciendo cada vez más, y comienza a resonar; en este caso, las oscilaciones del muelle están retrasadas alrededor de un cuarto de fase respecto a la excitación.
- Finalmente, si la frecuencia de excitación es muy alta, el resonador oscila con una amplitud muy pequeña y casi en oposición de fase.

Una mejor forma de simplificar el movimiento armónico simple se encuentra la definición de onda estacionaria como se mencionó anteriormente, ya que describe perfectamente la amplificación de las ondas que generan la resonancia. Las ondas estacionarias dan lugar a dos tipos de oscilaciones, con importancia relativa según su localización:

- Movimientos verticales, con mayor relevancia en las dársenas. La amplitud admisible de los mismos depende del tipo de embarcación que va a ser afectada y del periodo. Por otra parte, en casos extremos de ondas de mucha longitud y amplitud apreciable, el ascenso y descenso del vientre supone la movilización de un volumen de agua importante que puede hacer disminuir el calado de forma inadmisibile en algunas zonas del puerto; téngase en cuenta que, dentro del puerto, los recintos adyacentes se ceden entre sí el agua necesaria para el ascenso de los vientres de onda —es de destacar, a título de ejemplo, el vaciado que experimenta el puerto de La Ciudadela, en la isla de Menorca-. Si la bocana del puerto es estrecha y el periodo de las oscilaciones bajo, el agua exterior no tendrá tiempo de entrar y salir a tiempo, acentuándose el efecto de vaciado.
- Movimientos horizontales, localizados sobre todo en las proximidades de los nodos. Están producidos por las corrientes de agua necesarias para mantener las oscilaciones verticales

y, por tanto, para el llenado y vaciado de los volúmenes de agua de los vientres. Estas corrientes son especialmente intensas en los canales de acceso a las dársenas, pudiendo alcanzar 2.5 [m/s] para una amplitud de la onda de tan sólo 10 o 20 [cm], resultando muy perniciosas al forzar los medios de amarre de las embarcaciones, pudiendo incluso romperlos, aparte del riesgo de colisión de las embarcaciones entre sí o con los pantalanes y muelles.

Estas implicaciones buscan simplificar el entendimiento del fenómeno para poder ejercer un análisis adecuado y poder determinar las condiciones de resonancia, a continuación, se presentarán los principales tipos de aproximaciones numéricas bajo las cuales se puede calcular la resonancia. Para esta tesis su determinación se realizará a través de software llamado WAPO que relaciona el modelo lineal para la dispersión de oleaje externo al puerto, con el teorema de Stokes de no linealidad aplicando la ecuación de pendiente suave para su resolución; la explicación del método, el funcionamiento del software y todos los criterios utilizados se encuentran descritos en el capítulo 4 de esta tesis.

El fenómeno de resonancia se puede analizar mediante modelos numéricos que simplifican las variables y buscan definir el proceso mediante estas ecuaciones, dentro de estas simplificaciones caen en limitaciones que restringe el modelado a ciertas condiciones generales para las cuales deja de ser práctico.

Los principales modelos en los que se basa la descripción de resonancia son los modelos no lineal y lineal, este último con mayores limitaciones ya que sólo se desarrolla en condiciones de deriva de oleaje reduciendo los efectos que pudieran presentarse al entrar a un cuerpo semi-carrado.

La teoría lineal tiene un determinado rango de aplicación que depende la amplitud, del periodo y del calado. Fuera de este rango las simplificaciones producen bastante error y son necesarias teorías no lineales.

Por otro lado, existen las teorías no lineales que permiten describir de una forma integral la propagación de la onda en aguas someras, intermedias. Integrando las condiciones de propagación y deformación del oleaje. Existen dos principales teorías de no linealidad, la teoría de stocks y a la teoría senoidal de oleaje, la utilización de cada una depende de los parámetros como amplitud, periodo o calado del sitio dónde se desplace la ola.

La teoría del oleaje de Stokes (1847) tiene su rango de utilización en aguas profundas o relativamente profundas, y deriva de la solución de segundo orden de las ecuaciones de contorno de superficie. La solución de primer orden corresponde con la teoría lineal o de pequeña amplitud. Mientras que Korteweg y Vries (1895) resolvieron el sistema de ecuaciones no lineal teniendo en cuenta los efectos de dispersión (profundidad finita) y de no linealidad (amplitud finita), por lo que son aplicables en propagación en aguas intermedias. Korteweg y Vries utilizaron aproximaciones de primer orden. Una solución de tercer orden fue calculada por Isobe, Nishimura y Horikawa (1978).

3.4 MITIGACIÓN

Como se ha estudiado en los apartados anteriores un proceso de mitigación es complicado ya que se ven participes muchas variables tanto externas al puerto como interna, lo que ha originado el desarrollo de modelos numéricos como se vio en el apartado anterior con el fin de estudiar mejor el fenómeno y poder crear estructuras de abrigo adecuadas para evitarlo a toda costa. De igual manera se ha recurrido a generar modelos a escala con la intención de analizar si las estructuras de protección son útiles.

La geometría del puerto es un factor predominante sobre la producción de resonancia en un puerto, la mayoría de los estudios se concentran únicamente en los efectos producidos de acuerdo a la geometría interna del puerto, pero pocos se concentran en la geometría externa que tiene gran importancia.



Figura 3. 9. Modelo a escala, Laboratorio del Instituto Mexicano del Transporte

Por lo cual es importante atender la geometría externa creando obras deabierto adecuadas y eficientes que permitan proteger de la mejor manera el puerto. Se han desarrollado en lo últimos años nuevas tecnologías para reducir estos fenómenos enfocado principalmente a las ondas largas, desde materiales para rompeolas con gran capacidad de reducción de energía, así como nuevas barreras verticales que eliminan por completo la reflexión de la onda sin perder la transferencia de masa de agua entre el puerto y el mar.

Uno de los aspectos sobre lo que hay que poner mucha atención es en el diseño de rompeolas, desafortunadamente como se vio en el capítulo 2, en México no existe un buen manual de diseño de rompeolas o estructuras de abrigo a comparación de otros países, es necesario seguir avanzando en la implementación de nuevas tecnologías que brinden seguridad y reducir al mínimo las catástrofes.



Figura 3. 10. Construcción de coraza de rompeolas con Core-Loc

Otra forma importante de mitigación es elegir una adecuada orientación de las estructuras constitutivas del puerto, ya que podremos tener lo último en tecnología de materiales o diseño de obras, pero si se presenta una mala orientación nada podrá evitar que se presenten estos fenómenos. Es importante primero hacer un análisis de las condiciones locales, conocer las condiciones meteorológicas y oceánicas predominantes para que a partir de ellas se genere un diseño adecuado a los requerimientos. Entre los aspectos a considerar se encuentra el tipo, forma, materiales y características físicas de nuestras obras de abrigo, orientación adecuada de la boca de entrada y su geometría interna, ya que como analizaremos más adelante dependiendo de la ubicación de cada uno de ellos, será la perturbación generada en su interior.

Uno de los objetivos de esta tesis es establecer recomendaciones generales al lector para un pre-diseño conociendo ciertas características del oleaje como su ángulo de incidencia y periodos. Además de analizar un caso real para saber si sus obras de abrigo son adecuadas para condiciones estables y de tormenta.

Modelado Numérico

4 MODELADO NUMÉRICO

El objetivo de este trabajo de Tesis es establecer parámetros utilizables para la correcta ubicación y construcción de los recintos portuarios, ya sea de nuevos proyectos que están en la etapa de planeación, como de ampliaciones a puertos existentes.

Para poder hacerlo de manera efectiva y con diseños funcionales, se debe de dar solución al problema de la propagación del oleaje en la cercanía en la línea de costa. Existen muchas teorías y modelos matemáticos que buscan representar este problema de la forma más aproximada a la realidad. Estas teorías se basan todas en la premisa de que el oleaje es un proceso probabilístico aleatorio.

Adoptando para este trabajo la definición adoptada por el Dr. Rodolfo Silva Casarín se establece que:

- El oleaje es un proceso estocástico, es decir que es resultado de un experimento, en el cual no es un número sino una función.
- El oleaje es un proceso estacionario, ya que las características externas que influyen en el permanecen constantes durante cierto periodo de tiempo.
- El oleaje es un proceso ergódico, lo que quiere decir que la correlación y la media no varían cuando se calculan sobre diferentes muestras.

Es importante hacer una rápida descripción de los fenómenos que presenta el oleaje al aproximarse a la frontera tierra-agua, independientemente de que sea una playa o un puerto artificial.

Al aproximarse a la frontera tierra-agua, el oleaje experimenta el efecto que tiene el fondo del océano sobre su comportamiento, dando lugar a fenómenos como la refracción, difracción y la reflexión, que se ven reflejados en la modificación de características como la longitud y la altura de la ola.

Además, también presenta otros fenómenos asociados a su naturaleza como fluido y su interacción con un medio físico como lo es la forma de la costa, que influyen en la forma de las olas y la superficie libre del agua. Ejemplo de ello son el someramiento, la generación de corrientes, y la rotura del tren de oleaje sobre la tierra.

Estos fenómenos cumplen funciones de disipación de energía cinética y potencial del oleaje, además de evidenciar la interacción que existe entre el fondo del medio y la propagación del oleaje.

Los fenómenos mencionados pueden ser estudiados con mayor detalle en libros de texto dedicados al estudio del oleaje, ya que en este trabajo nos enfocaremos a; fenómenos que han sido estudiados y para los que han sido desarrolladas varias teorías que buscan lograr su correcto estudio, descripción y predicción.

4.1 ECUACIÓN DE LA PENDIENTE SUAVE.

Otra forma de abordar el problema es considerar el flujo que se presenta dentro del movimiento del oleaje como irrotacional, el fluido incompresible (suposición muy válida dentro de la Ingeniería Hidráulica) y que el proceso es lineal.

Estas suposiciones permitieron modelar el fenómeno con ayuda de la **Ecuación de la Pendiente Suave (MSE)**, obtenida por primera vez a través de la derivación por Berkhoff, 1972.

Para que el modelo tuviera validez y fuera ligeramente más sencillo de resolver, se hacen dos consideraciones importantes:

- El fondo donde se propaga el oleaje es impermeable.
- La variación de la profundidad del fondo es muy lenta, menor a 1:3.

La segunda condición para esta ecuación es la que representa mayor problema para nosotros. Si bien es una consideración muy válida y útil para el estudio de la propagación en playas con talud suave o estuarios y bahías que se extienden hacia dentro de la línea de costa, presenta complicaciones para el estudio en playas verticales, con taludes pronunciados y en donde el talud continental es muy pronunciado.

El problema radica en que generalmente, el segundo tipo de playa es el que presenta mejores condiciones para la construcción de un Puerto de Altura, debido principalmente a la ventaja de no ser necesario un dragado excesivo para mantener calados adecuados dentro de los canales de navegación y, además, la necesidad de colocar las obras de protección a cierta distancia de la línea de costa, lejos de la zona más baja de los tirantes.

4.1.1 Ecuación Modificada de la Pendiente Suave.

Para dar solución al problema que se presenta en aproximaciones costeras con taludes pronunciados, diversos investigadores hicieron un profundo análisis matemático y físico para poder determinar qué parámetros influyen en la propagación del oleaje con batimetrías irregulares, y así poder modelarlas matemáticamente. Ha habido muchos investigadores que han desarrollado este modelo, como lo son (Massel 1993), (Chamberlain and Porter 1995), (Kirby and Dalrymple 1994) y (Losada, Silva et al. 1996b), quienes desarrollaron la llamada ecuación modificada de la pendiente suave, la cual, al considerar los términos de segundo orden que despreciara (Berkhoff 1972), representa con mayor precisión la propagación del oleaje en presencia de batimetrías complicadas y sin la restricción de “fondo suave”.

Este modelo numérico es de especial importancia debido a que el software usado para este análisis (**MWAPO4**), desarrollado por el Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, es el utilizado para la simulación de la propagación del oleaje.

El desarrollo a detenimiento de la Ecuación Modificada de la Pendiente Suave puede ser consultado en el *Manual del usuario y documento de referencia del Programa MWAPO4*, elaborado por el Dr. Rodolfo Silva Casarín y editado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

A continuación, se presentan las consideraciones más importantes que se deben tener para comprender de manera rápida la Ecuación Modificada de la Pendiente Suave.

4.1.2 Desarrollo Matemático.

Para poder desarrollar la ecuación, se considera al flujo como incomprensible, homogéneo e irrotacional sobre un fondo de superficie $h(x,y)$, siendo x e y las coordenadas cartesianas horizontales.

Prosiguiendo, es necesario hacer notar que el desarrollo de esta ecuación se basa en la Teoría de Stokes, una condición que automáticamente limita a que la ecuación modificada de la pendiente suave solo es válida en las condiciones en que la Teoría de Stokes es válida, siendo limitado principalmente por la No Linealidad que llega a presentarse en el fenómeno del oleaje.

Esta No Linealidad está medida por el número de Ursell; si llega a ser mayor de 40, la solución de Stokes es inválida. Sin embargo, si se modifica la relación de dispersión que ofrece la teoría de Stokes para tomar en cuenta la amplitud de onda.

De esta manera, se puede modelar la transición de la propagación del oleaje, desde aguas profundas (en donde la Teoría de Stokes es válida y aplicable), hacia las zonas de baja profundidad (en donde la dispersión tiende a la de una onda solitaria), en las cuales es aplicable la expresión no lineal de Hedges.

4.1.3 Consideraciones Físicas.

Tomando en cuenta el principal problema a resolver (el efecto del fondo sobre el tren de oleaje y su influencia sobre su rotura), el modelo de la ecuación de la pendiente suave introduce la disipación de energía dentro de los parámetros que influyen en el comportamiento de los resultados numéricos.

Específicamente, considera los siguientes fenómenos:

- Amortiguamiento por fricción de fondo.
- Se considera un factor de fricción del modelo propuesto por Darcy-Weisbach, en donde la lámina de agua del fondo se comporta de forma turbulenta.
- Disipación de energía debida a la rotura del oleaje.

La ecuación modificada de la pendiente suave considera el modelo de rotura que determina la variación espacial de la energía del oleaje, ya que este tiene la ventaja de que puede describir tanto la rotura como la eventual recomposición de las olas, fundamental en el estudio de la propagación del oleaje. El modelo que se utiliza en este desarrollo es el propuesto por (Dally, Dean et al. 1985), el cual parte de un punto en aguas profundas e inicia su recorrido sobre aguas someras, con una inclinación del fondo inicial suave y horizontal al final.

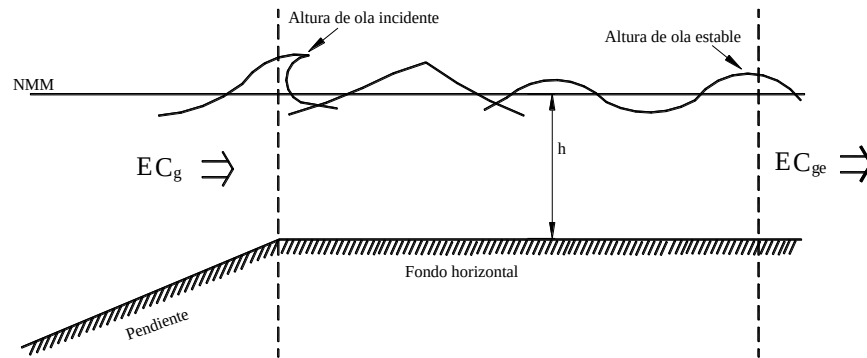


Figura 4. 1. Perfil idealizado de la zona rompiente, para el modelo de disipación de rotura, (Dally, Dean et al. 1985)

4.2 SOFTWARE MWAPO4

El programa MWAPO4 es un modelo desarrollado para representar la propagación del oleaje sobre fondo variable. Funciona resolviendo la ecuación modificada de pendiente suave, mostrada en este trabajo, en dos dimensiones.

Los resultados que genera permiten hacer aproximaciones muy grandes a los valores reales de la refracción, difracción, someramiento, reflexión y disipación inducida por fricción de fondo y la rotura del oleaje.

El nombre corresponde con las siglas *W*Ave *P*ropagation *O*n the *c*oast versión 4, desarrollado por el Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El lenguaje de programación utilizado es Fortran 77, y se encuentra dividido en 4 archivos ejecutables:

- BWAPO4.exe
- mwapo_v4.exe
- OLUCA_UNAM.exe

- WAPO_V4.exe

El ejecutable mwapo_v4.exe es el módulo central del programa, en donde ese maneja la interfaz del usuario y la captura de datos para el modelo.

Una ventaja que presenta este modelo es que subdivide los procesos y rutinas en archivos ejecutables dependientes del módulo central, facilitando la revisión de errores y permitiendo modificar parámetros específicos de una manera más sencilla.

El primer módulo es el BWAPO4.exe, el cual pre-procesa los datos ingresados y a partir de condiciones iniciales y la información batimétrica del sitio, elabora una base de datos que engloba todas las condiciones que se requieren para que el siguiente módulo (WAPO_V4.exe) funcione. Su tarea principal es la lectura, interpretación y organización de los datos batimétricos y los ficheros de datos creados por el usuario. A partir de esto genera mallas con la información relativa a coeficientes de reflexión, fricción y disipación.

El siguiente modulo es el programa de proceso WAPO_V4.exe, el cual lee los datos generados por BWAPO4.exe y resuelve las ecuaciones de frontera para cada punto de la malla. Se encuentra dividido en una rutina principal y 8 subrutinas.

Rutina principal. Está diseñada para que por pantalla se lea información relacionada con el nombre del fichero que tiene la información general de la corrida o la lista de casos a ser ejecutados.

Subrutina LEODATA. Aquí se lee de un fichero el mapa de condiciones iniciales.

Subrutina WVNUM. Evalúa los números de onda locales para todo el dominio.

Subrutina ZKC. Para todo el dominio de cálculo, evalúa los términos de disipación.

Subrutina LATERAP. Aquí se evalúa el potencial de velocidades incidente, tanto para fondo constante como para fondo variable.

Subrutina COEFF. Aquí es donde se construye la matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones.

Subrutina SOLVER. Es la parte del programa donde se resuelve el sistema de ecuaciones utilizando Gauss con pivoteo parcial.

Subrutina ANGU. En esta rutina se evalúa el ángulo del oleaje para cada celda del dominio.

Subrutina GRD. Es la rutina diseñada para la escritura de resultados.

De manera general, a continuación, se presenta el flujo-grama del programa:

1. Desde pantalla se decide si es un caso individual o se leerá desde un archivo una lista de casos
2. Si es caso único, lee desde pantalla el nombre del fichero con las condiciones generales, de lo contrario lee desde el fichero que contiene la lista de casos.
3. Va a la subrutina LEODATA y lee el mapa de condiciones iniciales.
4. Calcula el número de onda para cada celda de acuerdo a la información dada en el fichero de condiciones generales.
5. Calcula los coeficientes de disipación (rotura y fricción de fondo).
6. Calcula el potencial de velocidades en las fronteras abiertas.
7. Calcula los coeficientes del sistema de ecuaciones.
8. Resuelve el sistema de ecuaciones con SOLVER.
9. Si en el archivo de condiciones generales se impuso la condición de rotura, se revisa que no exista ninguna celda donde se viole dicha condición. En caso que exista alguna celda donde el oleaje viole dicha condición se regresa al punto 4. Para los casos en los cuales ese haya impuesto fricción de fondo y sin condición de rotura se realizan dos iteraciones a partir del punto 4.

10. Se calcula el ángulo local del oleaje para todos los puntos de la malla.
11. Se escriben los resultados.
12. En caso que se haya optado por la condición de múltiples casos, se regresa al punto 2 hasta que haya concluido con la lista.

El último módulo es el OLUCA-UNAM.exe, el cual es un programa independiente que resuelve la ecuación modificada de pendiente suave a través de una aproximación parabólica, y, por ende, a diferencia del modelo WAPO_V4.exe, no considera los efectos de reflexión, por lo que se ve limitado en la reproducción de los efectos de difracción. A pesar de esto, es más veloz que el WAPO_V4.exe y es muy útil en los casos en que se requiere llevar el oleaje hacia aguas intermedias. El programa ejecuta una versión del Ref-Dif (Kirby & Dalrymple, 1986); es llamado OLUCA-UNAM respetando el nombre que se le dio a una versión similar adaptada por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y Costera de la Universidad de Cantabria, España.

4.2.1 Ejecución del programa

4.2.1.1 Ficheros de entrada

Para hacer una corrida de cálculo, el programa MWAPO_V4.exe requiere de ciertos ficheros de entrada en los cuales el usuario introduce los parámetros que se tienen del sitio en estudio. Dichos archivos son:

- Batimetría.
- Debe ser un archivo con extensión. GRD; una opción recomendable es generarlo por el programa Surfer, ya que es muy sencillo modificar archivos. GRD para transformarlos en la versión que nuestro modelo necesita (GRD Surfer 6 Text Grid).
- Archivo de condiciones de entrada.
- Es un archivo con la extensión. INP, creado con el Bloc de Notas.

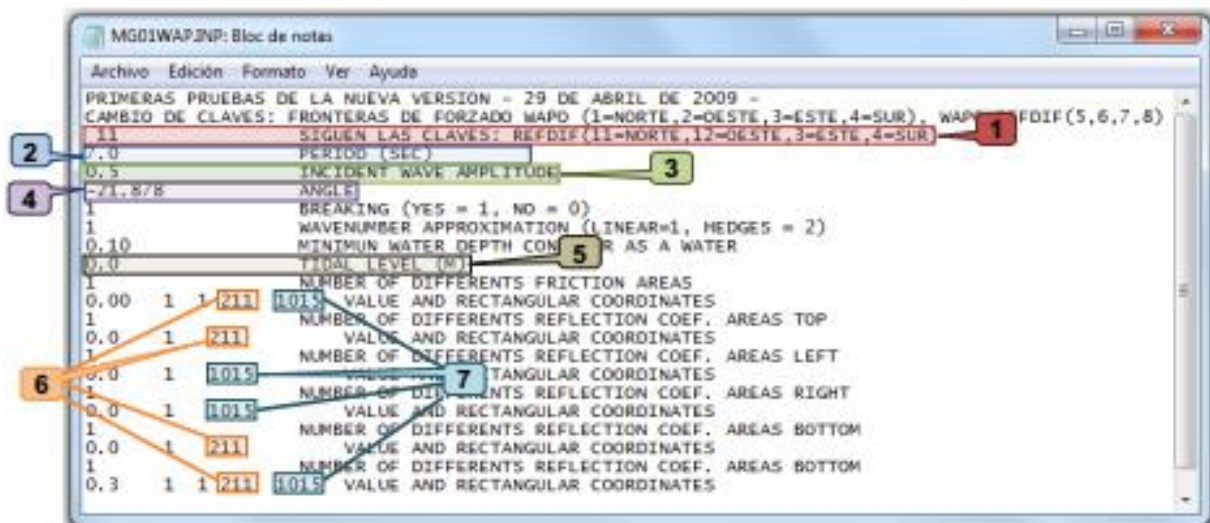


Figura 4. 2. Documento de ingreso de datos para el programa

1. Es la frontera de propagación elegida.
2. Periodo del oleaje.
3. Amplitud del oleaje incidente.
4. Ángulo de incidencia del oleaje considerando el giro de la batimetría y con respecto a la frontera de propagación.
5. Nivel de marea.
6. Número de celdas en la dirección X.
7. Número de celdas en la dirección Y.

- Archivo de casos.

Este es un archivo con extensión .TXT donde se nombran todos los casos que se van a ejecutar. Su estructura es la siguiente:

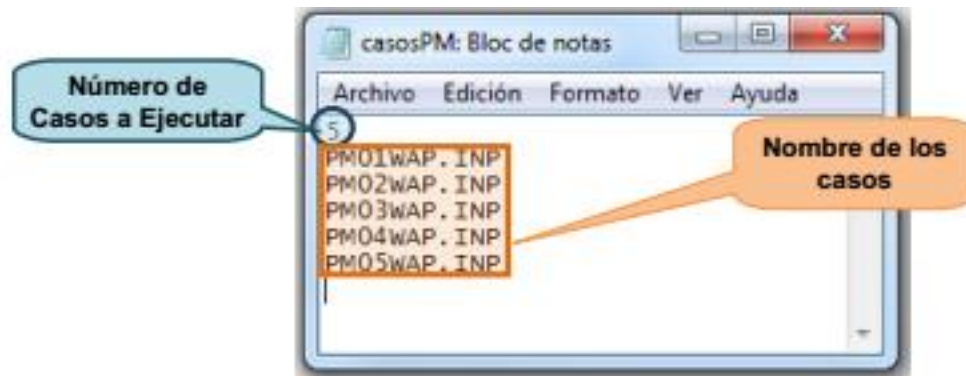


Figura 4. 3. Archivo de casos

Para mayores referencias de cómo utilizar el software, se invita al lector a consultar los documentos *Manual rápido WAPO y COCO*, *Manual del usuario y documento de referencia del Programa MWAPO* y el *WAPO and COCO Models, Quick Guide*, editados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

4.2.1.2 Archivos de Salida.

Una vez finalizada la corrida de cálculo, el programa ha generado los siguientes archivos 8 archivos, de los cuales solamente son de utilidad, para este trabajo, los archivos con terminación AMP y SUP, ambos con la extensión GRD.

El archivo AMP presenta las amplitudes del oleaje y el archivo SUP la superficie libre instantánea dentro de las mallas. Estos resultados se pueden graficar con el programa Surfer.

5 CASOS DE ESTUDIO

En este capítulo se modelarán diferentes formas de recintos portuarios a través del software WAPO descrito anteriormente, con la finalidad de analizar de forma detallada la manera en que las distintas condiciones de oleaje, combinadas con las condiciones de diseño del puerto, pueden ocasionar efectos de resonancia y propagación en los recintos portuarios.

Para ello, estudiaremos en primera instancia formas básicas de puertos estableciendo criterios de diseño generales, partiendo de esas bases se analizarán 2 casos de estudio de puertos reales al cuál aplicaremos todos los criterios vistos en los anteriores capítulos.

Para estudiar objetivamente los casos de estudio de Manzanillo y Veracruz, fue necesario determinar el nivel de protección que el Puerto tiene contra los fenómenos de la propagación del oleaje. Se debe de hacer un análisis estadístico sobre los registros históricos del oleaje en las zonas de estudio.

Esto implica encontrar los registros con mayor repetición, y por extensión los de mayor probabilidad de ocurrencia, de altura, dirección y periodo de oleaje. Para lograrlo, se hicieron consultas a diferentes bases de datos, incluyendo los registros históricos del Sistema Meteorológico Nacional, algunas cartas de oleaje antiguas de la Comisión Nacional del Agua y registros de sistemas de registro independientes como Windfinder ®

Después de comparar información, se decidió utilizar el **Atlas de Clima Marítimo de la Vertiente Pacífica Mexicana**, documento elaborado por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en el cual se hace un análisis y resumen de los datos históricos en un periodo comprendido desde 1948 hasta 2007.

La decisión de utilizar esta fuente de información está sustentada por la confiabilidad de los datos presentados y la información adicional de las condiciones de oleaje, puesto que no se limita a presentar altura y dirección del oleaje, sino que presenta también análisis de las condiciones en periodos estacionales y en condiciones de Tormenta.

5.1 FORMAS TÍPICAS DE RECINTOS PORTUARIOS

Con la intención de generalizar los resultados que se obtengan de estos estudios y de que este trabajo sirva como documento de consulta y referencia, las dimensiones, tanto de la geometría de puerto, como de las obras de protección se establecieron de manera proporcional a la Longitud de onda, calculada a través de la expresión de Longitud de onda para aguas profundas de la Teoría de Airy.

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2$$

La altura de ola incidente fue establecida de 1 [m], de forma que los resultados puedan extrapolarse a cualquier altura de oleaje que se maneje.

Los periodos de 5 y 8 [s] corresponden a los periodos de oleaje más comunes en las costas mexicanas. Además, estos periodos permiten el estudio de oleaje local y distante, de forma que se cubre las condiciones más usuales de operación de un puerto. Las condiciones extraordinarias requieren un estudio especializado, no generalizado.

De esta manera, se tienen las siguientes longitudes de onda para los dos periodos analizados:

- T=5 [s], L=39.03 [m], redondeado a 40 [m].
- T=8 [s], L=99.92 [m], redondeado a 100 [m].

Partiremos de 3 geometrías básicas de puertos usando formas que se usan generalmente en el diseño de obras portuarias:

- Forma rectangular de tipo “U” simple. En esta configuración las zonas de atraque se ubican a lo largo del puerto (Fig. 5.1.). Generalmente son usados en puertos fluviales, no en puertos

de Altamar, o en puertos con canales de acceso muy largos, como es el caso de **los Puertos en Nueva York y el Puerto de Brownsville**. Son utilizados principalmente para terminales de cruceros, puertos de cabotaje y puertos pesqueros.



Figura 5. 1. Puerto de Brownsville

- Ampliación interior con canal de acceso. Como se observa en la (Fig. 5.2.), las características principales son la amplia zona interior, con espacio de maniobra y zonas de atraque, a la cual se accede por medio de un canal de acceso más angosto y de mayor longitud. La configuración de este puerto es similar a la que se tiene en el **Puerto de Manzanillo**.

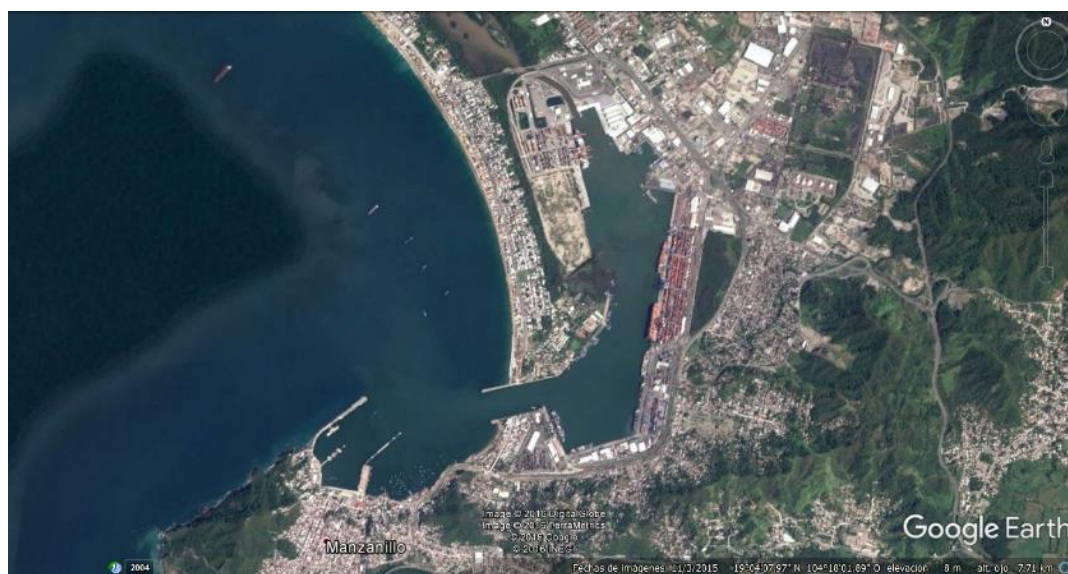


Figura 5. 2. Puerto de Manzanillo

- Forma “Y” (Fig. 5.3.). Acceso con un canal principal que termina, por lo general, en una dársena de maniobra. Permite el flujo en 2 o más canales secundarios, que los llevan a las zonas de atraque. Una ventaja de esta geometría es que permite tener mayor cantidad de muelles para los diferentes materiales que se carguen o descarguen, además de permitir en ciertas ocasiones la transferencia de carga directa entre dos buques, por tal motivo, el tráfico en su interior es mayor y suelen tener un ancho de bocana suficiente para poder

tener la circulación de 2 barcos en el canal de acceso. El **Puerto de Lázaro Cárdenas** y **Puerto Chiapas** presentan una configuración similar.



Figura 5. 3. Puerto Chiapas

Para el trazado de la batimetría y geometría se utilizó el programa Surfer®13 el cual, como se mencionó en el capítulo anterior es una herramienta compatible con el software WAPO.

Surfer® permite dibujar batimetrías que son generadas por el programa en archivos de texto legibles para su análisis en WAPO, que a su vez emite los resultados en archivos de texto compatibles con Surfer®13 generando mapas de contorno del oleaje para analizar los resultados obtenidos.

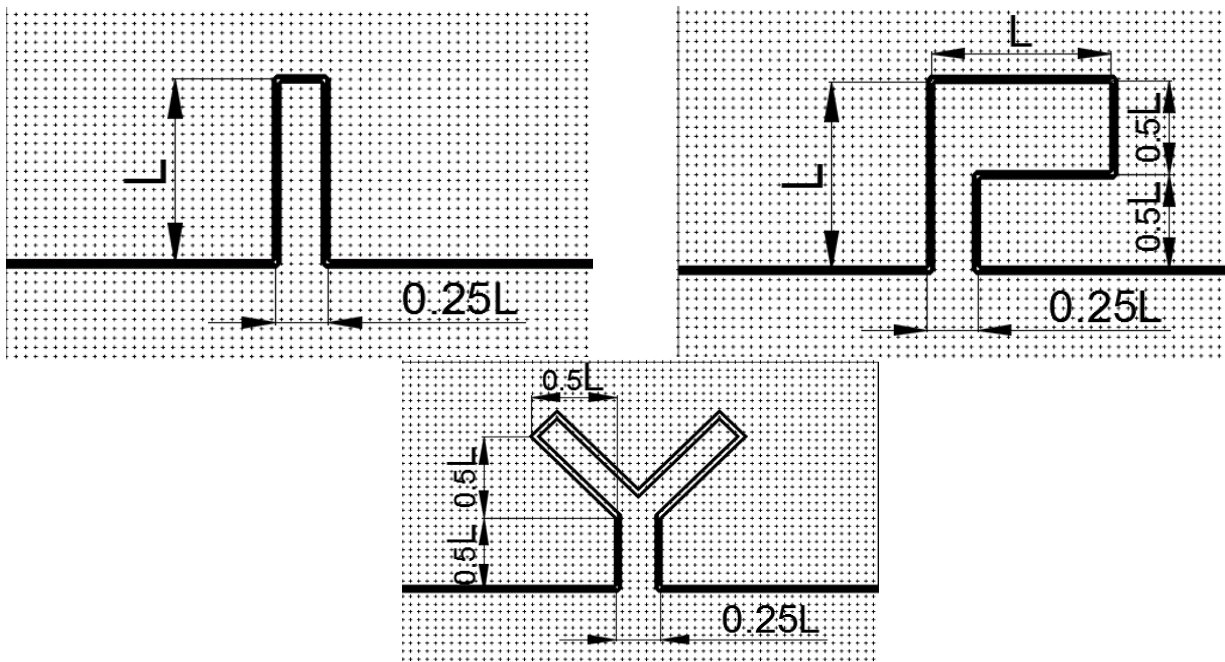


Figura 5. 4. Geometrías básicas a modelar, en función de la longitud de onda

Con la intención de hacer una comparativa para establecer recomendaciones de diseño, se establecerán variantes en las condiciones geométricas y de oleaje, formando casos de prueba a los que se someterán las 3 geometrías.

Es importante recordar que las dimensiones, tanto de la geometría de puerto, como de las obras de protección se establecieron de manera proporcional a la Longitud de onda, calculada a través de la expresión de Longitud de onda para aguas profundas de la Teoría de Airy.

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2$$

De esta manera, se tienen las siguientes longitudes de onda para los dos periodos analizados:

- T=5 [s], L=39.03 [m], redondeado a 40 [m].
- T=8 [s], L=99.92 [m], redondeado a 100 [m].

Dado el gran número de casos que se tiene, resulta innecesario colocar todos los casos analizados, ya que se perdería la objetividad de este trabajo. Así, solamente se mostrarán los casos en que se presentó un coeficiente de propagación C_p (relación de la altura de ola local entre la incidente) mayor a uno, por la razón de que esto indica que las obras de protección del recinto no están haciendo su labor correctamente y el oleaje dentro del puerto no solo no se reduce, sino que se amplifica.

Sin embargo, sí se presentan gráficas C_p vs Ángulo de Incidencia para cada geometría y por cada periodo, en los cuales se observan los valores máximos del C_p de cada geometría para cada ángulo. De esta manera se puede valorar el nivel de protección que ofrece un rompeolas en función del periodo y dirección del oleaje incidente.

Para la variación de las condiciones geométricas, se colocaron rompeolas como obra de protección en diferentes posiciones cubriendo las variantes básicas de las estructuras de abrigo. En el caso de las condiciones de oleaje, se varió el ángulo de incidencia de la dirección de oleaje, para diferentes periodos de ola. A continuación, se presentan los casos que se modelaron con las variaciones mencionadas:

Tabla 5. Casos a modelar con geometría, periodo, ángulo de incidencia de oleaje y altura de ola

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Forma	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Altura de ola (m)
1	U	Brazo a 45°		5	-45.0	1
2	U	Brazo a 45°		5	-22.5	1
3	U	Brazo a 45°		5	0.0	1
4	U	Brazo a 45°		5	22.5	1
5	U	Brazo a 45°		5	45.0	1
6	U	Brazo a -45°		5	-45.0	1
7	U	Brazo a -45°		5	-22.5	1
8	U	Brazo a -45°		5	0.0	1
9	U	Brazo a -45°		5	22.5	1
10	U	Brazo a -45°		5	45.0	1
11	U	Laterales		5	-45.0	1
12	U	Laterales		5	-22.5	1
13	U	Laterales		5	0.0	1
14	U	Laterales		5	22.5	1
15	U	Laterales		5	45.0	1
16	U	Separado a 0.5L		5	-45.0	1
17	U	Separado a 0.5L		5	-22.5	1
18	U	Separado a 0.5L		5	0.0	1
19	U	Separado a 0.5L		5	22.5	1
20	U	Separado a 0.5L		5	45.0	1
21	U	Sin protección		5	-45.0	1
22	U	Sin protección		5	-22.5	1
23	U	Sin protección		5	0.0	1
24	U	Sin protección		5	22.5	1
25	U	Sin protección		5	45.0	1

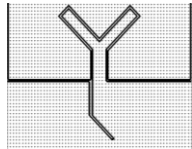
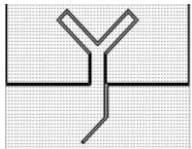
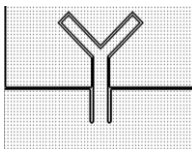
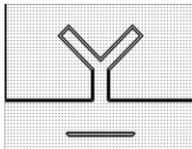
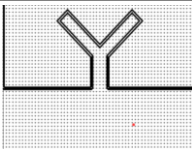
Tabla 5. Casos a modelar con geometría, periodo, ángulo de incidencia de oleaje y altura de ola (continuación)

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Forma	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Altura de ola (m)
26	U	Brazo a 45°		8	-45.0	1
27	U	Brazo a 45°		8	-22.5	1
28	U	Brazo a 45°		8	0.0	1
29	U	Brazo a 45°		8	22.5	1
30	U	Brazo a 45°		8	45.0	1
31	U	Brazo a -45°		8	-45.0	1
32	U	Brazo a -45°		8	-22.5	1
33	U	Brazo a -45°		8	0.0	1
34	U	Brazo a -45°		8	22.5	1
35	U	Brazo a -45°		8	45.0	1
36	U	Laterales		8	-45.0	1
37	U	Laterales		8	-22.5	1
38	U	Laterales		8	0.0	1
39	U	Laterales		8	22.5	1
40	U	Laterales		8	45.0	1
41	U	Separado a L		8	-45.0	1
42	U	Separado a L		8	-22.5	1
43	U	Separado a L		8	0.0	1
44	U	Separado a L		8	22.5	1
45	U	Separado a L		8	45.0	1
46	U	Sin protección		8	-45.0	1
47	U	Sin protección		8	-22.5	1
48	U	Sin protección		8	0.0	1
49	U	Sin protección		8	22.5	1
50	U	Sin protección		8	45.0	1
51	P	Brazo a 45°		5	-45.0	1
52	P	Brazo a 45°		5	-22.5	1
53	P	Brazo a 45°		5	0.0	1
54	P	Brazo a 45°		5	22.5	1
55	P	Brazo a 45°		5	45.0	1
56	P	Brazo a -45°		5	-45.0	1
57	P	Brazo a -45°		5	-22.5	1
58	P	Brazo a -45°		5	0.0	1
59	P	Brazo a -45°		5	22.5	1
60	P	Brazo a -45°		5	45.0	1
61	P	Laterales		5	-45.0	1
62	P	Laterales		5	-22.5	1
63	P	Laterales		5	0.0	1
64	P	Laterales		5	22.5	1
65	P	Laterales		5	45.0	1
66	P	Separado a L		5	-45.0	1
67	P	Separado a L		5	-22.5	1
68	P	Separado a L		5	0.0	1
69	P	Separado a L		5	22.5	1
70	P	Separado a L		5	45.0	1
71	P	Sin protección		5	-45.0	1
72	P	Sin protección		5	-22.5	1
73	P	Sin protección		5	0.0	1
74	P	Sin protección		5	22.5	1
75	P	Sin protección		5	45.0	1

Tabla 5. Casos a modelar con geometría, periodo, ángulo de incidencia de oleaje y altura de ola (continuación)

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Forma	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Altura de ola (m)
76	P	Brazo a 45°		8	-45.0	1
77	P	Brazo a 45°		8	-22.5	1
78	P	Brazo a 45°		8	0.0	1
79	P	Brazo a 45°		8	22.5	1
80	P	Brazo a 45°		8	45.0	1
81	P	Brazo a -45°		8	-45.0	1
82	P	Brazo a -45°		8	-22.5	1
83	P	Brazo a -45°		8	0.0	1
84	P	Brazo a -45°		8	22.5	1
85	P	Brazo a -45°		8	45.0	1
86	P	Laterales		8	-45.0	1
87	P	Laterales		8	-22.5	1
88	P	Laterales		8	0.0	1
89	P	Laterales		8	22.5	1
90	P	Laterales		8	45.0	1
91	P	Separado a L		8	-45.0	1
92	P	Separado a L		8	-22.5	1
93	P	Separado a L		8	0.0	1
94	P	Separado a L		8	22.5	1
95	P	Separado a L		8	45.0	1
96	P	Sin protección		8	-45.0	1
97	P	Sin protección		8	-22.5	1
98	P	Sin protección		8	0.0	1
99	P	Sin protección		8	22.5	1
100	P	Sin protección		8	45.0	1
101	Y	Brazo a 45°		5	-45.0	1
102	Y	Brazo a 45°		5	-22.5	1
103	Y	Brazo a 45°		5	0.0	1
104	Y	Brazo a 45°		5	22.5	1
105	Y	Brazo a 45°		5	45.0	1
106	Y	Brazo a -45°		5	-45.0	1
107	Y	Brazo a -45°		5	-22.5	1
108	Y	Brazo a -45°		5	0.0	1
109	Y	Brazo a -45°		5	22.5	1
110	Y	Brazo a -45°		5	45.0	1
111	Y	Laterales		5	-45.0	1
112	Y	Laterales		5	-22.5	1
113	Y	Laterales		5	0.0	1
114	Y	Laterales		5	22.5	1
115	Y	Laterales		5	45.0	1
116	Y	Separado a L		5	-45.0	1
117	Y	Separado a L		5	-22.5	1
118	Y	Separado a L		5	0.0	1
119	Y	Separado a L		5	22.5	1
120	Y	Separado a L		5	45.0	1
121	Y	Sin protección		5	-45.0	1
122	Y	Sin protección		5	-22.5	1
123	Y	Sin protección		5	0.0	1
124	Y	Sin protección		5	22.5	1
125	Y	Sin protección		5	45.0	1

Tabla 5. Casos a modelar con geometría, periodo, ángulo de incidencia de oleaje y altura de ola (continuación)

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Forma	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Altura de ola (m)
126	Y	Brazo a 45°		8	-45.0	1
127	Y	Brazo a 45°		8	-22.5	1
128	Y	Brazo a 45°		8	0.0	1
129	Y	Brazo a 45°		8	22.5	1
130	Y	Brazo a 45°		8	45.0	1
131	Y	Brazo a -45°		8	-45.0	1
132	Y	Brazo a -45°		8	-22.5	1
133	Y	Brazo a -45°		8	0.0	1
134	Y	Brazo a -45°		8	22.5	1
135	Y	Brazo a -45°		8	45.0	1
136	Y	Laterales		8	-45.0	1
137	Y	Laterales		8	-22.5	1
138	Y	Laterales		8	0.0	1
139	Y	Laterales		8	22.5	1
140	Y	Laterales		8	45.0	1
141	Y	Separado a L		8	-45.0	1
142	Y	Separado a L		8	-22.5	1
143	Y	Separado a L		8	0.0	1
144	Y	Separado a L		8	22.5	1
145	Y	Separado a L		8	45.0	1
146	Y	Sin protección		8	-45.0	1
147	Y	Sin protección		8	-22.5	1
148	Y	Sin protección		8	0.0	1
149	Y	Sin protección		8	22.5	1
150	Y	Sin protección		8	45.0	1

5.2 PRIMER GEOMETRÍA DE ESTUDIO, PUERTO EN FORMA DE U

5.2.1 Protección a 45°.

A continuación se presenta el análisis de resultados efectuado a los datos obtenidos del Software WAPO V4 para la forma geométrica más básica, la forma rectangular o “U”, protegido con un rompeolas abierto a 45°.

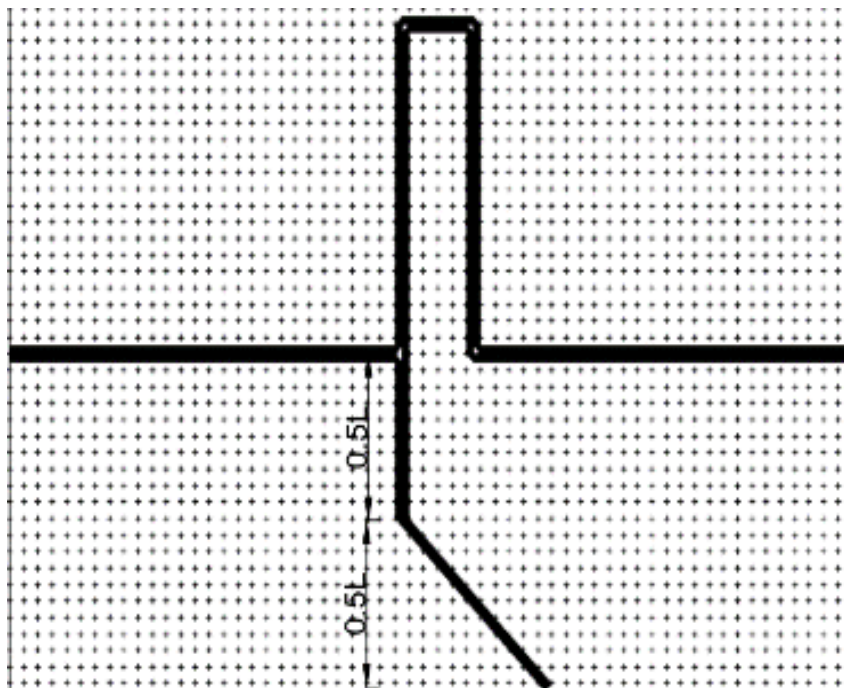


Figura 5. 5. Geometría del caso de estudio

Tabla 6. Valores de Coeficientes de Propagación para casos modelados

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Coeficiente de propagación máximo [Cp]
1	U	Brazo a 45°	5	-45°	0.1439
2	U	Brazo a 45°	5	-22.5°	0.2331
3	U	Brazo a 45°	5	0°	0.4139
4	U	Brazo a 45°	5	22.5°	0.6678
5	U	Brazo a 45°	5	45°	1.1543
26	U	Brazo a 45°	8	-45°	0.129
27	U	Brazo a 45°	8	-22.5°	0.2205
28	U	Brazo a 45°	8	0°	0.3663
29	U	Brazo a 45°	8	22.5°	0.6571
30	U	Brazo a 45°	8	45°	1.1877

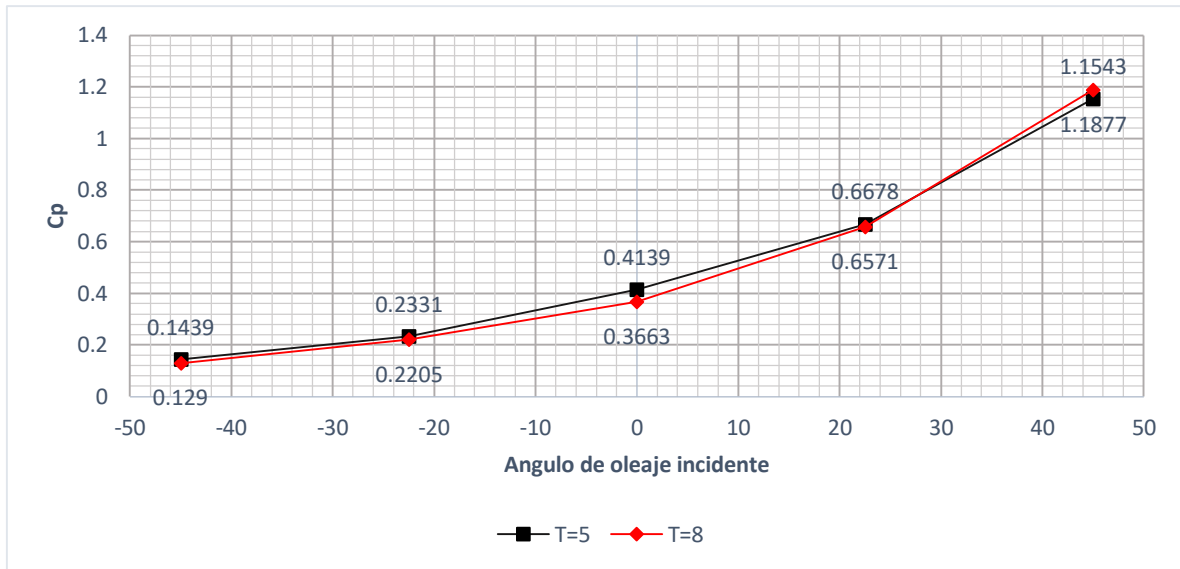


Figura 5. 6. Grafica CP vs Ángulo de incidencia de oleaje

En la figura 5.6. se muestra cómo la propagación del oleaje dentro del puerto aumenta conforme a la dirección de aproximación del oleaje.

La mejor protección se encuentra cuando el oleaje proviene del ángulo -45° , debido a que impacta directamente sobre la obra de abrigo, teniendo así un C_p mínimo de 0.1439 y 0.129 para 5 y 8 segundos respectivamente.

De igual manera, se puede observar cómo el C_p aumenta conforme a la dirección del oleaje va cambiando, llegando al punto máximo cuando el oleaje proviene de 45° . En este punto, el oleaje no solo entra prácticamente de lleno en el recinto, sino que se ve amplificado por la forma del rompeolas, el cual refleja las ondas de oleaje hacia dentro del recinto.

Caso 5

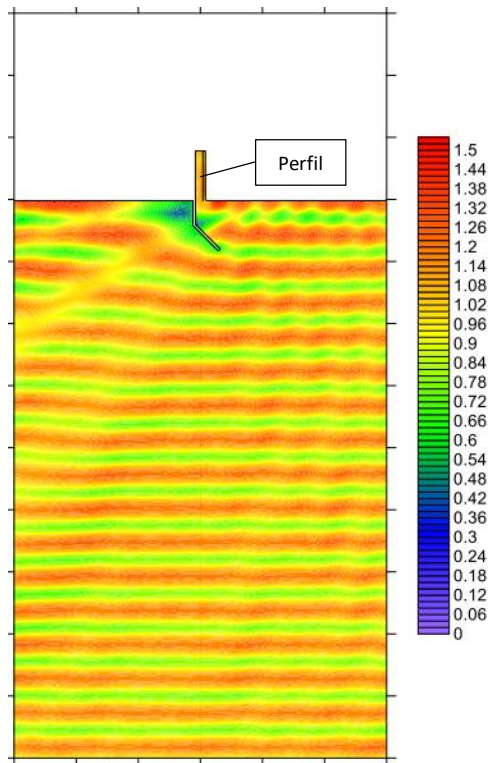


Figura 5. 7. Resultados AMP graficado en surfer

Como se mencionó antes, se puede apreciar el efecto adverso que tiene este rompeolas para el oleaje proveniente de 45°.

La parte aguas afuera del rompeolas se mantiene con coeficientes menores a 1, en promedio de 0.72, mientras que en la parte interna, rondan, en promedio valores de 1.2

Esto revela que es un **grave error** construir una obra de protección de esta forma si el oleaje dominante proviene de esta región. Lo cual se podía saber de manera intuitiva.

Es recomendable hacer estudios más a fondo acerca de los efectos que se tienen dentro del recinto y además, probar complementar esta obra con otra más corta o pequeña que reduzca la entrada del oleaje al recinto. Si fuera necesario hacer una obra de este tipo.

El coeficiente de propagación varía dentro del recinto, teniendo los valores más altos en la zona derecha, junto al área de atraque. Esta situación es muy alarmante debido a que impedirá cualquier operación e incluso es incapaz de brindar abrigo y protección ante fenómenos meteorológicos.

Se puede observar que el C_p se mantiene constante y en su punto más alto hasta llegar a las afueras del puerto, lo cual demuestra la ineffectividad de las obras de protección para esta condición de oleaje.

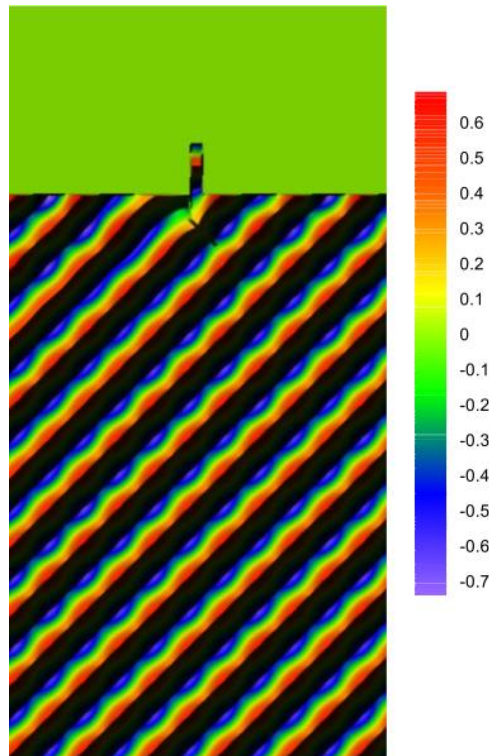


Figura 5. 9. Resultados SUP graficado en surfer

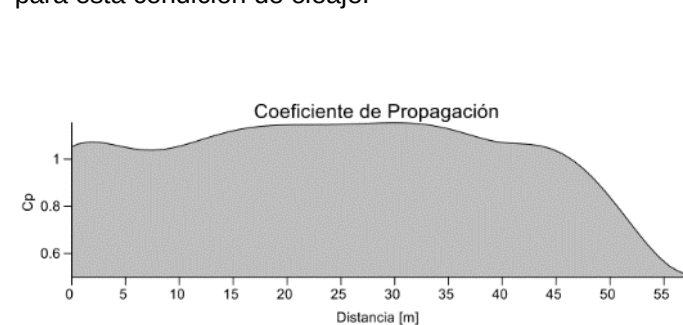


Figura 5. 8. Perfil de los CP por el canal de acceso

Caso 30

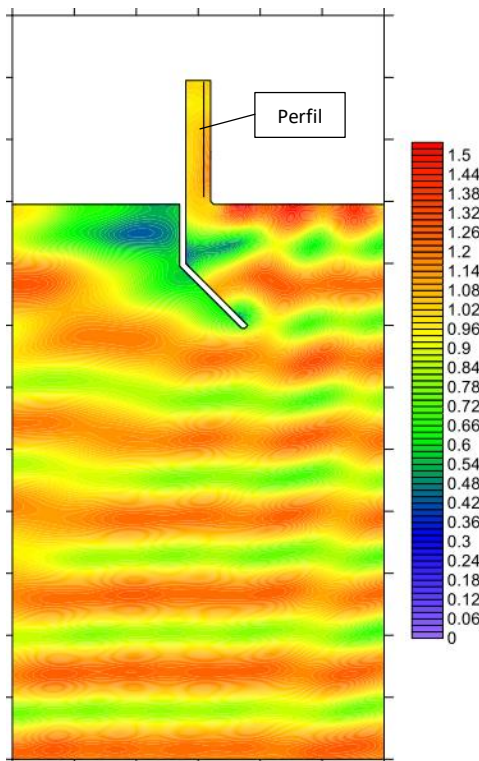


Figura 5. 10. Resultados AMP graficado en surfer

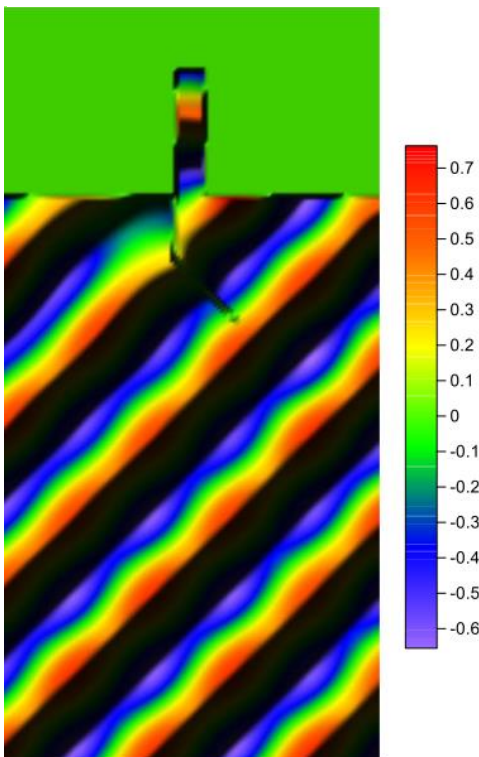


Figura 5. 11. Resultados SUP graficado en surfer

Como era de esperarse, el caso 30 presentó también coeficientes de propagación muy altos, ya que comparte la misma geometría que el caso 5, y el oleaje incidente proviene de la misma dirección (45°). Es interesante notar que el aumento del periodo, y por consiguiente el aumento de las dimensiones del puerto, no representaron una diferencia significativa entre los resultados que se obtuvieron, ya que incluso los coeficientes de propagación fueron de 1.15 y 1.18 para $T= 5$ [s] y $T= 8$ [s] , respectivamente.

De nuevo, la zona de mayor afectación dentro del recinto es zona del lado derecho en las áreas de atraque.

En el gráfico de la superficie libre se puede observar que las aguas dentro del recinto no se encuentran de ninguna manera en calma.

El análisis de estos dos casos nos indica que esta protección para esta geometría y estas condiciones de oleaje, es prácticamente inútil para mitigar los efectos de la propagación debido al oleaje.

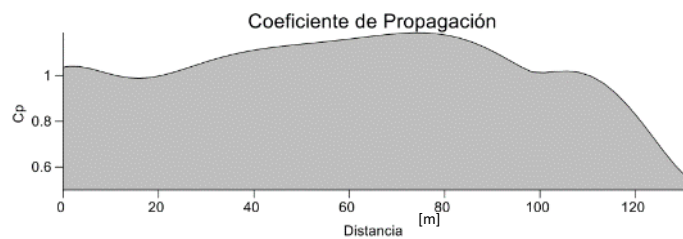


Figura 5. 12. Perfil del Coeficiente de Propagación

5.2.2 Protección Lateral.

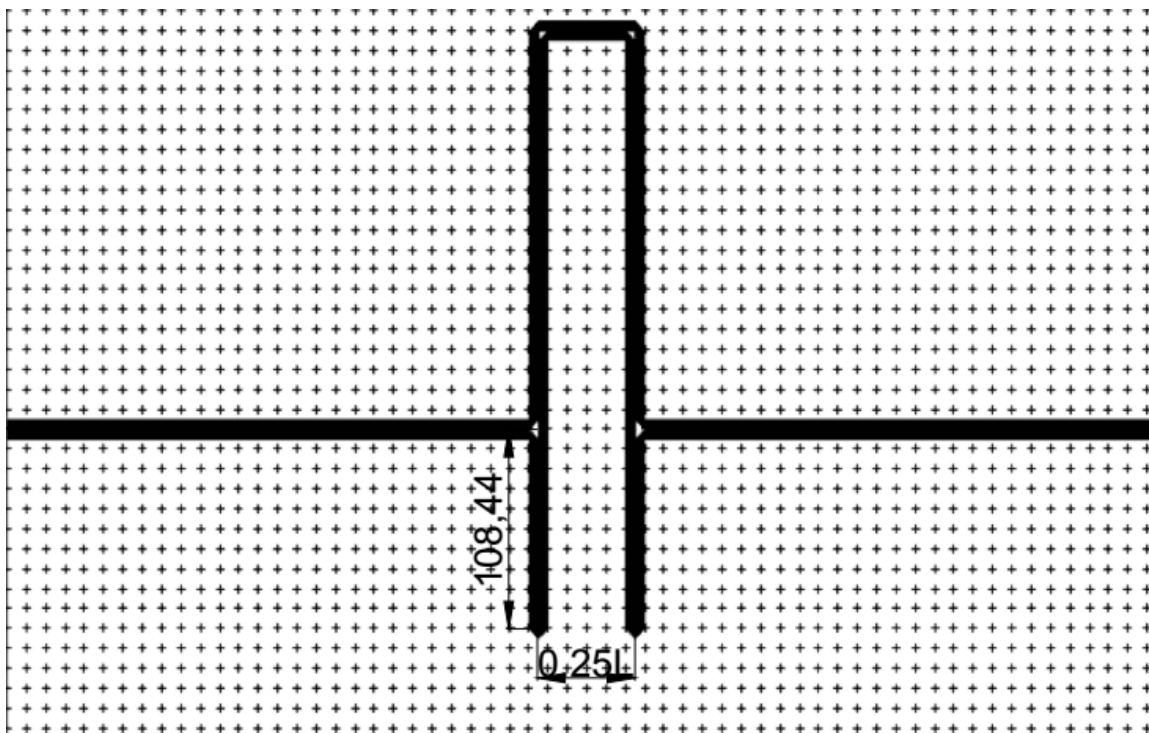


Figura 5. 13. Modelo GRID del caso teórico

Tabla 7. Valores máximos del coeficiente de propagación.

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Coeficiente de propagación máximo [Cp]
11	U	Lateral	5	-45°	1.0149
12	U	Lateral	5	-22.5°	1.0844
13	U	Lateral	5	0°	1.0984
14	U	Lateral	5	22.5°	1.0687
15	U	Lateral	5	45°	1.0451
36	U	Lateral	8	-45°	1.1351
37	U	Lateral	8	-22.5°	1.0614
38	U	Lateral	8	0°	1.0825
39	U	Lateral	8	22.5°	1.0596
40	U	Lateral	8	45°	1.0613

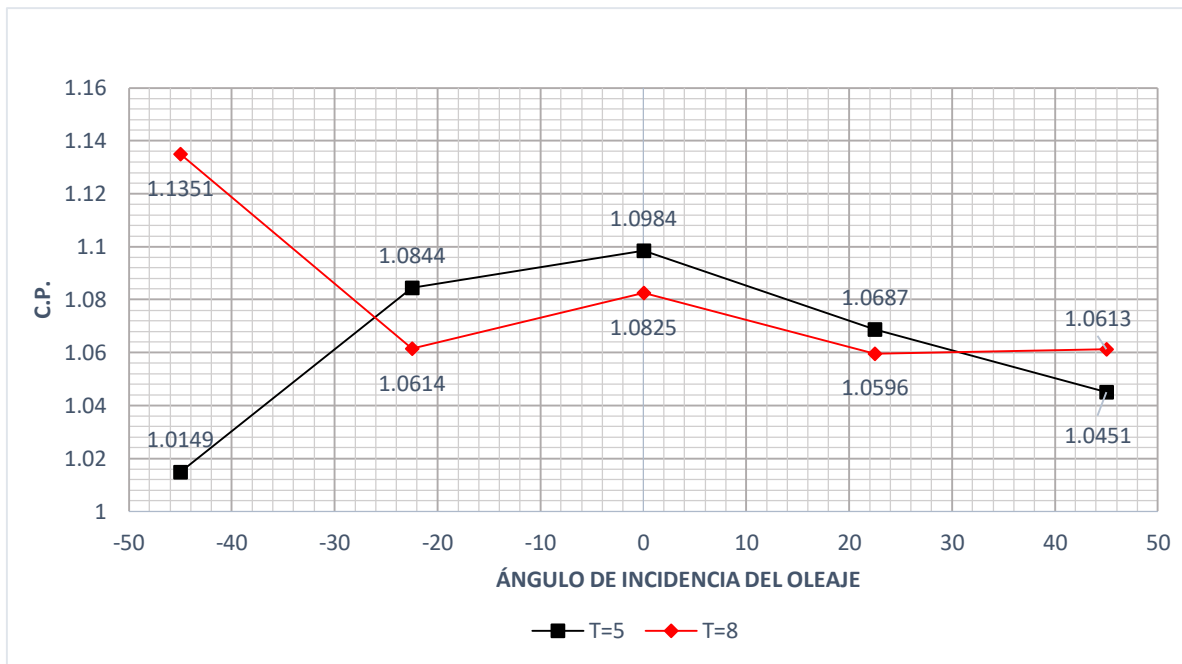


Figura 5. 14. Comparación de C.P. vs. Ángulo de Incidencia para ambos periodos

Los resultados que se han obtenido para el estudio de este caso, revelan que esta protección es una de las peores que se podrían considerar para estas condiciones geométricas y del oleaje incidente.

Una posible razón de esto es que la protección es básicamente una extensión del canal de acceso y el recinto interior, es decir, geométricamente es una saliente respecto a la línea de costa.

Esto provoca que el efecto mitigante que el rompeolas tiene sobre el oleaje incidente sea muy bajo en comparación con rompeolas de otra geometría, como se ha visto en los demás casos estudiados.

La situación encontrada es muy delicada, ya que las condiciones geométricas del puerto y de la protección propuesta en este estudio, reúnen las condiciones ideales que propician la resonancia en cuerpos de agua semi-cerrados.

Caso 36

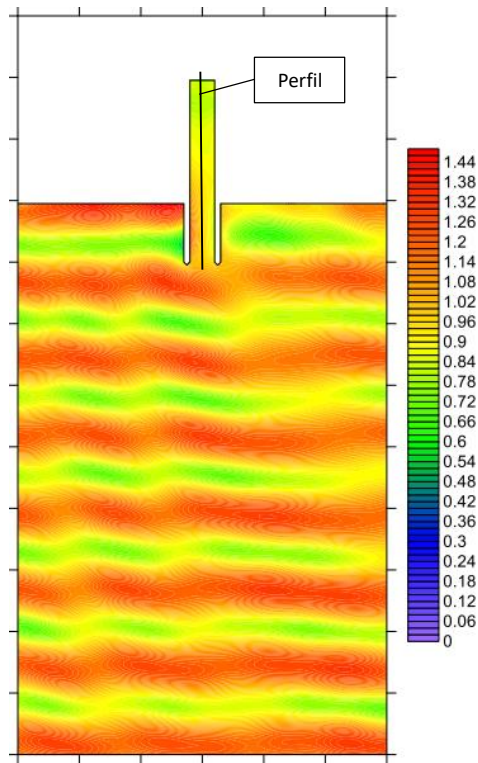


Figura 5. 16. Resultados AMP graficado en surfer

Se puede observar el nulo efecto que tiene el rompeolas sobre el oleaje que incide. El oleaje que se acerca más allá de la línea azul logra ingresar al canal de acceso prácticamente sin sentir el rompeolas izquierdo, mientras que al ingresar sufre el efecto de reflexión provocado por el rompeolas derecho.

A partir de ese momento, el oleaje “rebota” dentro de la bocana y hasta llegar al recinto interior.

Este fenómeno es el que provoca que la propagación dentro del puerto aumente, en lugar de disminuirse por efecto de los rompeolas.

La bocana del puerto resiente los mayores efectos de la turbulencia, como se puede apreciar en el perfil del coeficiente de propagación obtenido.

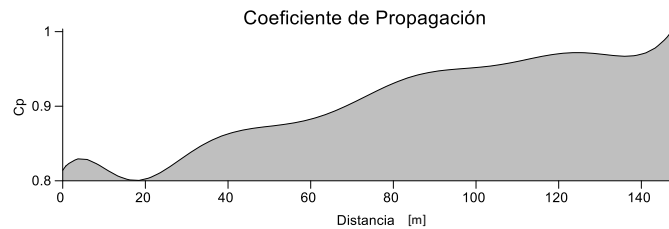


Figura 5. 15. Perfil del CP

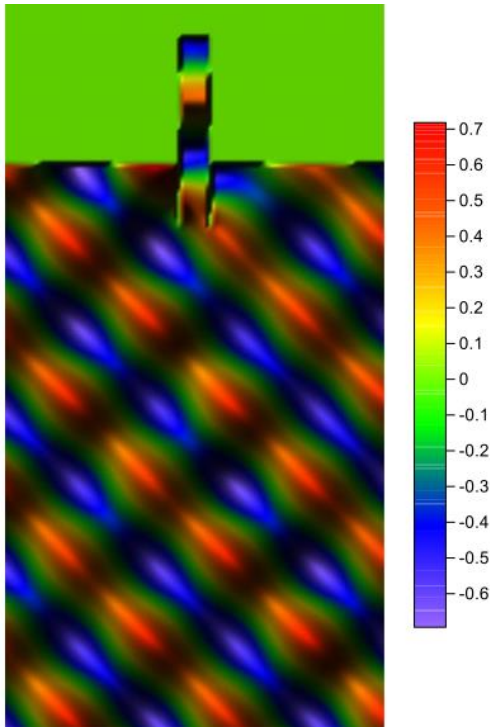


Figura 5. 17. Resultados SUP graficado en surfer

Caso 37

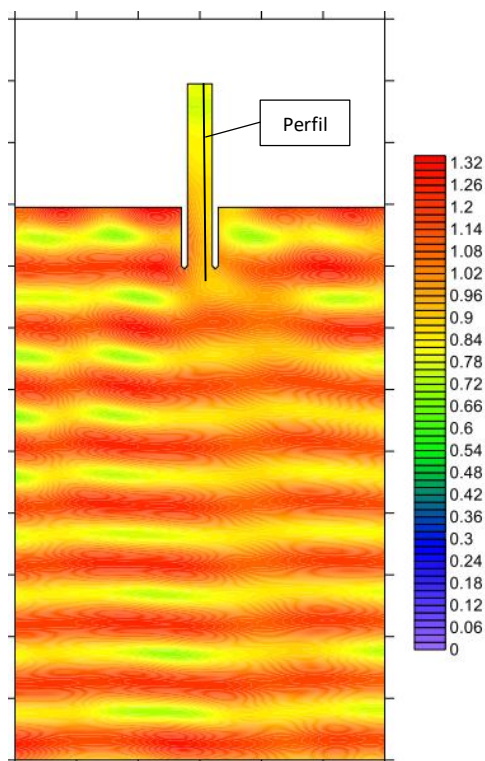


Figura 5. 18. Resultados AMP graficado en surfer

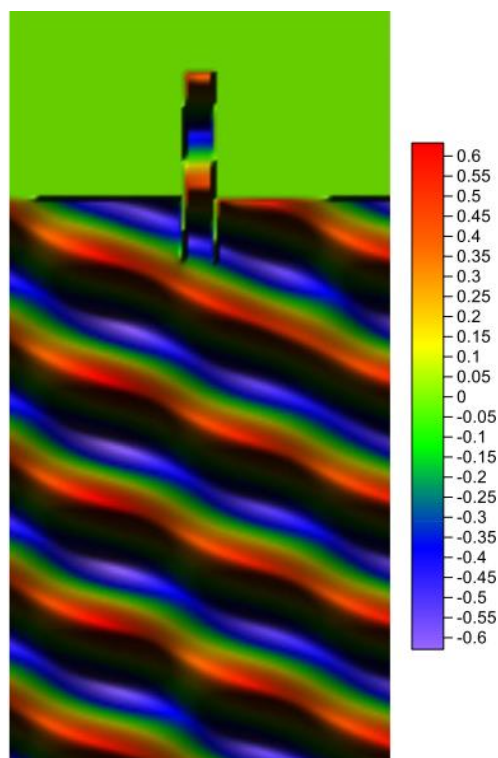


Figura 5. 19. Resultados SUP graficado en surfer

Este tipo de rompeolas o escolleras no están brindando suficiente protección al recinto interior. Esto se debe principalmente a la geometría, tanto de la obra de abrigo, como al recinto interior.

La forma rectangular provoca que el oleaje que logra pasar ligeramente difractado de las escolleras, se acumule en la zona interior, que debería de permanecer en calma para permitir las operaciones.

Esto se va agravando conforme al ángulo de oleaje incidente se vuelve más paralelo al eje del canal de acceso, como se puede apreciar en el siguiente caso.

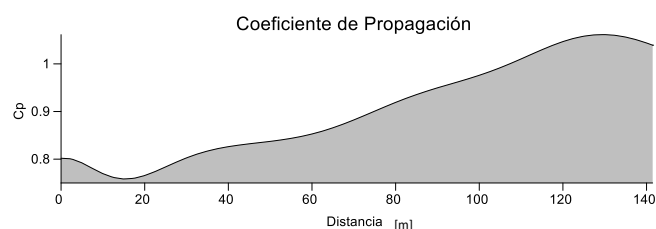


Figura 5. 20. Perfil del CP

Caso 38

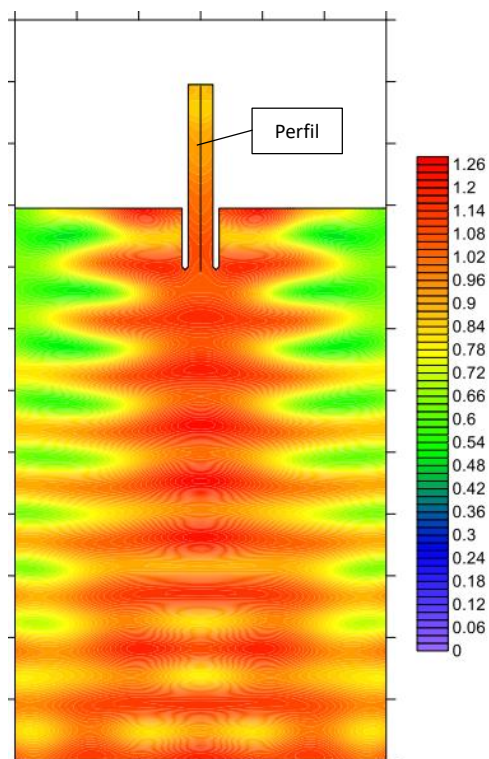


Figura 5. 21. Resultados AMP graficado en surfer

En este caso resulta evidente la nula protección que este tipo de rompeolas le brinda al puerto.

Al ser solamente una extensión de la forma geométrica del puerto, la protección para esta dirección es básicamente nula.

El oleaje ingresa directamente hasta el recinto interior sin ningún obstáculo.

Es en este caso cuando se corre el mayor riesgo de alcanzar un modo resonante dentro del puerto.

Los casos restantes son geoméricamente similares, así como sus resultados.

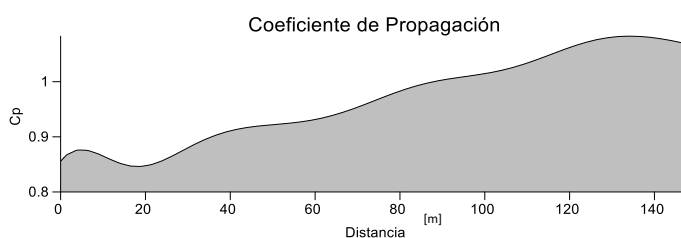


Figura 5. 22. Perfil del CP

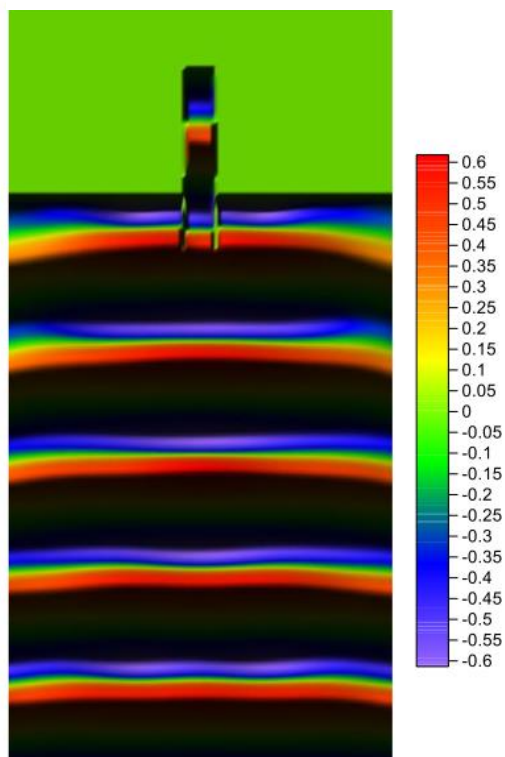


Figura 5. 23. Resultados SUP graficado en surfer

5.2.3 Protección Paralela a la Costa.

Es una de las formas de protección más comunes en la práctica. Tiene una ventaja muy grande en proteger el interior del recinto del oleaje normal a la costa, además de brindar dos aperturas que se pueden usar para entrada y salida de embarcaciones.

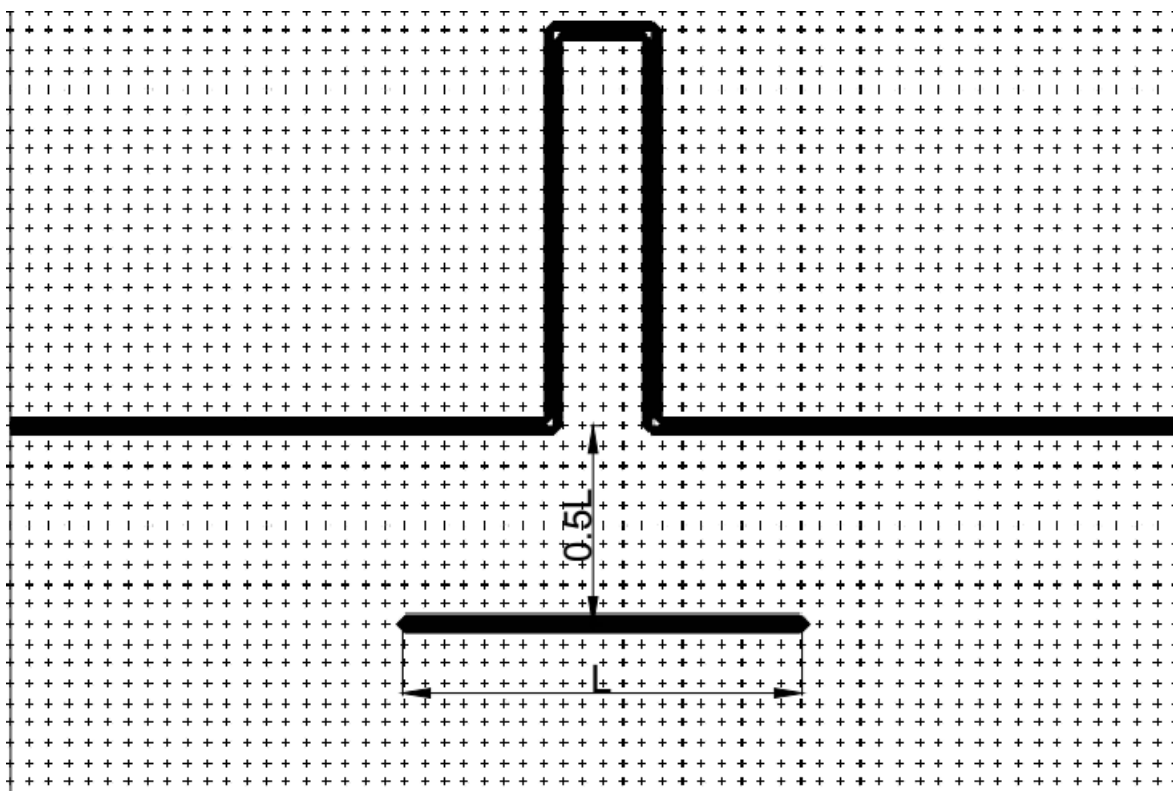


Figura 5. 24. Representación en GRID del modelo teórico

Tabla 8. Valores máximos del Coeficiente de Propagación

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Coeficiente de propagación máximo [Cp]
16	U	Separado	5	-45°	1.1597
17	U	Separado	5	-22.5°	0.3123
18	U	Separado	5	0°	0.9894
19	U	Separado	5	22.5°	0.358
20	U	Separado	5	45°	1.1638
41	U	Separado	8	-45°	1.4581
42	U	Separado	8	-22.5°	0.1721
43	U	Separado	8	0°	1.2758
44	U	Separado	8	22.5°	0.1322
45	U	Separado	8	45°	1.463

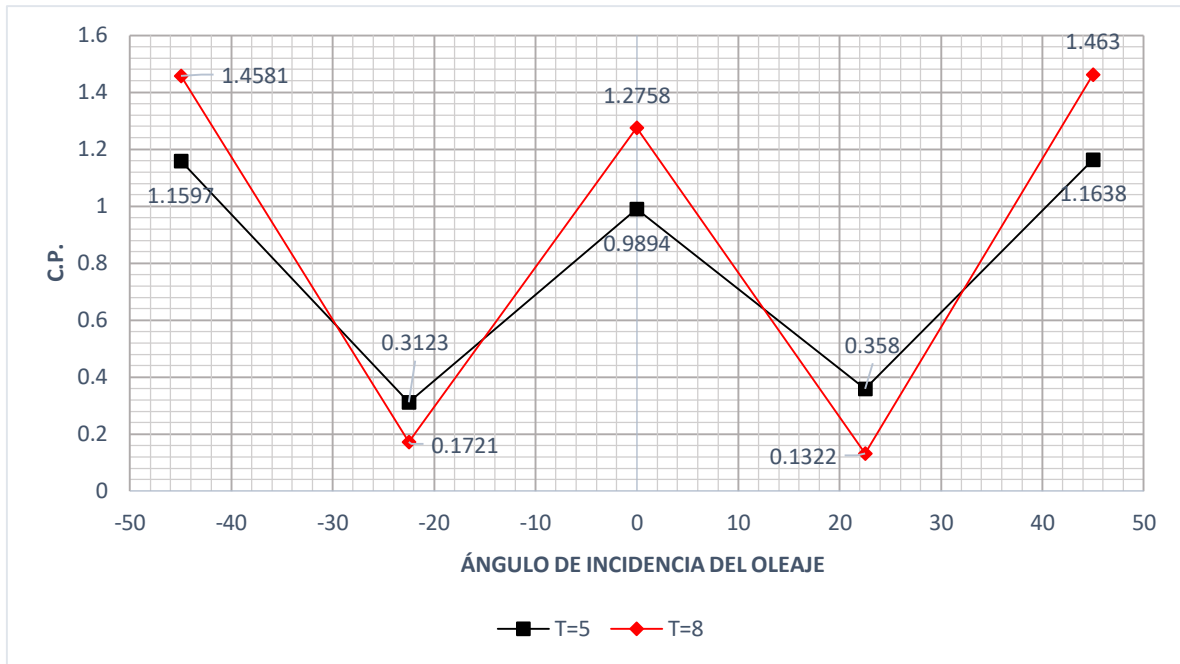


Figura 5. 25. Gráfica de C.P. vs Ángulo de incidencia para ambos periodos

El análisis de la propagación para este caso de oleaje nos revela que esta forma de protección es de las peores que se pueden utilizar para las condiciones simuladas.

En ambos periodos, el puerto presenta problemas de amplificación del oleaje en 3 de las 5 condiciones de oleaje, esto significa que en el 60% de los casos analizados, de forma que las actividades se verían interrumpidas y la operatividad del puerto disminuiría de manera importante. Es interesante observar que el periodo de 8 [s] alcanza valores de propagación más grandes que el de 5 [s], pero también, en los casos que no presenta amplificación, protege de mejor manera al puerto.

Caso 41

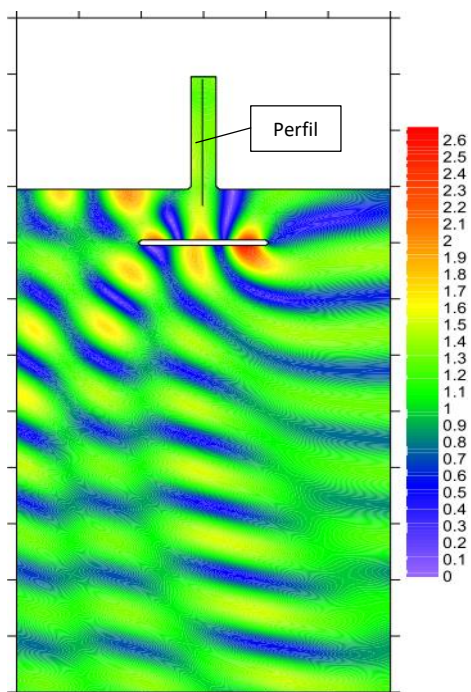


Figura 5. 26. Resultados AMP graficado en surfer

El oleaje incidente a -45° evita el obstáculo que le presenta el rompeolas y logra entrar por las aberturas laterales. Esto es un problema grave debido a que en este lugar se localizarían los canales de acceso al puerto.

El coeficiente de propagación dentro del puerto mantiene un valor promedio de 1.33, amplificando en 33% el oleaje incidente. En la figura se puede apreciar la línea sobre la cual fue trazado el perfil del Coeficiente de propagación mostrado, para ilustrar la zona en la que se producen estas amplificaciones.

Se puede apreciar que, en el lado izquierdo de la entrada al puerto, se producen concentraciones de energía que elevan el coeficiente de propagación a sus máximos niveles. Esto es debido a que en esa zona rompe el oleaje contra los muros del puerto.

En esta gráfica de la superficie libre del puerto, se puede apreciar que la razón de que se amplifique la propagación del oleaje en el puerto es por la reflexión del oleaje, que provoca el rebote y el re direccionamiento del oleaje hacia el interior del puerto.

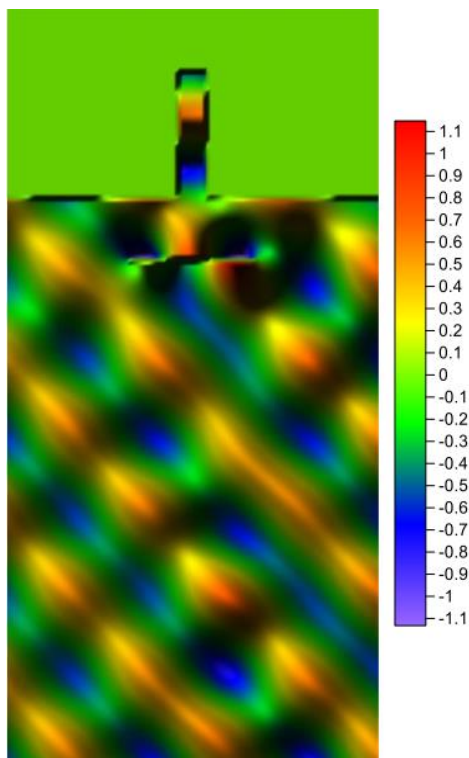


Figura 5. 28. Resultados SUP graficado en surfer

El perfil del coeficiente de propagación confirma las suposiciones que tuvimos, mostrando que el fondo del puerto se mantiene en relativa calma, pero a partir de los 30 metros la propagación es tal que el oleaje interior se amplifica respecto al oleaje incidente, de forma que no se pueden garantizar las condiciones de seguridad requeridas para la operación.

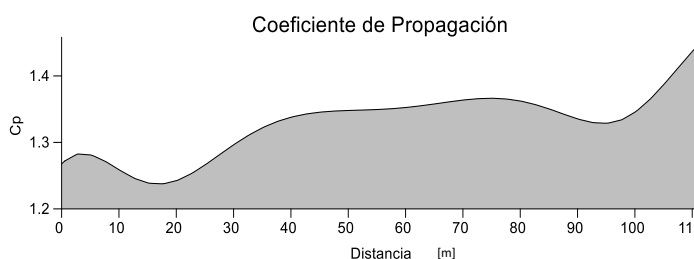


Figura 5. 27. Perfil del CP

Caso 43

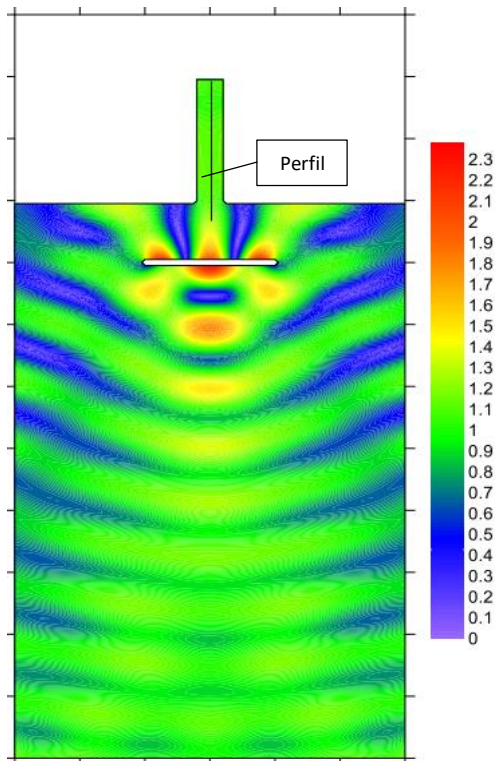


Figura 5. 29. Resultados AMP graficado en surfer

En este caso, a pesar de que la protección se encuentra evitando que el oleaje entre directamente al puerto, esto no brinda la suficiente calma dentro del puerto. Se observa que el coeficiente de propagación en promedio dentro del recinto es de 1 y 1.1. Esto nos indica que el puerto no está siendo protegido adecuadamente.

Esto se debe al efecto de difracción que el rompeolas de abrigo le produce al oleaje incidente, modificando la dirección del oleaje incidente que choca con el extremo del rompeolas.

Esto provoca que, en lugar de ser normal a la costa, el oleaje, a partir del punto en donde toca al rompeolas, viaje a 45° de la costa, en dirección a la entrada del puerto. Es por esto que se presenta oleaje que entra directamente al puerto, y es la razón de que los Coeficientes de Propagación que se presenta en el interior sea prácticamente 1; es decir, el oleaje entra casi intacto.

Los resultados encontrados en este estudio nos indican que este tipo de protección no parece ser una buena opción para esta geometría de Puerto.

Se asume que es específicamente para la geometría debido a que los resultados son constantes aun variando el periodo de oleaje.

Si solo es posible realizar esta protección, es recomendable buscar obras anexas para complementarla.

Los casos restantes son simétricamente similares, así como los resultados.

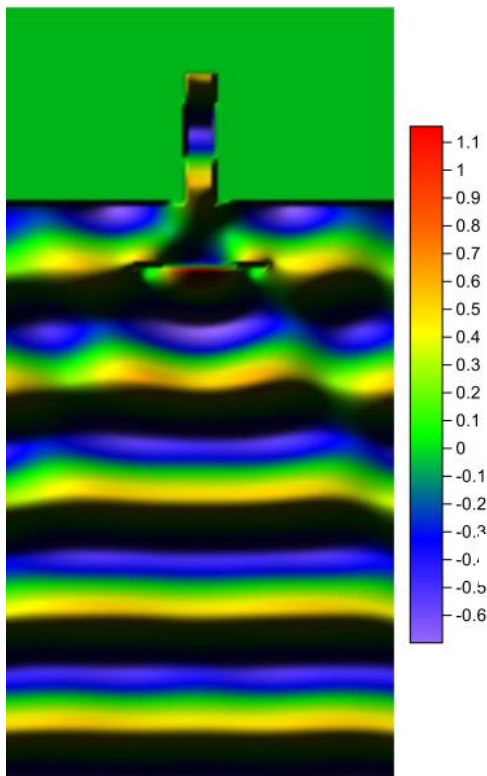


Figura 5. 30. Resultados SUP graficado en surfer

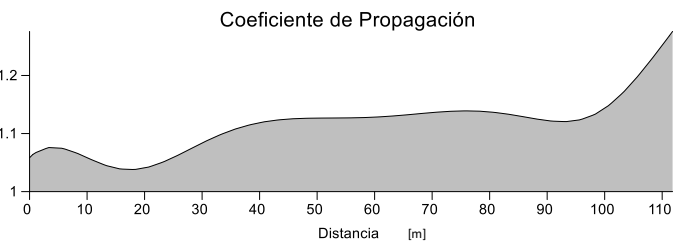


Figura 5. 31. Perfil del CP

5.2.4 Sin Protección.

Se presenta este análisis debido, en parte, a la necesidad de contar con una referencia del nivel de protección o de propagación que se está teniendo en los demás casos estudiados

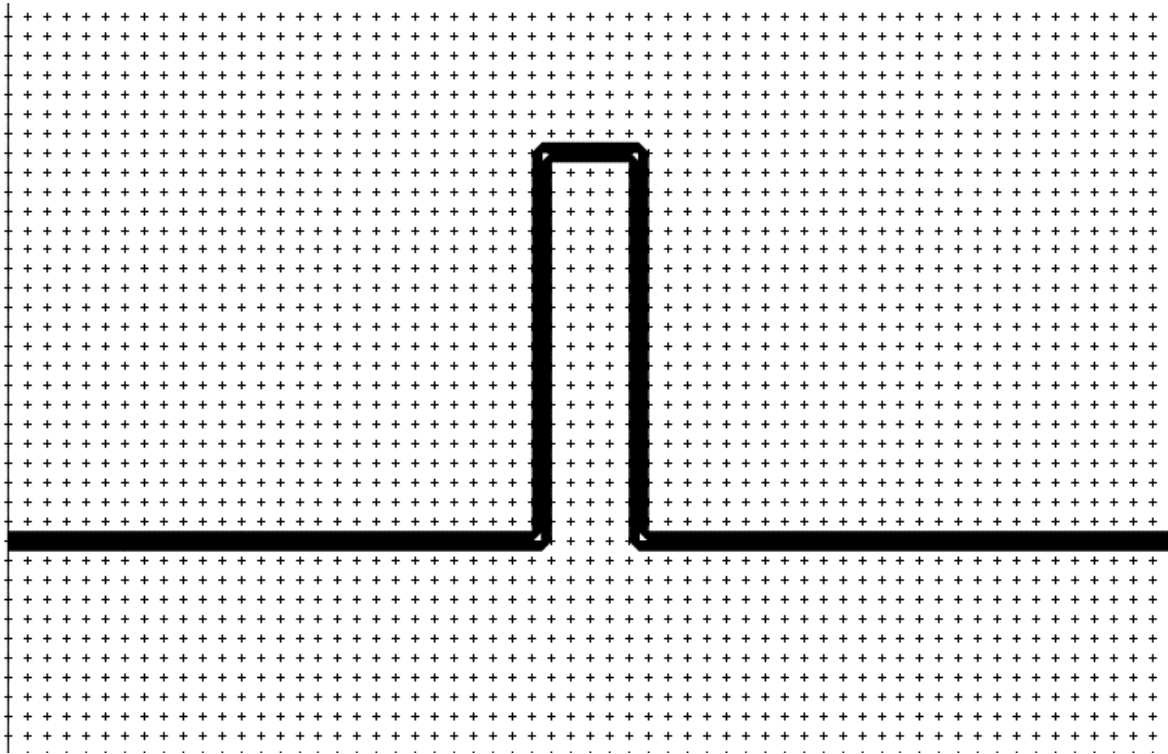


Figura 5. 32. Representación en GRID del modelo teórico

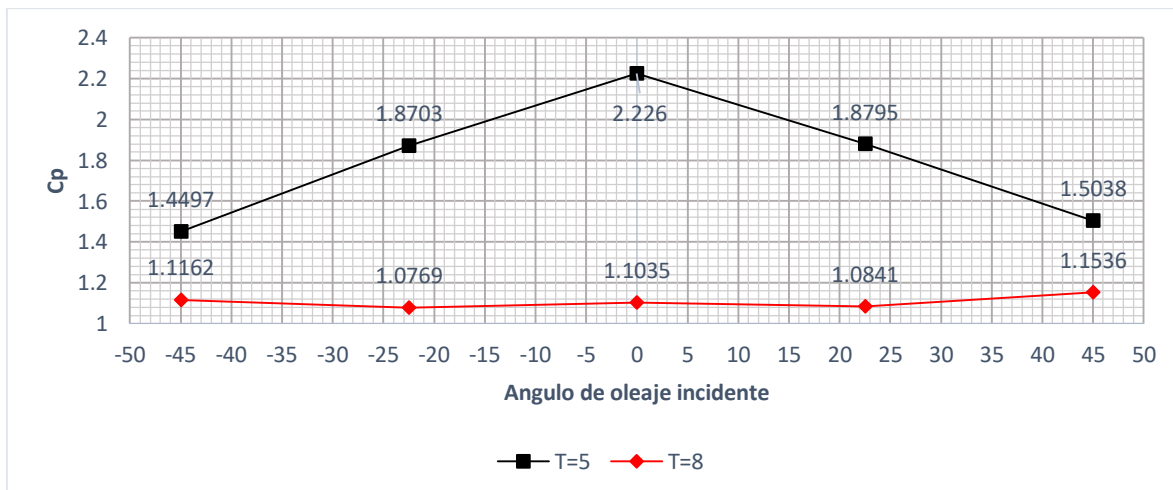


Figura 5. 33. Gráfica del CP vs Angulo de incidencia para ambos periodos

Los resultados obtenidos de la propagación en el puerto son congruentes con lo que se esperaba. Al no tener protección alguna que modifique las condiciones del oleaje incidente, dentro del puerto el oleaje se amplifica.

En el caso del periodo $T=8$ [s], el oleaje permanece casi constante, amplificándose ligeramente, hasta un C_p máximo de 1.19. Por otro lado, el periodo de $T=5$ [s] amplifica de manera alarmante el oleaje que entra al puerto, desde el mínimo C_p de 1.4 hasta el máximo de 2.21, los cuales representan la amplificación del oleaje hasta en el doble de su valor incidente.

Estos resultados también resultan de gran importancia debido a que nos permiten observar el cambio sustancial que se puede llegar a dar en las condiciones de oleaje dentro del puerto de acuerdo a sus dimensiones y al periodo del oleaje incidente.

Así, podemos observar que en este caso los resultados no son proporcionales en un caso a otro y no se observa una tendencia que los correlacione de forma sencilla, por lo que no es posible extrapolar sus resultados a otros periodos de oleaje u otras dimensiones en el recinto.

Es probable que las condiciones para un periodo $T=5$ [s] sean peores debido a que el periodo es más corto. Dado que el periodo está asociado a la longitud de ola, un periodo más corto significa que hay un mayor número de olas que pasan por un punto en un determinado tiempo. De esta manera, a nuestro recinto portuario *entrarían más olas* con un periodo de 5 [s], por lo que se acumula mayor agitación en interior.

Caso 21

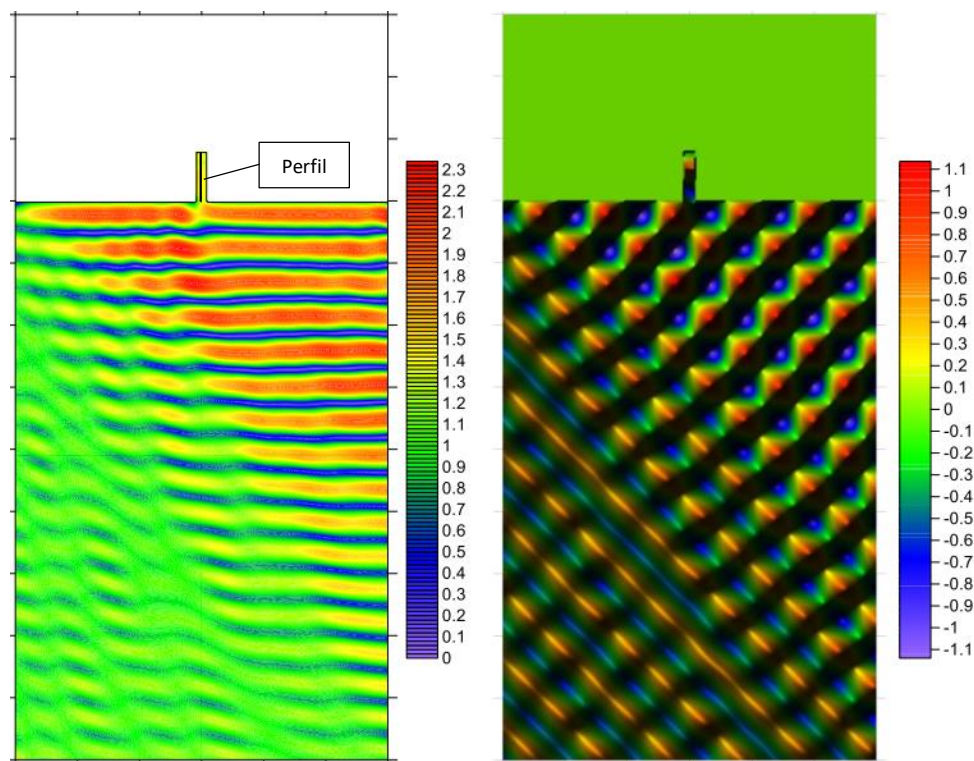


Figura 5. 34. Amplitud (izq) y superficie libre (der)

Este caso de oleaje presenta los menores valores de agitación para este caso sin protección. Esta situación se debe al ángulo de incidencia que tiene el oleaje.

Al ser un ángulo de -45° con respecto a la costa, el oleaje incidente no entra completamente al Puerto, ya que sufre un efecto de difracción en la entrada del puerto. Esto mitiga ligeramente el efecto de agitación dentro del Puerto.

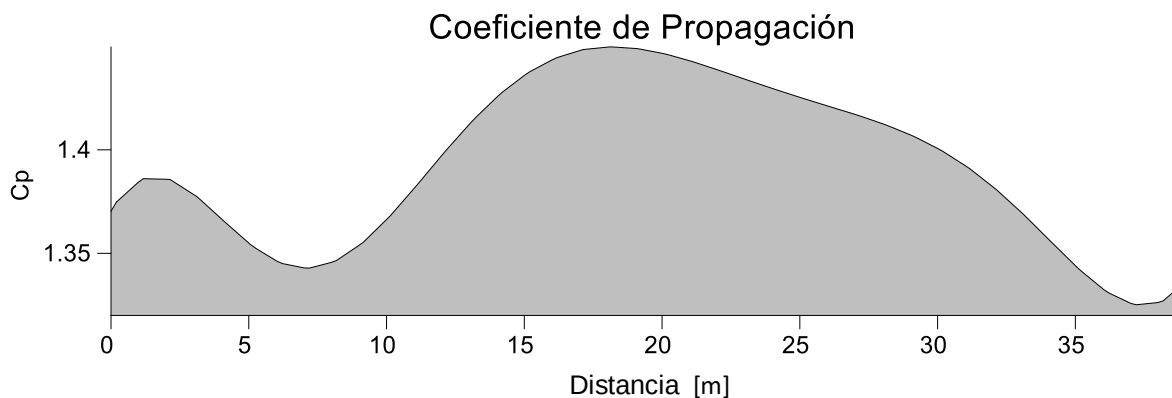


Figura 5. 35. Perfil del CP

Caso 22

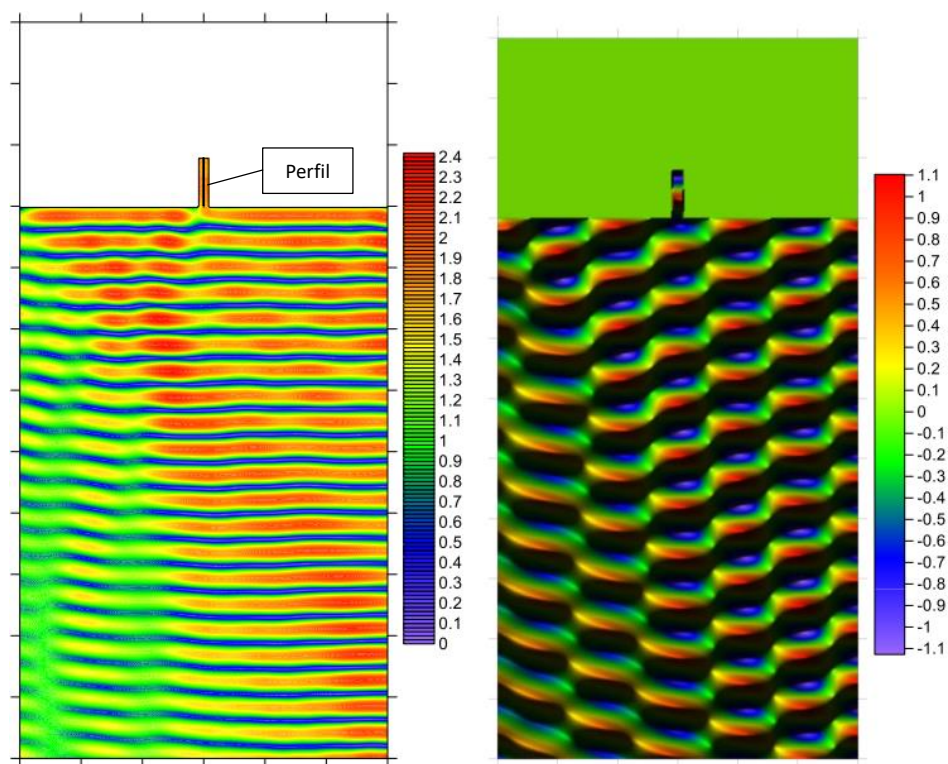


Figura 5. 36. Amplitud (izq) y superficie libre (der)

Considerando lo analizado en el Caso 21, en estas nuevas condiciones de oleaje (ángulo de incidencia -22.5°), en este caso la agitación se incrementa en casi un 30%, pasando de un valor de Coeficiente de Propagación de 1.44 a uno de 1.87.

Al entrar en un ángulo más suavizado con respecto al eje del canal de acceso y recinto interior, la difracción que el oleaje experimenta es mucho menor, por lo que el oleaje que ingresa es de alturas más cercanas al Oleaje Normal, y con esto, la acumulación de agitación dentro del Puerto se incrementa.

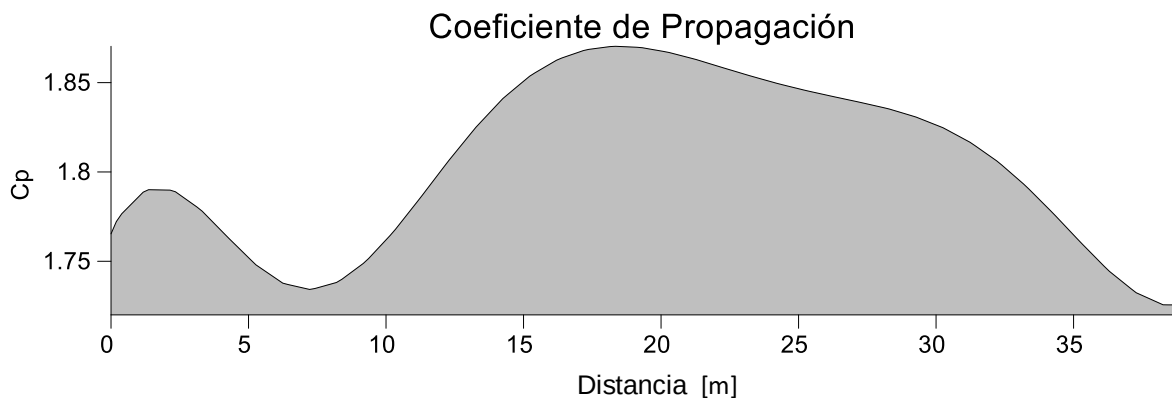


Figura 5. 37. Perfil del CP

Caso 23

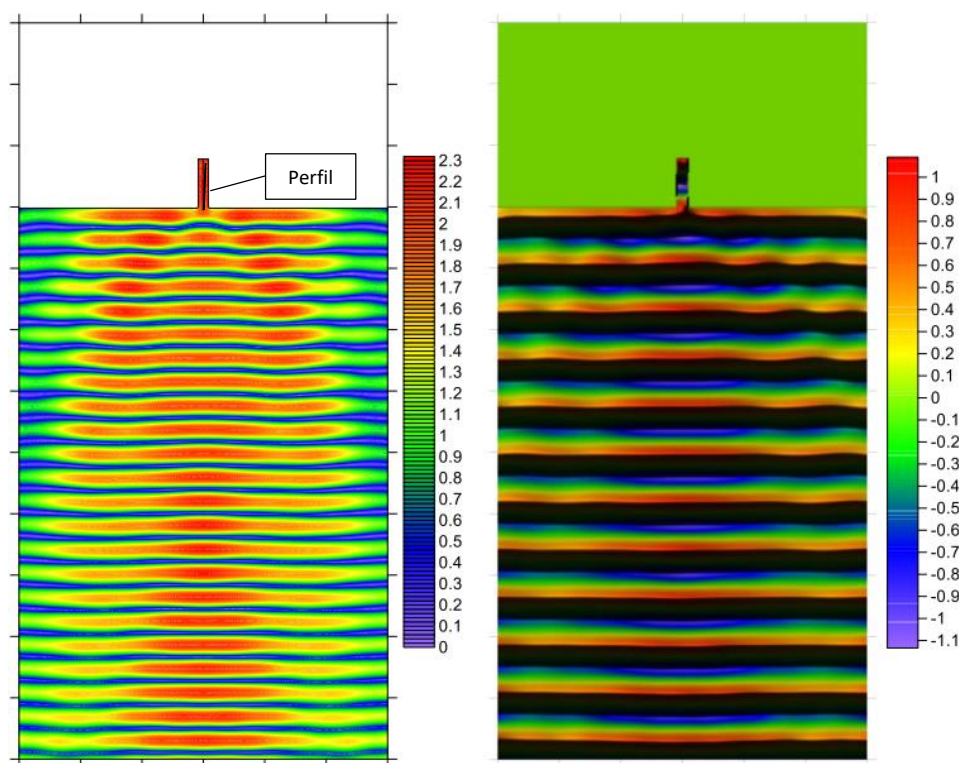


Figura 5. 38. Amplitud (izq) y superficie libre (der)

Este caso presenta las peores condiciones para este tipo de recinto. Al tener el oleaje incidente un ángulo de 0° con respecto al canal de acceso, o de 90° respecto a la línea de costa, la entrada y la geometría del canal de acceso y recinto interior no generan efectos disipativos sobre el oleaje incidente.

Esto se aprecia claramente en el valor tan elevado que alcanzan los Coeficientes de Propagación, llegando al máximo de 2.22. Además, este valor se mantiene constante dentro del recinto, lo que generaría condiciones de no operabilidad muy frecuentes y con elevado riesgo dentro del Puerto.

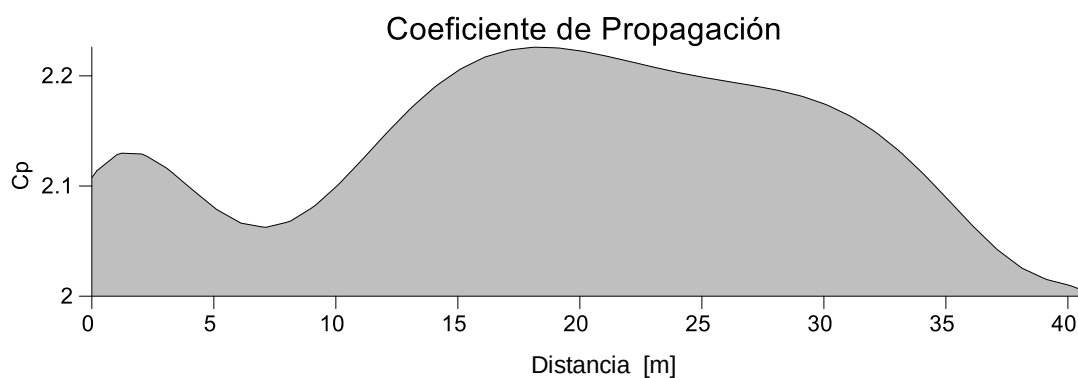


Figura 5. 39. Perfil del CP

Para los dos casos restantes, se puede aplicar una simetría respecto a las condiciones presentadas.

5.3 SEGUNDA MODELACIÓN, PUERTO CON AMPLIACIÓN INTERIOR FORMA (P)

5.3.1 Protección a 45°.

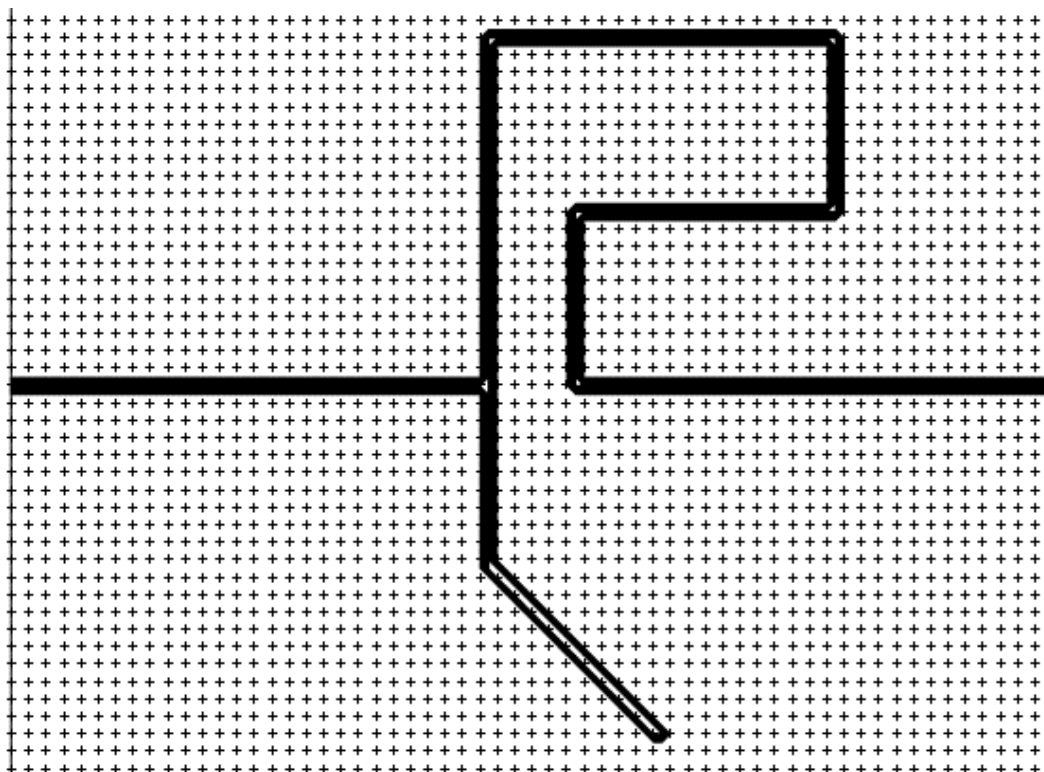


Figura 5. 40. Representación en GRID del modelo teórico

Tabla 9. Valores máximos del Coeficiente de Propagación

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Coeficiente de propagación máximo [Cp]
51	P	Brazo a 45°	5	-45°	0.1753
52	P	Brazo a 45°	5	-22.5°	0.2922
53	P	Brazo a 45°	5	0°	0.72
54	P	Brazo a 45°	5	22.5°	0.86
55	P	Brazo a 45°	5	45°	1.44
76	P	Brazo a 45°	8	-45°	0.1557
77	P	Brazo a 45°	8	-22.5°	0.2335
78	P	Brazo a 45°	8	0°	0.4414
79	P	Brazo a 45°	8	22.5°	0.8082
80	P	Brazo a 45°	8	45°	1.3436

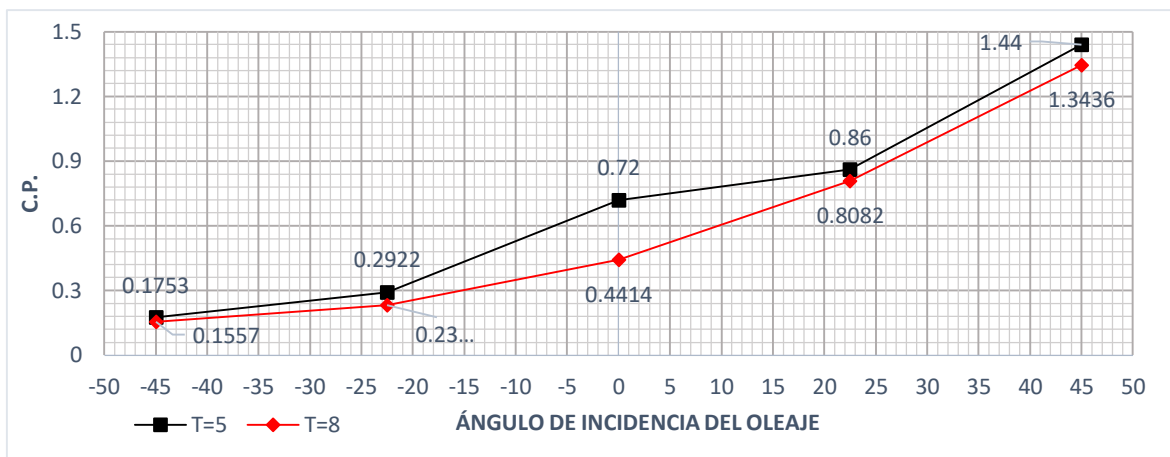


Figura 5. 41. Gráfica CP vs Angulo de incidencia para ambos periodos

Al observar la gráfica de los valores máximos de propagación que se dan en los puertos con esta geometría, resalta su similitud con los valores encontrados en los Casos 1-5 y 26-30 correspondientes con la Geometría Tipo “U” y la misma protección que se tiene en este caso.

De nuevo, la protección brindada por este rompeolas es muy buena para 4 de los 5 casos de oleaje, en los cuales el coeficiente de propagación es menor a 1, por lo que se concluye que esta, en efecto, abatiendo la altura del oleaje dentro del recinto portuario.

Además, la variación de los niveles de Cp entre un periodo de oleaje y otro es muy baja, cambiando de manera significativa solamente en el caso en que el oleaje se aproxima en dirección normal a la Línea de Costa, en donde para el periodo de 5 [s] el Cp tiene un valor de 0.75 contra el de 0.45 que se presenta en el periodo de 8 [s].

También se aprecia que, para esta geometría, el rompeolas a 45° funciona ligeramente mejor para un periodo de 8 [s], ya que reduce el valor de los coeficientes de propagación máximos que se encontraron.

El único caso en que el Rompeolas no brinda protección al puerto es en el que el oleaje se aproxima con un ángulo de incidencia de 45°, ya que en esa dirección el oleaje entra de forma paralela a las obras de protección.

Se analiza el Caso 80 solamente, debido a que las condiciones del Caso 55 son las son prácticamente similares, al igual que las causas y las magnitudes de la propagación dentro de ambos recintos.

Caso 80

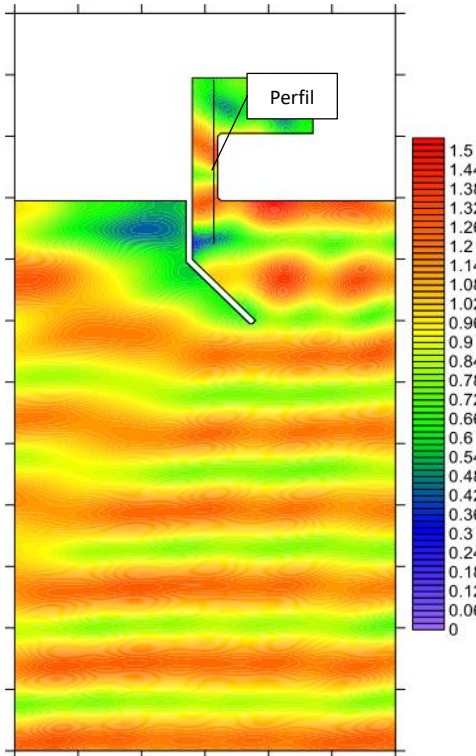


Figura 5. 42. Resultados AMP graficado en surfer

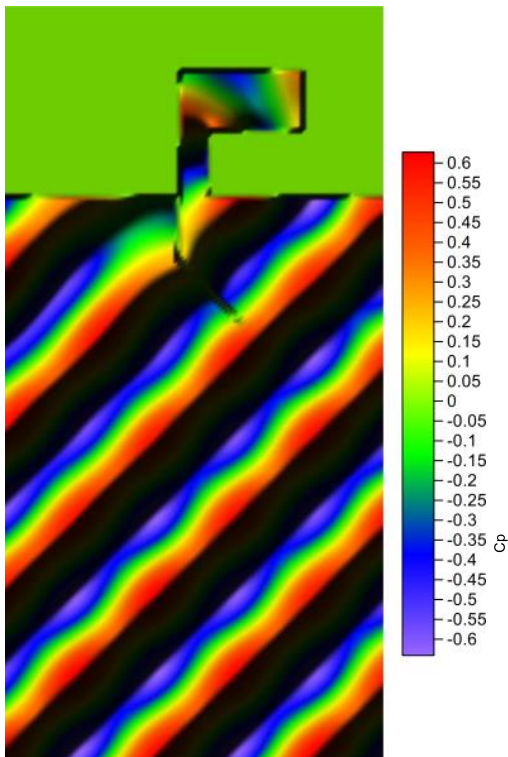


Figura 5. 43. Resultados SUP graficado en surfer

Como se esperaba, el ángulo de incidencia del oleaje es tal que el rompeolas proyectado prácticamente no tiene ningún efecto de abrigo en este caso, ya que entra de forma prácticamente paralela al rompeolas.

Al chocar con el brazo, el oleaje se redirecciona y una buena parte entra en el canal de acceso al recinto.

Cuando el oleaje con la altura incidente entra al canal de acceso, se encuentra con el efecto de cuello de botella al reducirse el área hidráulica de manera importante.

Como resultado, el canal de acceso resulta muy turbulento, tal como se observa en el gráfico, alcanzando valores máximos del coeficiente de propagación de 1.34.

Todo esto se puede observar con claridad en el gráfico de la superficie libre instantánea. Se puede ver que la altura de oleaje dentro de la zona ya protegida por el rompeolas permanece prácticamente constante e incluso parece continua a la altura fuera del recinto. También se puede observar de qué manera el oleaje entra al recinto.

El recinto interior presenta menor propagación gracias a que al salir del canal de acceso el área hidráulica aumenta considerablemente. A pesar de apreciar buenas condiciones para la operación, la turbulencia en el canal de acceso es demasiado alta y representa un riesgo que podría limitar demasiado la operación del puerto.

Esto es importante especialmente debido a que se encontrará con tráfico intenso y permanente, poniendo en riesgo tanto a las estructuras del puerto como a los tripulantes de las embarcaciones.

Este problema podría solucionarse mediante aumentar el ancho del canal de acceso, para evitar el efecto del cuello de botella. Sin embargo, esta solución propuesta tendrá que ser analizada por el proyectista de acuerdo a las condiciones particulares de su problema.

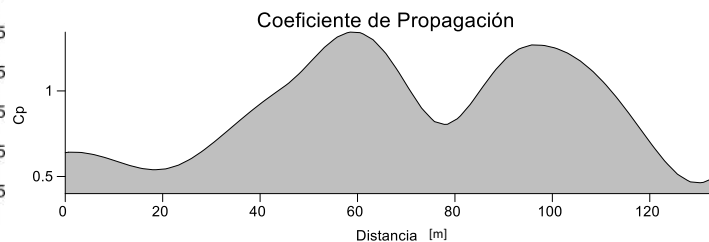


Figura 5. 44. Perfil del CP

5.3.2 Protección Lateral.

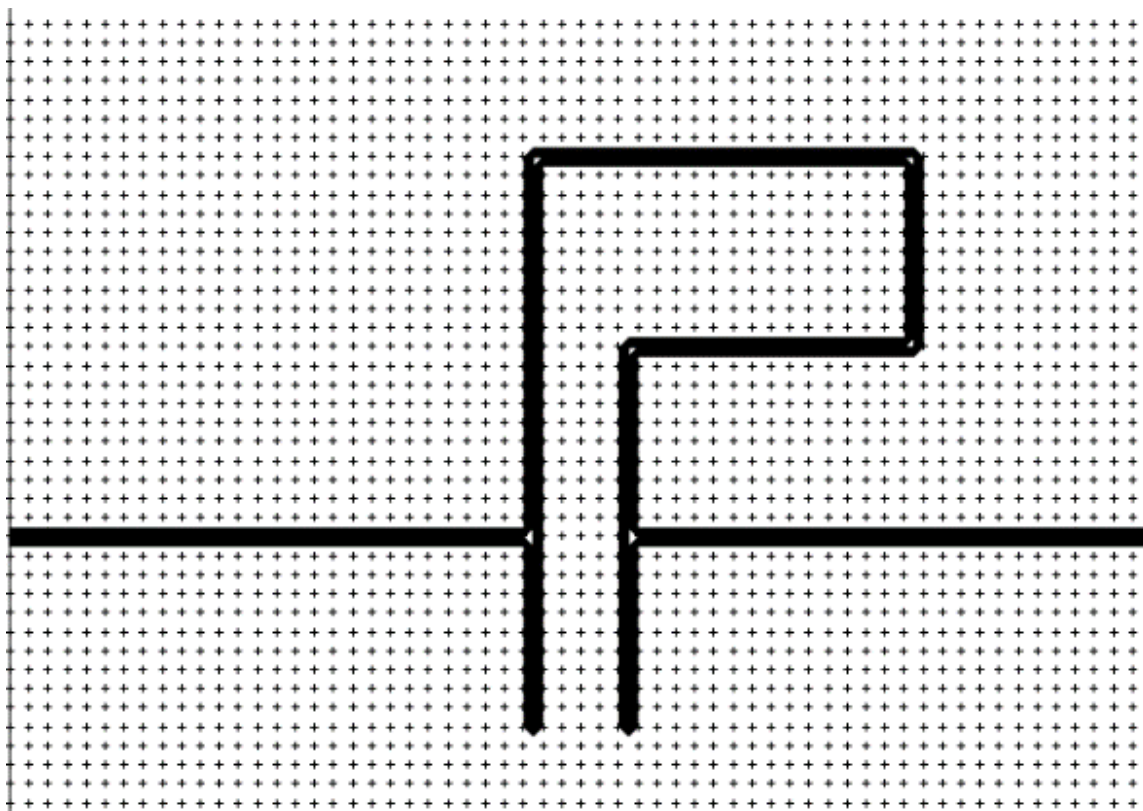


Figura 5. 45. Representación GRID del modelo teórico

Tabla 10. Valores máximos del coeficiente de propagación

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Coeficiente de propagación máximo [Cp]
61	P	Lateral	5	-45°	1.0036
62	P	Lateral	5	-22.5°	1.097
63	P	Lateral	5	0°	1.1246
64	P	Lateral	5	22.5°	1.156
65	P	Lateral	5	45°	1.0618
86	P	Lateral	8	-45°	1.2444
87	P	Lateral	8	-22.5°	1.1923
88	P	Lateral	8	0°	1.3477
89	P	Lateral	8	22.5°	1.2426
90	P	Lateral	8	45°	1.3205

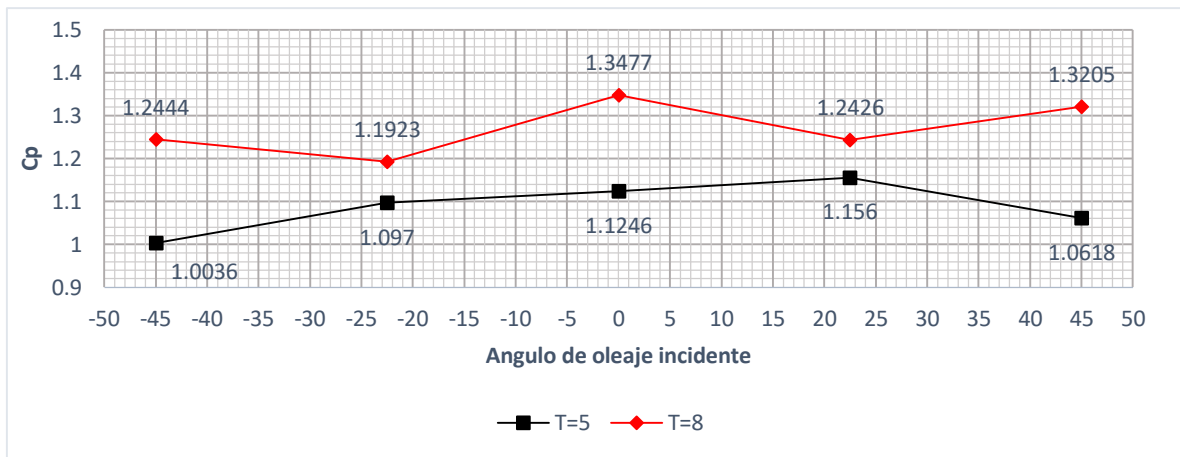


Figura 5. 46. Gráfica CP vs Amplitud de oleaje para ambos periodos

Este caso presenta la peor opción para proteger a un puerto con esta geometría. Todos los casos de oleaje incidente presentan coeficientes de propagación mayores o muy cercanos a 1, de forma que las obras de protección no tienen ninguna efectividad.

Se puede observar que aunque los resultados obtenidos son muy similares, no son simétricos al eje del ángulo de oleaje 0°. En el lado del ángulo >0, los valores del coeficiente de propagación son ligeramente mayores al valor obtenido en el mismo ángulo con el signo contrario.

Esto se debe probablemente al fenómeno explicado en el **caso con Protección a -45°**

Se analizarán solamente 3 casos para explicar el fenómeno, tomando en cuenta que los demás casos son simplemente simétricos.

Caso 86

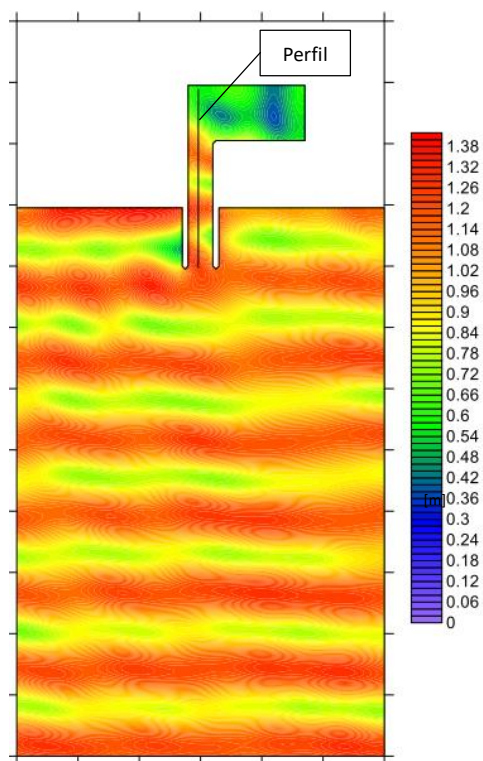


Figura 5.47. Resultados AMP graficado en surfer

En este caso se puede apreciar el rebote del coeficiente de propagación a lo largo del canal de acceso.

A pesar de que el recinto interior se encuentra con buenos valores de Propagación, el canal de acceso es demasiado turbulento, lo cual representa un riesgo para las embarcaciones y una dificultad para la operación eficiente del puerto.

La gráfica del coeficiente de propagación también permite apreciar el “rebote” en las paredes del canal.

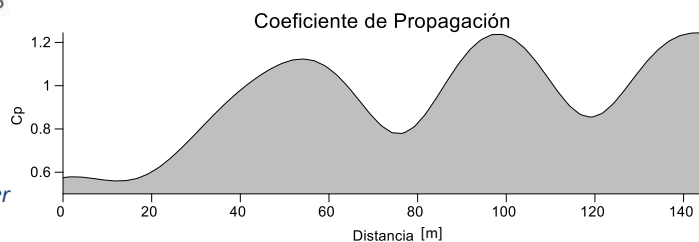


Figura 5.49. Perfil del CP

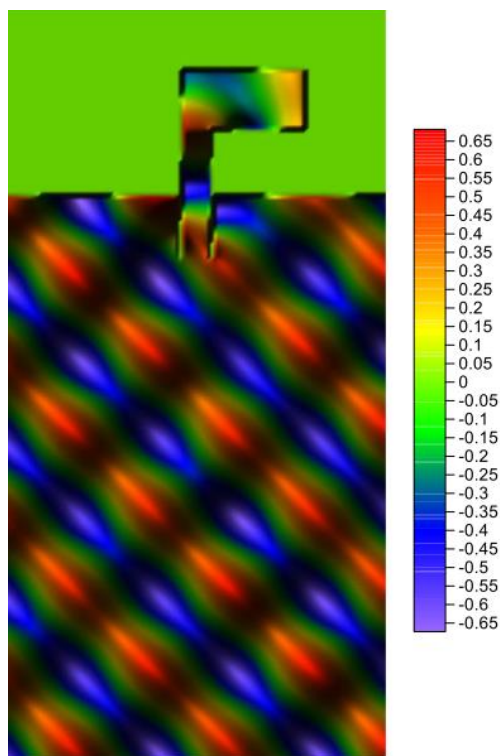


Figura 5.48. Resultados SUP graficado en surfer

Caso 87

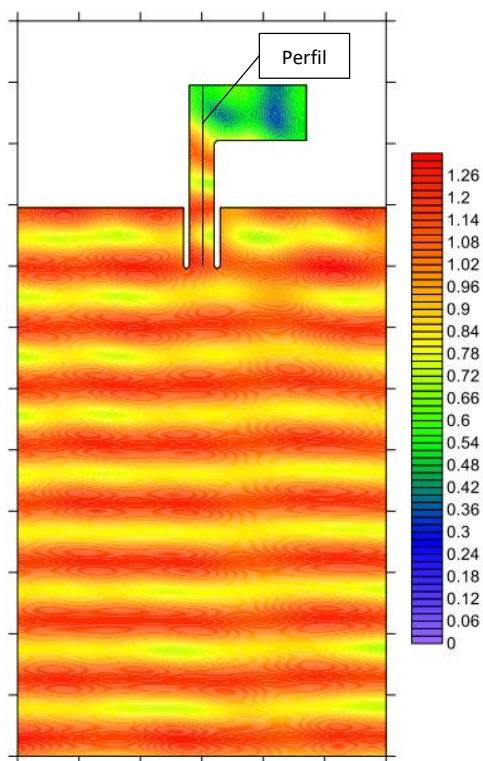


Figura 5. 50. Resultados AMP graficado en surfer

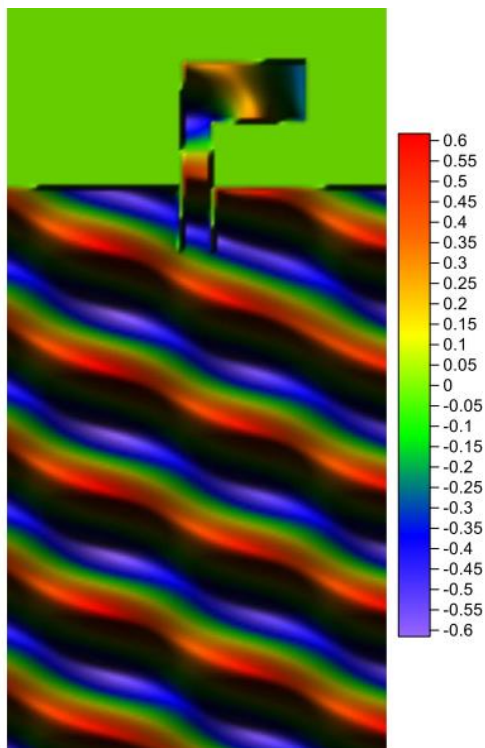


Figura 5. 51. Resultados SUP graficado en surfer

Al igual que en el caso anterior, se puede observar la manera en que el Coeficiente de Propagación se intensifica en el canal de acceso, y es bastante apreciable en la gráfica de superficie libre.

El perfil de coeficiente de Propagación también revela esta variación, probablemente sincronizada con el periodo del oleaje incidente.

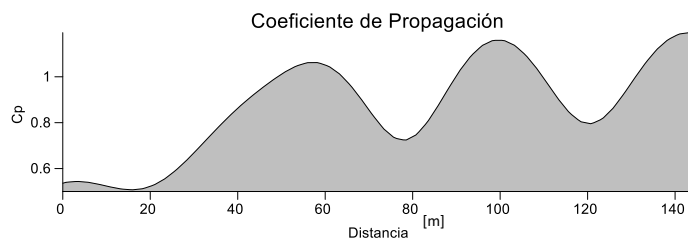


Figura 5. 52. Perfil del CP

Caso 88

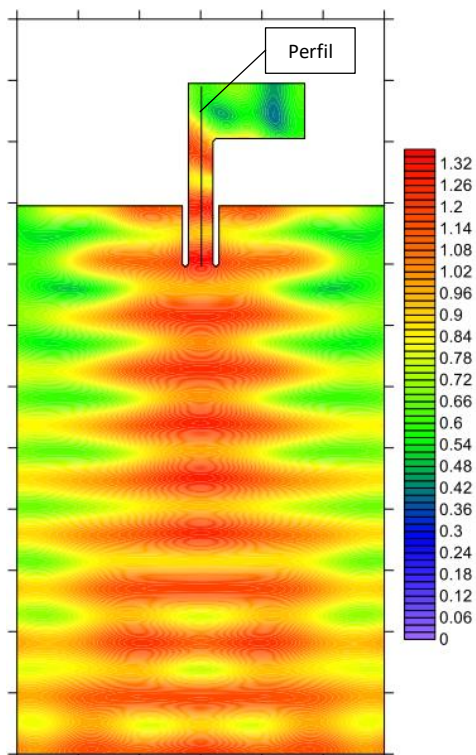


Figura 5. 54. Resultados AMP graficado en surfer

De nueva cuenta, el problema encontrado en la propagación es en la zona del canal de acceso. Además, esta configuración prácticamente no produce ningún obstáculo al avance del oleaje incidente, lo que resulta en una amplificación aún mayor de la propagación dentro del canal.

Se puede apreciar que, en los tres casos, los perfiles del coeficiente de propagación obtenidos asimilan a una onda. Es posible que la forma de esta onda se encuentre asociada a la onda del periodo del oleaje incidente, como lo detecta el programa de cálculo.

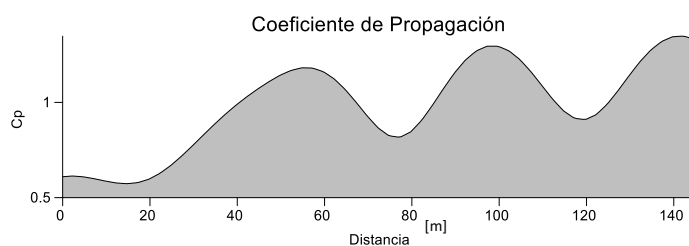


Figura 5. 53. Perfil del CP

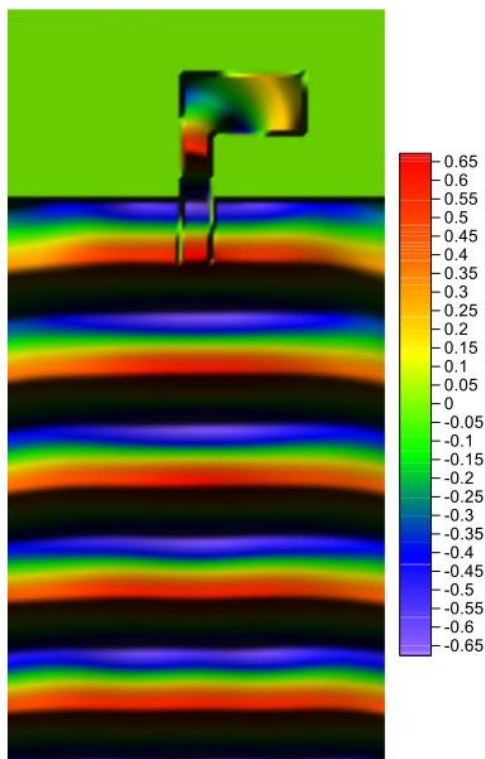


Figura 5. 55. Resultados SUP graficado en surfer

Caso 89

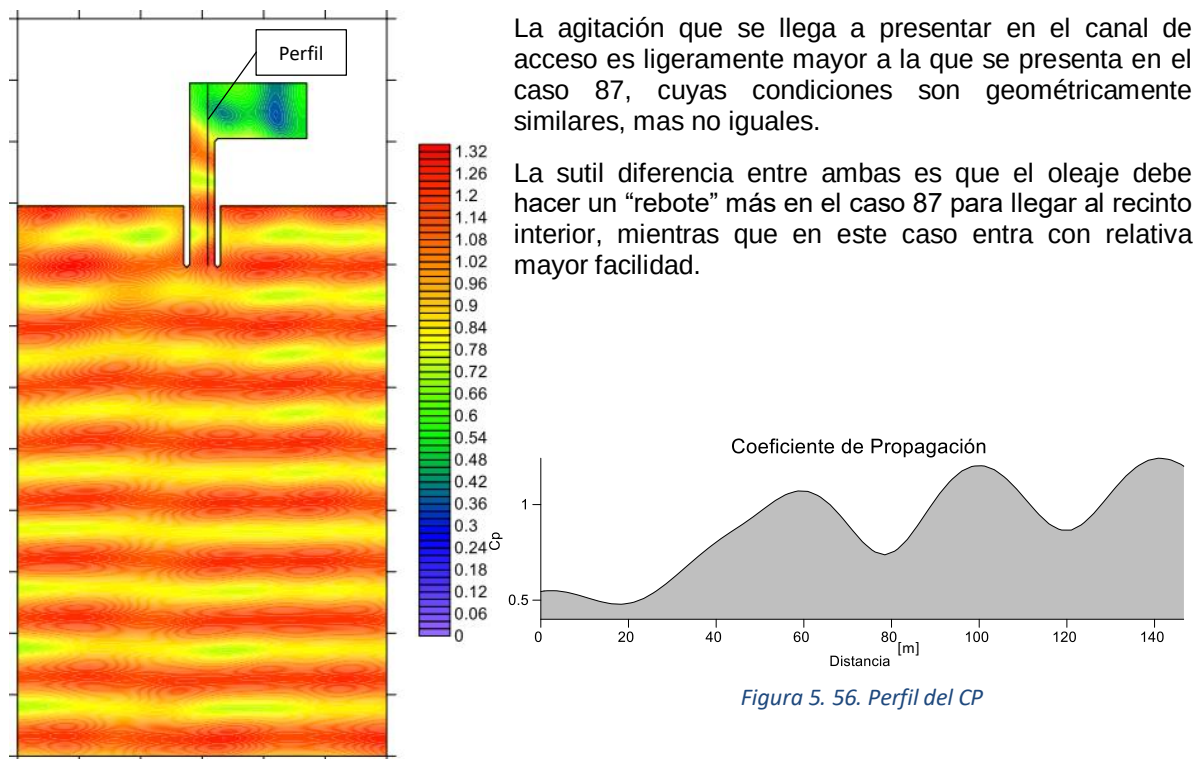


Figura 5. 57. Resultados AMP graficado en surfer

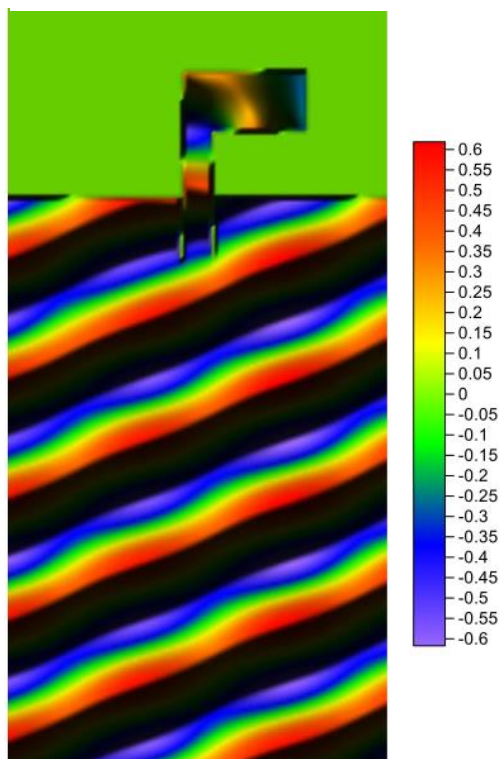


Figura 5. 58. Resultados SUP graficado en surfer

5.3.3 Protección Paralela a la Costa.

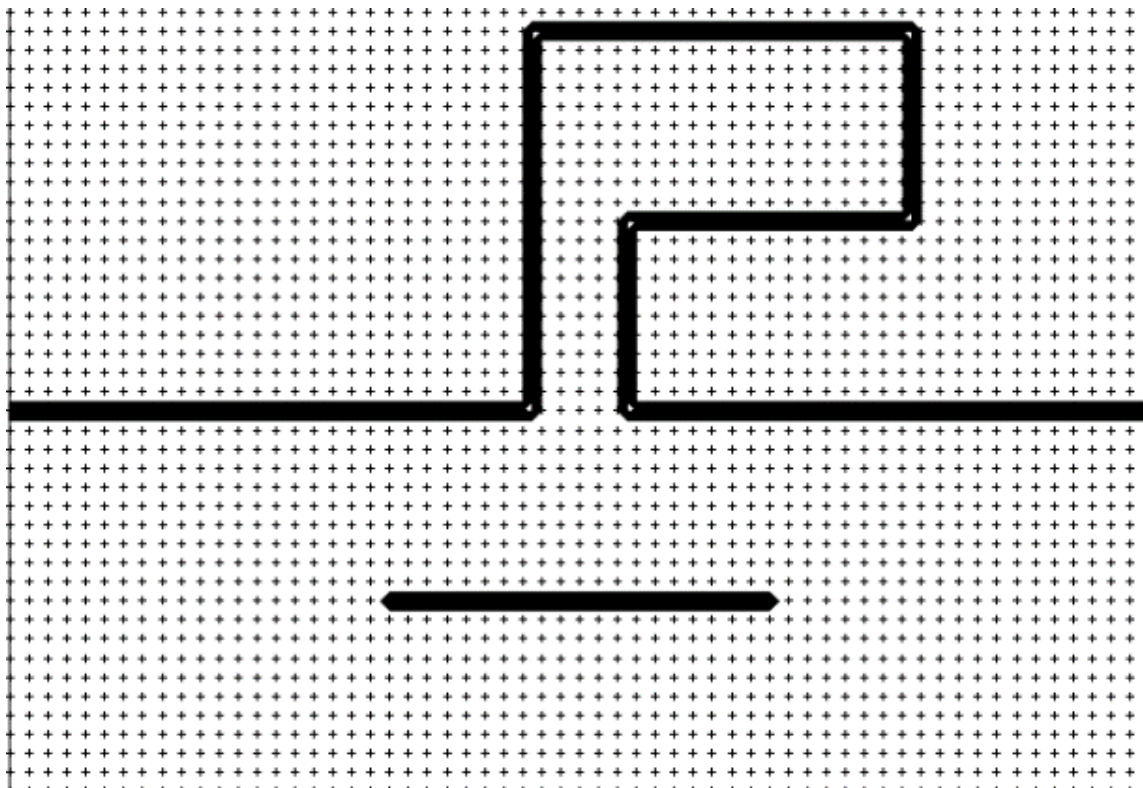


Figura 5. 59. Representación GRID del modelo teórico

Tabla 11. Valores máximos del Coeficiente de Propagación.

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Coeficiente de propagación máximo [Cp]
66	P	Separado	5	-45°	1.2254
67	P	Separado	5	-22.5°	0.3108
68	P	Separado	5	0°	1.131
69	P	Separado	5	22.5°	0.351
70	P	Separado	5	45°	1.1974
91	P	Separado	8	-45°	1.7401
92	P	Separado	8	-22.5°	0.1789
93	P	Separado	8	0°	1.507
94	P	Separado	8	22.5°	0.1997
95	P	Separado	8	45°	1.7655

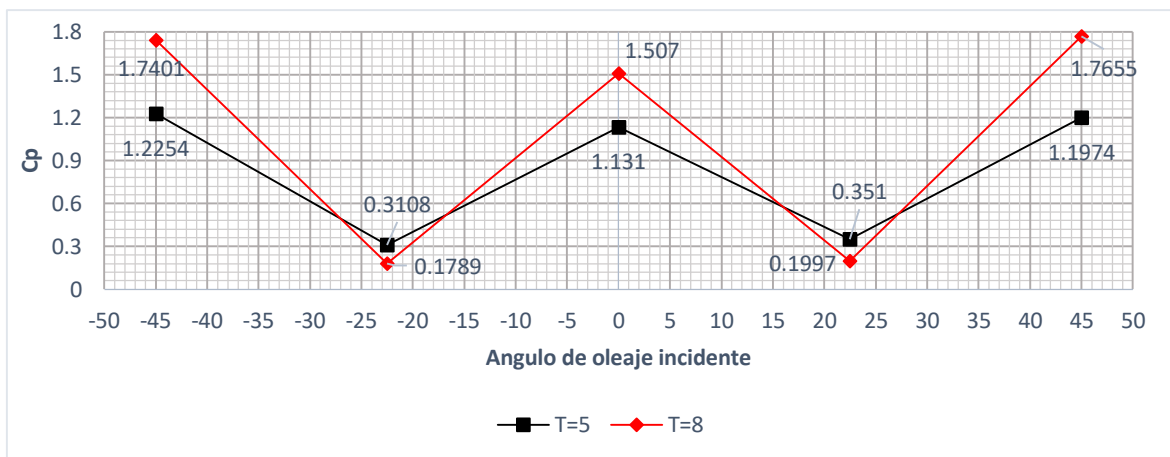


Figura 5. 60. Gráfica CP vs Ángulo de incidencia para ambos periodos

Este caso presenta dificultades en 3 de 5 direcciones de oleaje, lo que a primera vista hace que esta protección parezca inadecuada.

Resulta notable que la dirección del oleaje en 22.5° no presente aumento de la propagación en el puerto, mientras que los ángulos de 45° presentan los valores más altos de coeficiente de propagación.

Esto se debe al efecto de refracción que el rompeolas produce en el oleaje incidente. En el caso del oleaje a 45°, el rompeolas es virtualmente inútil, ya que no puede producir que el oleaje se refracte, y si lo hace, es un valor muy bajo, de forma que el oleaje puede entrar en la bocana del puerto y al canal de acceso virtualmente intacto.

El oleaje con 22.5° sí se ve afectado por la acción del rompeolas, lo que modifica su altura y la dirección con la que puede ingresar a la bocana. De esta manera, no solamente entra un oleaje menos alto, sino que el ángulo de entrada produce que el oleaje que ingresa al canal de acceso sea menor.

Por el contrario, en el caso con el oleaje incidente con ángulo 0° (Normal a la línea de costa), el rompeolas tiene un efecto adverso al provocar que el oleaje refractado ingrese en un ángulo muy cercano a 45, permitiendo que una gran parte del oleaje incidente pueda ingresar en el canal de acceso.

Caso 91

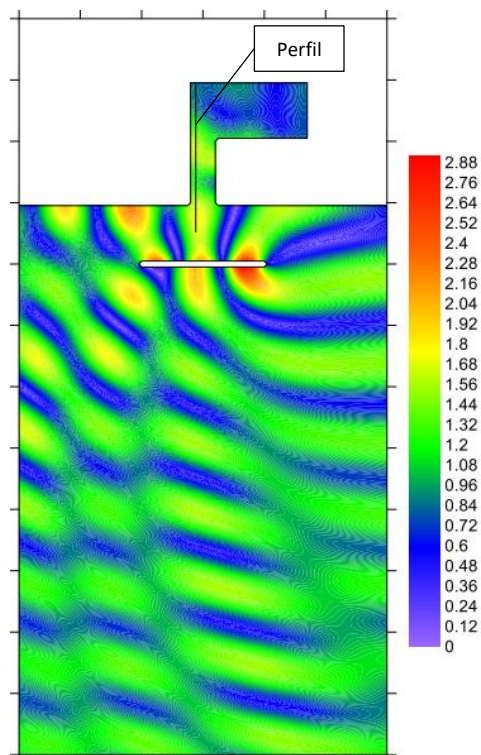


Figura 5. 61. Resultados AMP graficado en surfer

Se puede observar el efecto mencionado en los párrafos anteriores: el ángulo de 45° permite que el oleaje pueda entrar casi directamente en el canal de acceso, lo cual produce el aumento en el nivel del coeficiente de propagación.

A pesar de que el recinto interior se mantiene con bajos coeficientes de propagación, el acceder al puerto resultaría crítico y peligroso.

Podría darse solución complementando esta protección con espigones en la bocana, cuidando siempre que haya espacio suficiente para que las embarcaciones maniobren y el transporte litoral no se vea severamente afectado.

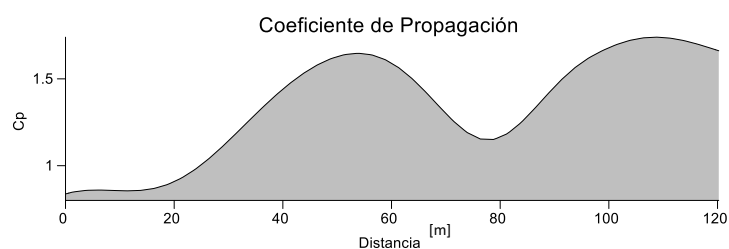


Figura 5. 62. Perfil del CP

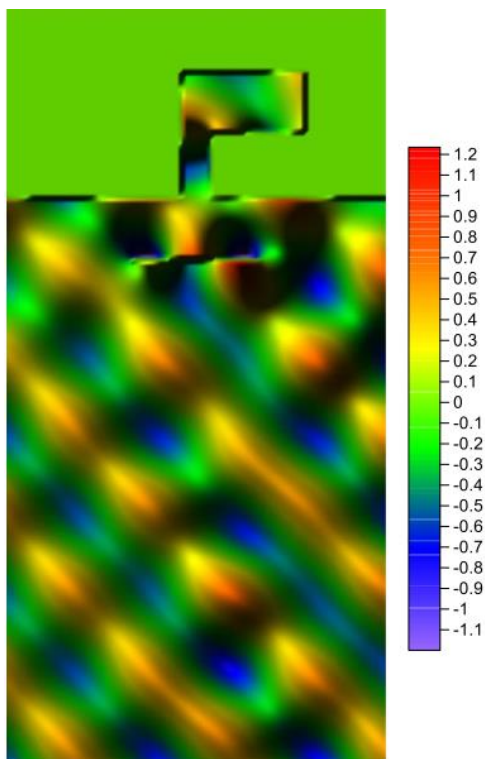


Figura 5. 63. Resultados SUP graficado en surfer

Caso 93

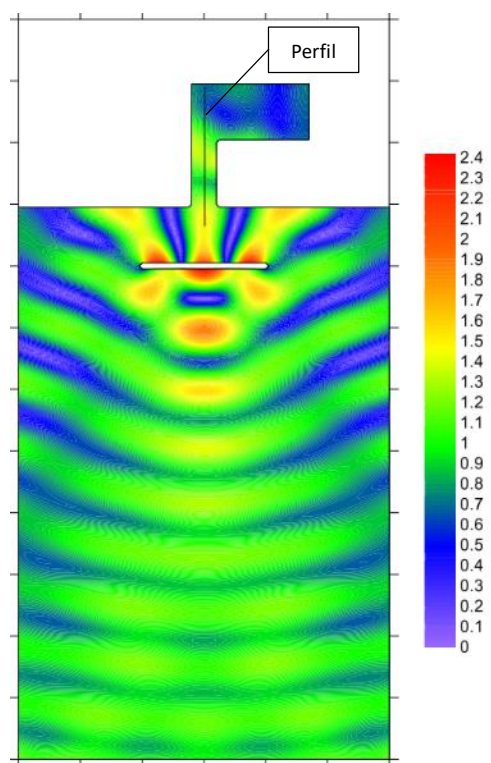


Figura 5. 65. Resultados AMP graficado en surfer

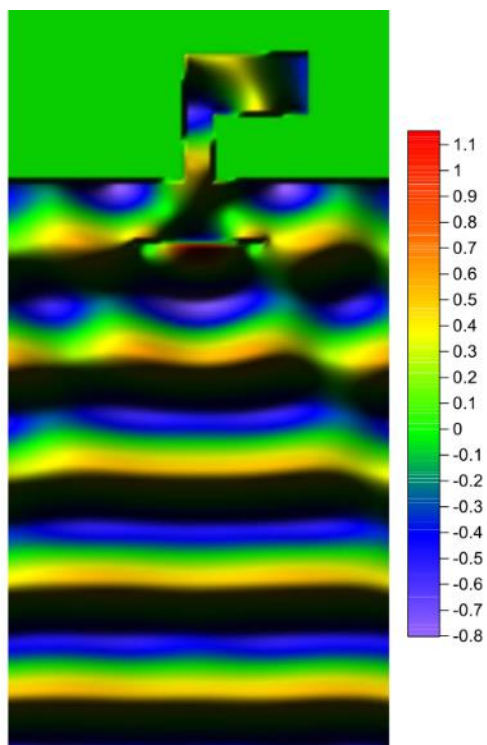


Figura 5. 64. Resultados SUP graficado en surfer

El efecto de refracción se puede apreciar muy bien en estas gráficas, especialmente en la de superficie libre del agua.

El oleaje refractado se concentra en la bocana del puerto, produciendo los grandes niveles de coeficiente de propagación que encontramos en el estudio.

La solución más viable para un problema de este tipo, es alargar el rompeolas de forma que la línea del oleaje refractado no quede en ruta directa al canal de acceso, y así rebote y se disipe en la vecindad de la bocana.

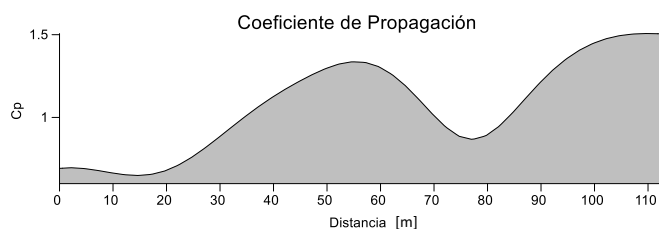


Figura 5. 66. Perfil del CP

Caso 95

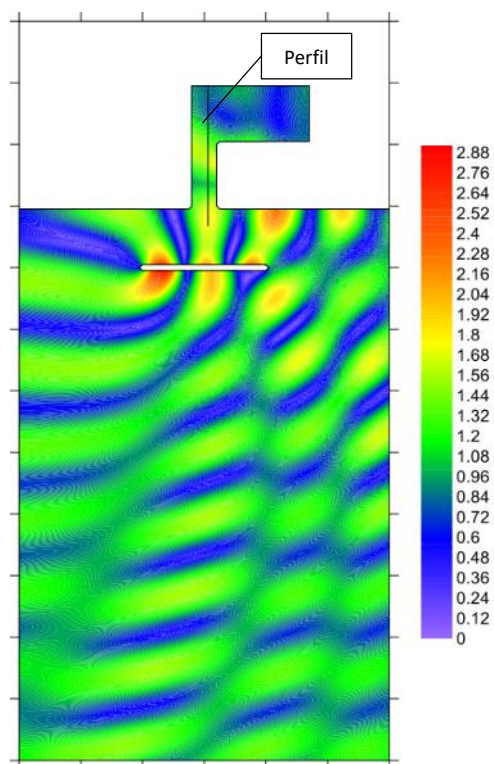


Figura 5. 68. Resultados AMP graficado en surfer

La separación que el rompeolas tiene con respecto a la línea de costa y la bocana genera problemas considerables debido a que parte del oleaje puede pasar sin verse afectado por sus efectos mitigantes.

Esto es similar al caso 91, en donde se concentra en gran medida el oleaje incidente en el canal de acceso, y esto genera gran agitación en esta zona, poniendo en riesgo el tráfico que ingresa y sale del puerto.

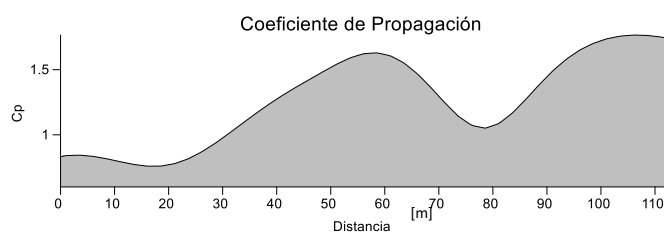


Figura 5. 69. Perfil del CP

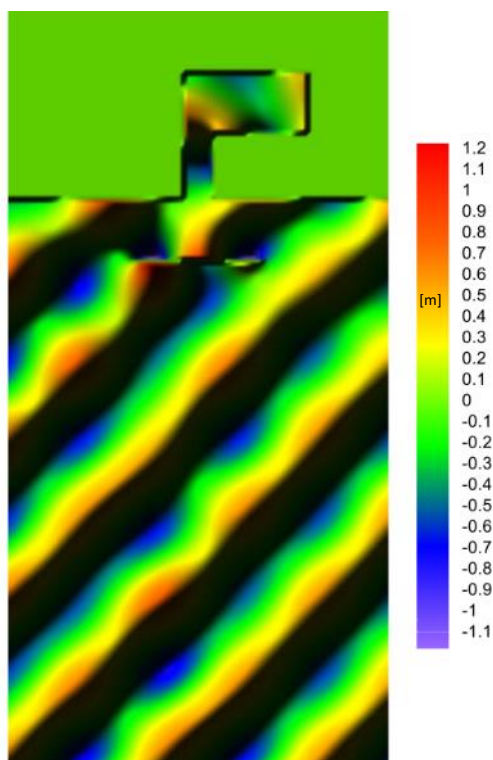


Figura 5. 67. Resultados SUP graficado en surfer

5.3.4 Sin protección.

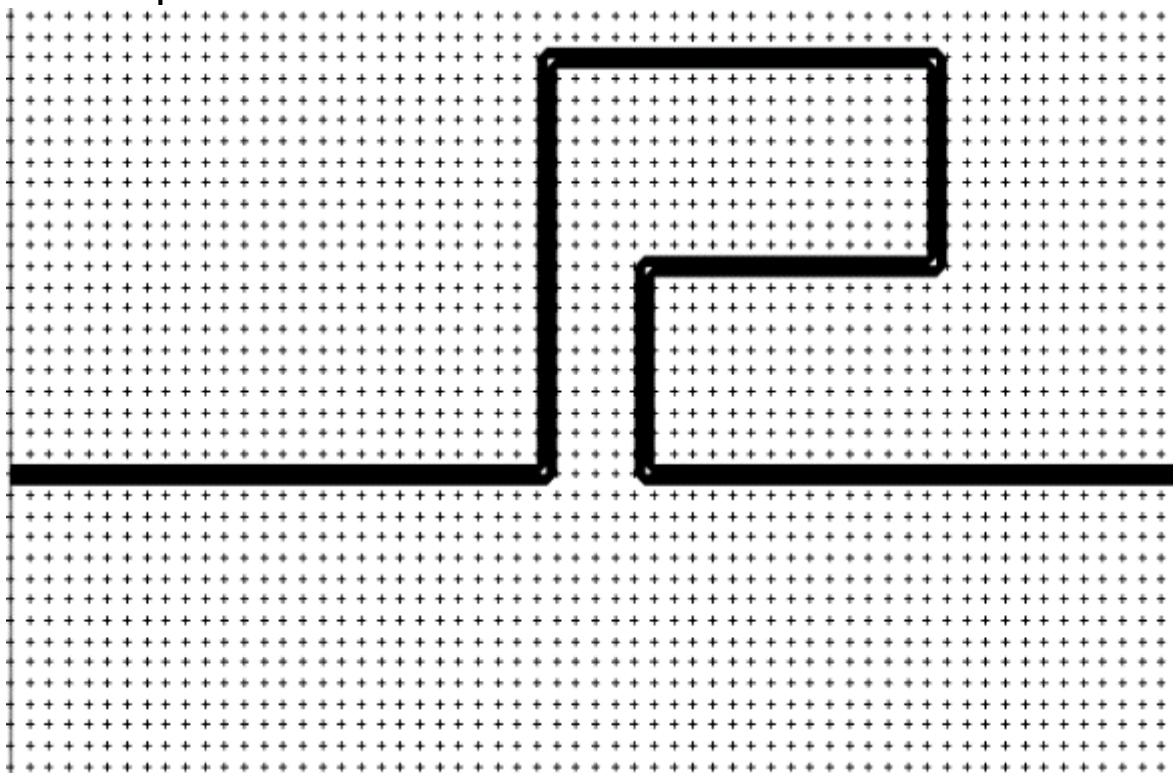


Figura 5. 70. Representación GRID del modelo teórico

Tabla 12. Valores máximos del Coeficiente de Propagación

Caso	Geometría tipo	Forma de Rompeolas	Periodo [s]	Ángulo incidente de oleaje [°]	Coeficiente de propagación máximo [Cp]
71	P	Sin Protección	5	-45°	1.2479
72	P	Sin Protección	5	-22.5°	1.2078
73	P	Sin Protección	5	0°	1.2564
74	P	Sin Protección	5	22.5°	1.2377
75	P	Sin Protección	5	45°	1.3167
96	P	Sin Protección	8	-45°	1.141
97	P	Sin Protección	8	-22.5°	1.1798
98	P	Sin Protección	8	0°	1.2432
99	P	Sin Protección	8	22.5°	1.2655
100	P	Sin Protección	8	45°	1.2033

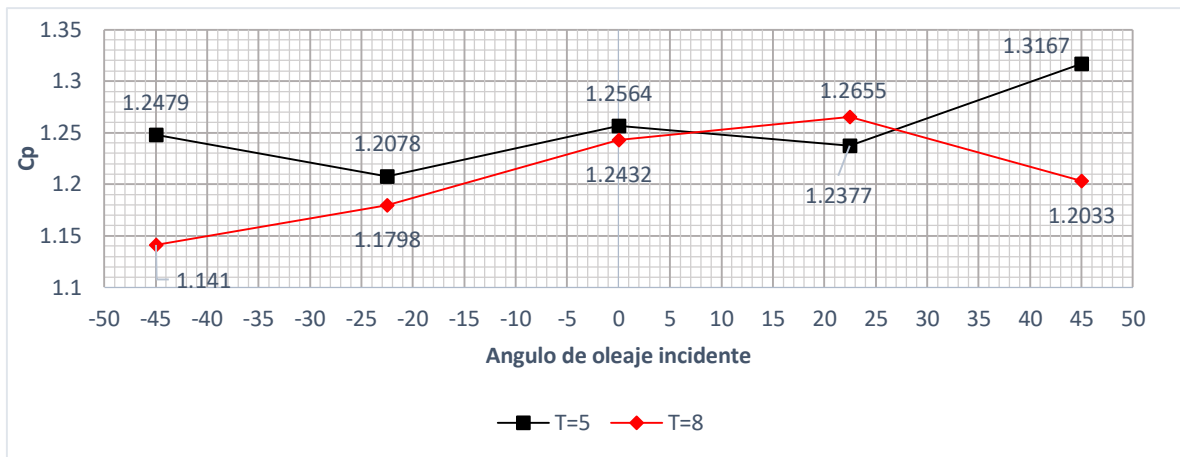


Figura 5. 71. Gráfica CP vs Amplitud de oleaje para ambos periodos

Como se esperaba, este caso presentó altos valores de propagación en cualquier dirección del oleaje incidente.

Es interesante observar que un periodo largo produce menos aumento en el Coeficiente de propagación que uno más corto.

Además, en los ángulos $+45^\circ$ y -45° , los valores del coeficiente y la forma de las gráficas para ambos periodos son contrarios.

Un oleaje de onda larga que incide a 45° en el canal de acceso se amplifica mucho menos que un oleaje de onda corta que incide de la misma manera.

Esto se debe una vez más al efecto de cuello de botella que se forma en el canal de acceso. Mientras que en un oleaje de onda corta se acumula menor energía, pero más velozmente, las ondas largas del periodo $T=8[s]$ pueden acarrear más energía, pero la concentración tarda tanto que, al llegar la segunda ola al canal de acceso, la primera probablemente ya está llegando al recinto interior.

Podría parecer necesario realizar un análisis individual específico y explicarlo aquí para cada caso de estudio, pero al momento de estudiar los resultados se observó que los casos son aceptablemente similares como para presentar solamente uno de ambos.

Esto se ilustra con la siguiente tabla, en donde se observa la similitud del coeficiente de propagación en cada caso.

Caso 96

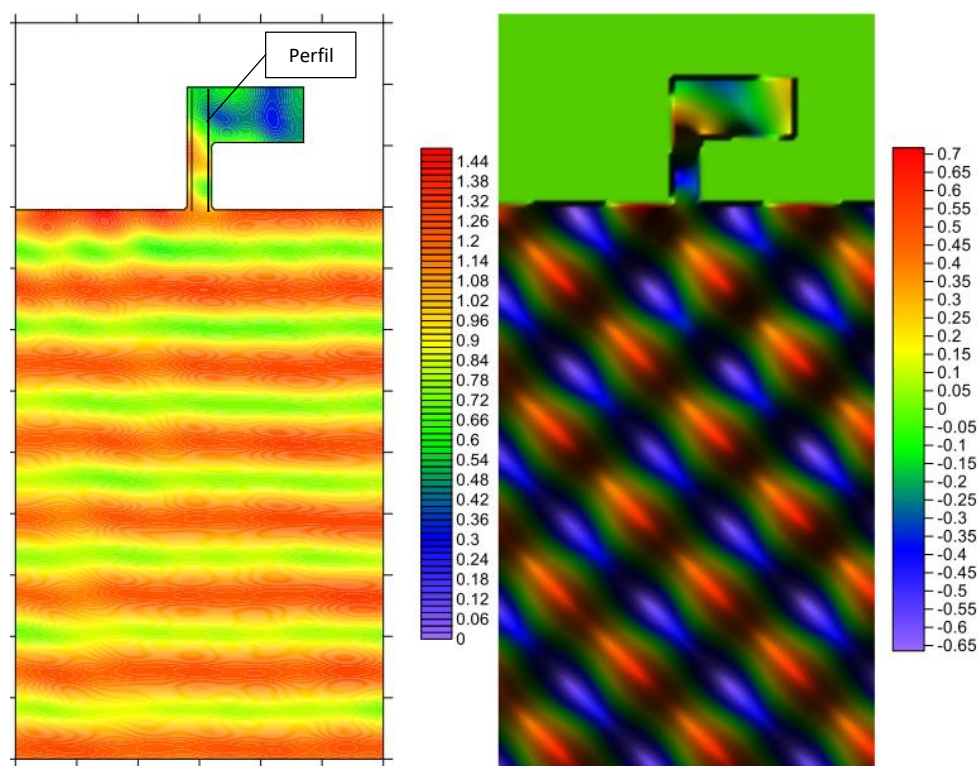


Figura 5. 72. Amplitud (izq) y superficie libre (der)

El oleaje que rebota en las paredes del canal de acceso provoca la elevada turbulencia que se registró en el perfil de Coeficiente de propagación.

Es interesante que el intervalo de turbulencia es largo, lo que nos puede hacer pensar que a pesar de que se está teniendo amplificación del oleaje dentro del puerto, éste corresponde a ondas largas y pueden no tener un efecto especialmente peligroso para la operación.

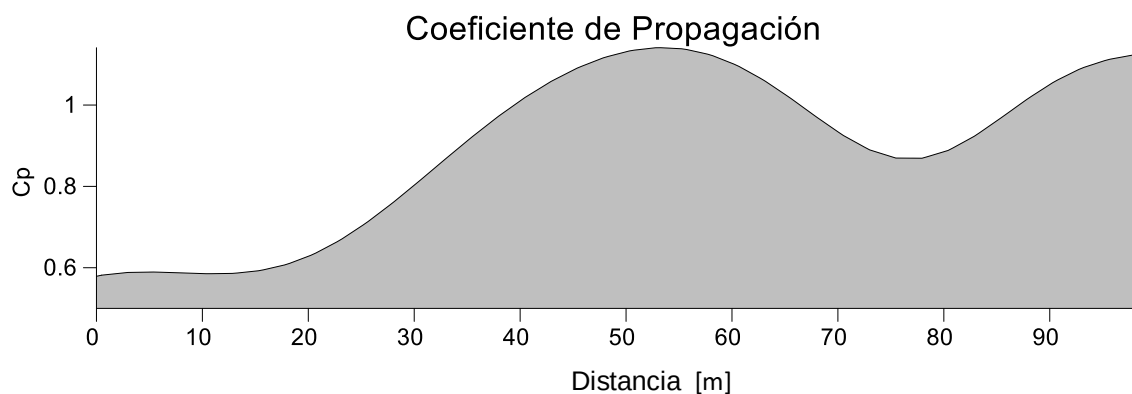


Figura 5. 73. Perfil del CP

Caso 97

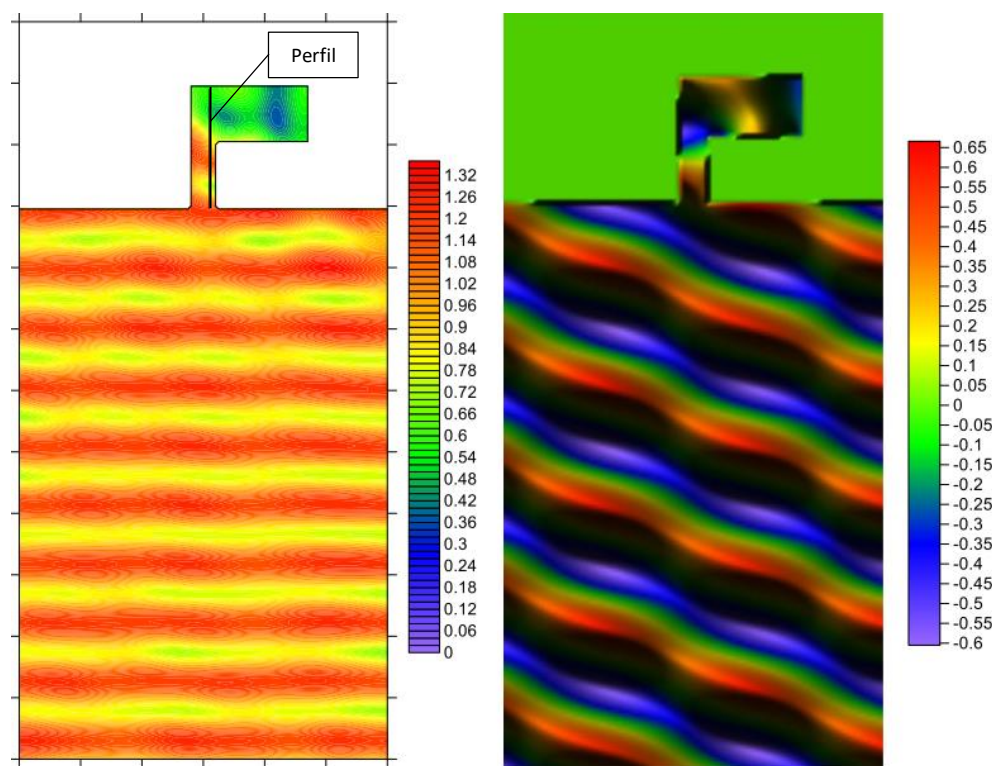


Figura 5. 74. Amplitud (izq) y superficie libre (der)

De manera similar al caso 96, el oleaje presenta una concentración en el canal de acceso.

La amplificación que se tiene de 1.22 tampoco es excesiva y el distanciamiento que se aprecia puede ayudar a que el efecto sea admisible.

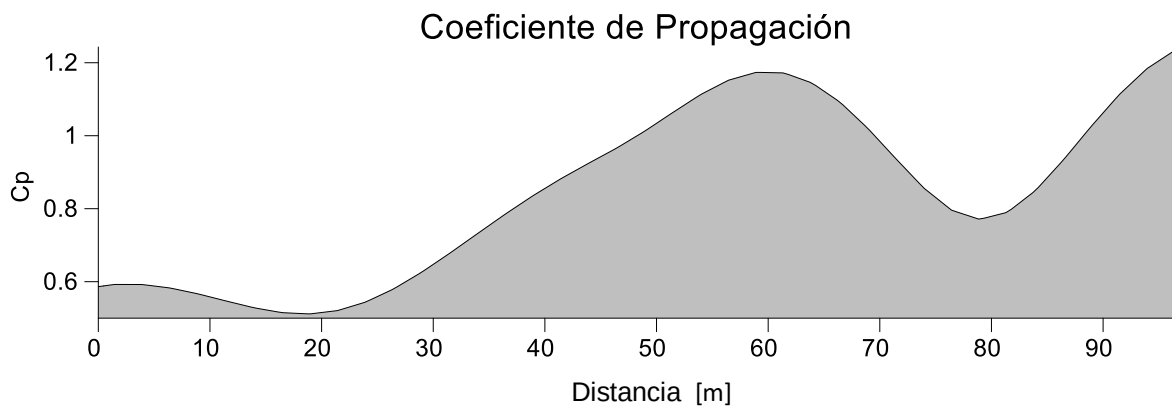


Figura 5. 75. Perfil del CP

Caso 98

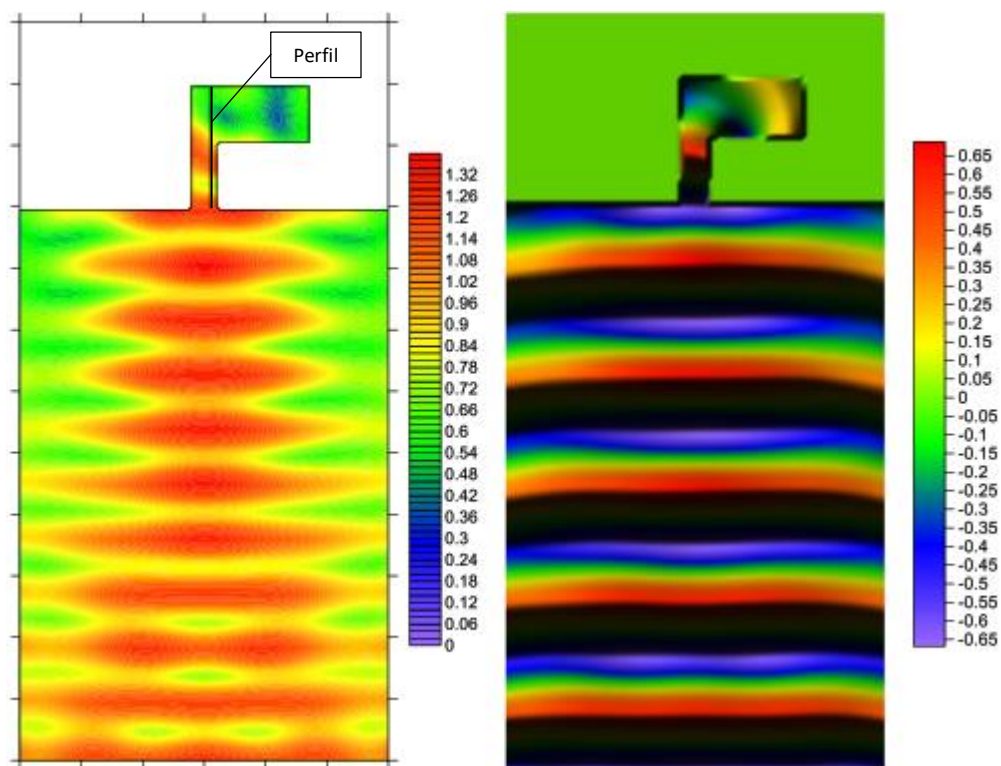


Figura 5. 76. Amplitud (izq) y superficie libre (der)

Esta condición de oleaje presenta características muy adversas debido a la falta de protección para el canal de acceso.

El oleaje ingresa prácticamente como si fuera una zona más abierta aunque llega a concentrar la energía que finalmente se refleja en la propagación debido a los efectos del recinto interior.

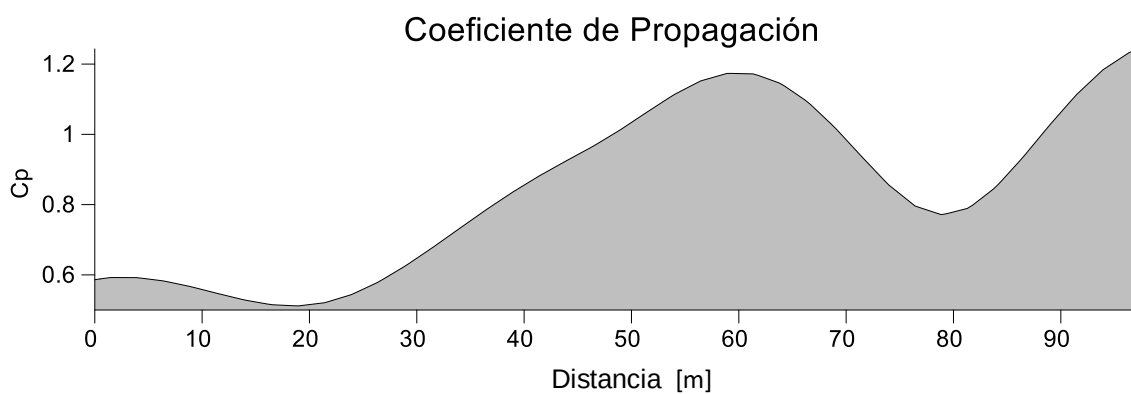


Figura 5. 77. Perfil del CP

5.4 TERCER CASO DE ESTUDIO, PUERTO CON 2 ZONAS INTERIORES (FORMA DE Y)

Continuando con las modelaciones ahora analizaremos los efectos causados para una nueva geometría, tipo “Y” la cual será sometida, como en los casos anteriores, a diferentes condiciones de oleaje con el fin de obtener un abanico de resultados para los cuales pueda llegar a presentarse fenómenos resonantes en el puerto a continuación, analizaremos los casos principales.

5.4.1 Protección a 45°.

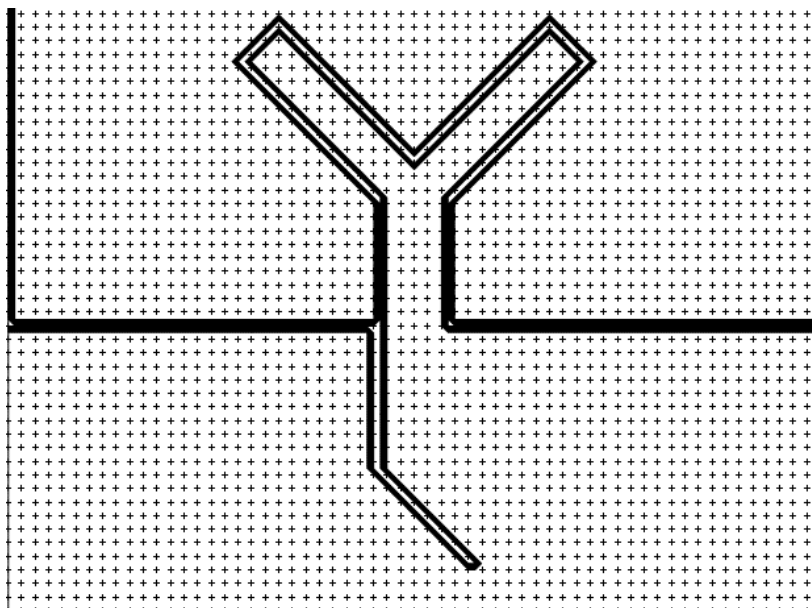


Figura 5. 78. Geometría Puerto tipo "Y"

La segunda modelación para esta geometría se analizará los efectos producidos con un periodo de 8 [s] y una variación en el ángulo incidente del oleaje, los casos presentados son del 111 al 115 y sus características se presentan en la tabla resumen. Sólo se presentarán resultados para los casos dónde ocurriera el fenómeno de resonancia*, o algún fenómeno particular, además de un caso ideal que no presente el fenómeno para ejemplificar las condiciones seguras.

*Nota: Los casos que no se presente en el apartado siguiente se pueden consultar en el ANEXO 1 para su análisis.

Tabla 13. Coeficientes de propagación máximos obtenidos de los casos modelados

Caso	Geometría tipo	Forma de rompeolas	Angulo incidente de Oleaje [°]	Periodo [s]	Coeficiente de propagación máximo
Segunda simulación para periodo T = 5 [s]					
101	Forma "Y"	Brazo a 45°	-22.5	5	0.825
102	Forma "Y"	Brazo a 45°	-45	5	0.48
103	Forma "Y"	Brazo a 45°	45	5	2.5859
104	Forma "Y"	Brazo a 45°	22.5	5	1.697
105	Forma "Y"	Brazo a 45°	0	5	1.164
Segunda simulación para periodo T = 8 [s]					
126	Forma "Y"	Brazo a 45°	-22.5	8	0.3666
127	Forma "Y"	Brazo a 45°	-45	8	0.255
128	Forma "Y"	Brazo a 45°	45	8	1.691
129	Forma "Y"	Brazo a 45°	22.5	8	1.104
130	Forma "Y"	Brazo a 45°	0	8	0.658

A continuación, se presentan una gráfica de coeficientes de propagación vs ángulo de oleaje incidente, de todos los casos enlistados en la tabla 15. de acuerdo a los datos obtenidos de la modelación en el programa WAPO. El objetivo es sintetizar los resultados en herramientas útiles, partiendo con diferentes ángulos incidentes y ver cómo responde la geometría ante dichas condiciones, estableciendo la siguiente relación:

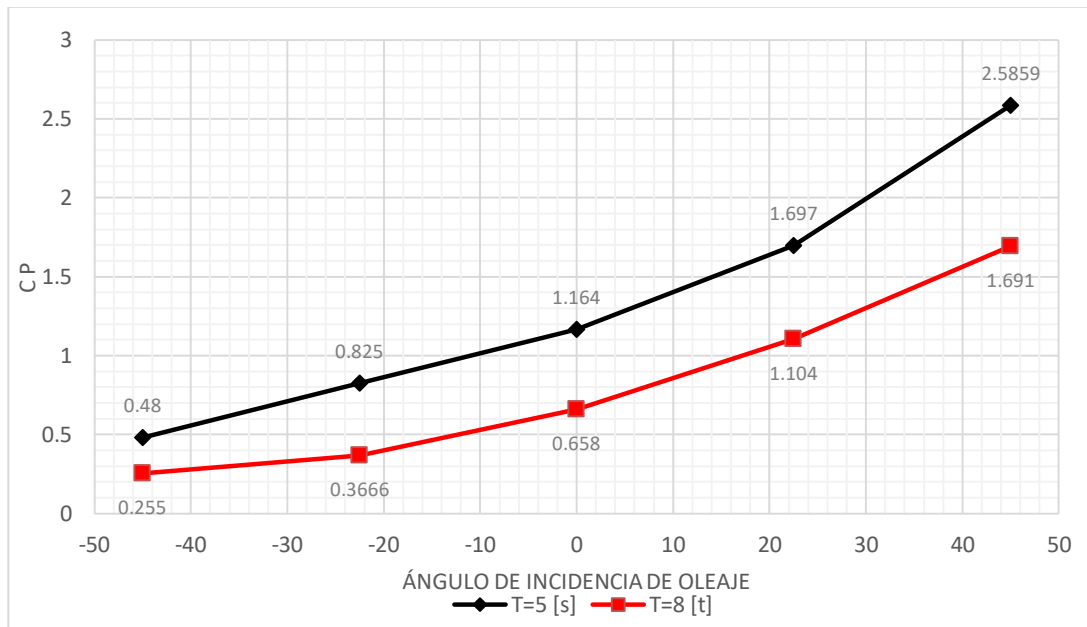


Figura 5. 79. Gráfica CP vs Ángulo incidente de oleaje

De la gráfica anterior se observa que los valores de resonancia más altos se presentan para el periodo de 5 [s]. Se observa que las condiciones más desfavorables se presentan en las direcciones de 22.5° y 45°, debido a la forma en que se encuentra la obra de protección generando gran perturbación en el puerto, a continuación, se presenta un análisis detallado de los casos que presentan resonancia y una condición ideal dónde la geometría evita por completo la resonancia.

CASO 101:

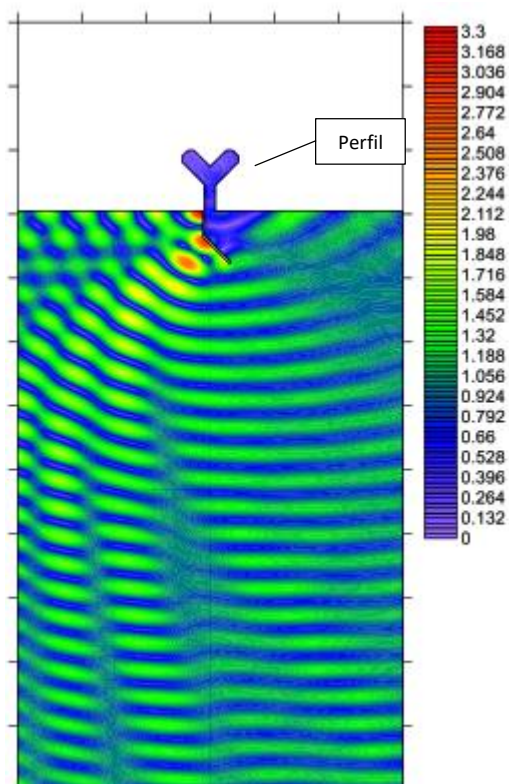


Figura 5. 80. Resultados AMP graficados en surfer

Para el caso 101 podemos observar en la primera gráfica que los valores más bajos del coeficiente de propagación se presentan la interior del puerto, por lo cual podemos concluir que no existe resonancia o ningún indicio de que pudiera llegar a presentarse tal fenómeno. La forma del rompeolas permite que el oleaje rompa directamente sobre él protegiendo todo el acceso al puerto, se observa tiene la longitud adecuada el rompeolas para que la ola difractada no entre al puerto.

Los valores de propagación máxima se presentan en las esquinas de los rompeolas en su cara exterior lo cual deberá atender con precaución, teniendo una protección resistente y adecuada para estos puntos dónde hay resonancia fuera del puerto.

De igual manera comparando el efecto con el caso 126, dónde se tiene un periodo de 8 [s] pero la misma configuración los coeficientes de propagación son menores en dicho caso, esto debido a que al tener un periodo corto la cantidad de oleaje en un mismo lapso de tiempo es mayor para el periodo de 5 [s], lo cual puede provocar que se generen condiciones para un amplificación de la resonancia.

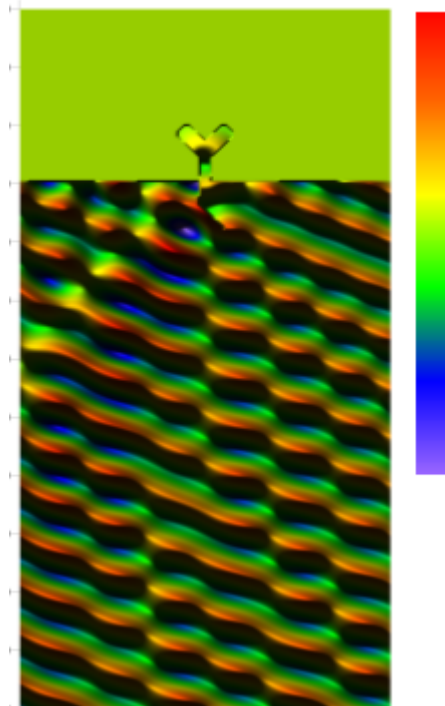


Figura 5. 82. Resultados SUP graficados en surfer

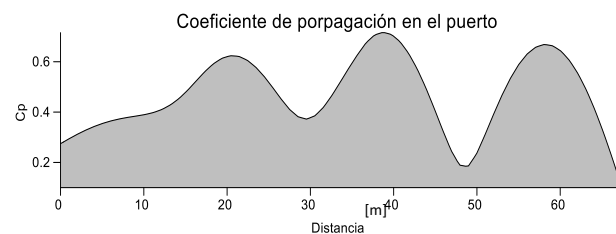


Figura 5. 81. Perfil de CP para el canal de acceso

CASO 103:

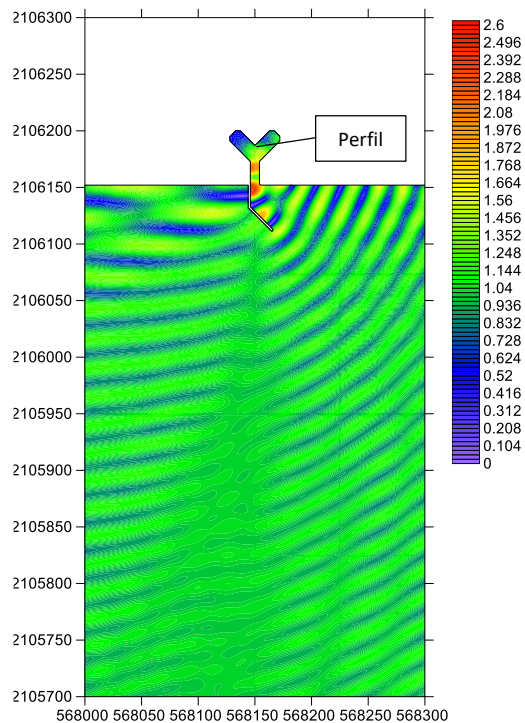


Figura 5. 83. Resultados AMP graficados en surfer

De nueva cuenta para esta dirección de oleaje presenta efectos de resonancia, la variación del periodo a 5 [s] amplificó los coeficientes de propagación dentro del puerto como se puede observar en la imagen de la izquierda, en comparación del caso 101.

Se observa que los puntos dónde se genera el fenómeno cambiaron ligeramente, esto es ocasionado por el cambio del periodo, al cambiar, el modo de oscilación natural del puerto y el de la ola se amplifican en un punto diferente, pues la reflexión de la ola para esta condición de oleaje es diferente.

Los coeficientes de propagación son del orden de 2.3 en los puntos más elevados, en la gráfica de abajo en superficie libre observamos el fenómeno de la resonancia dentro del puerto, dónde se observa como la resonancia del fenómeno sucede en el canal de conducción.

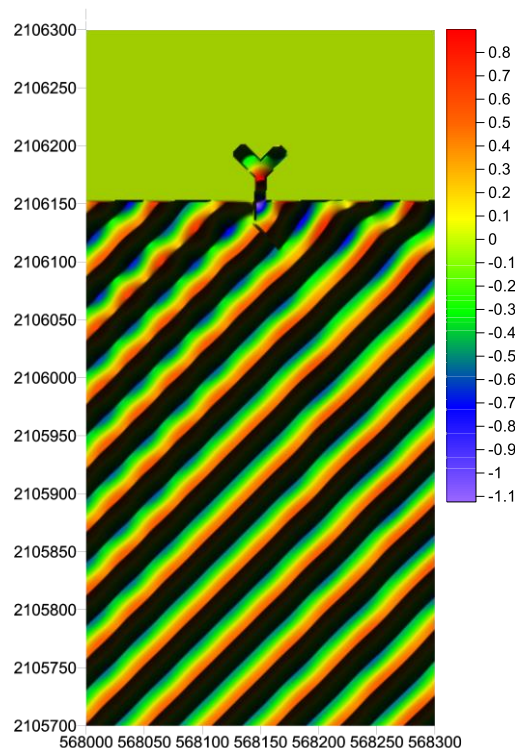


Figura 5. 85. Resultados SUP graficados en surfer

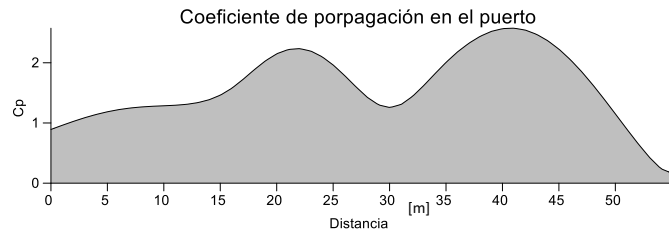


Figura 5. 84. Perfil de CP del canal de acceso

CASO 104:

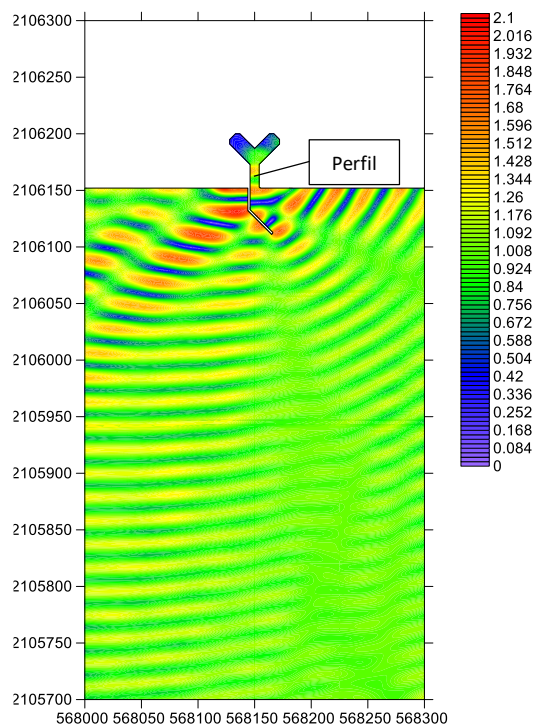


Figura 5. 86. Resultados AMP graficados en surfer

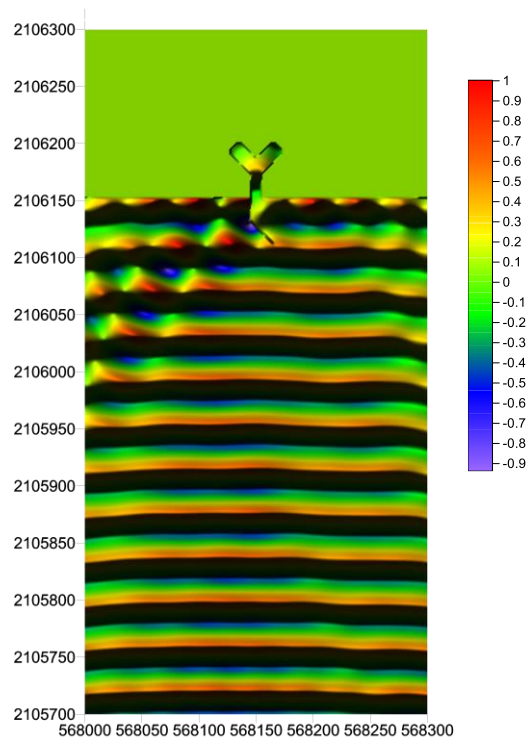


Figura 5. 88. Resultados SUP graficados en surfer

Se reitera la falta el fenómeno de resonancia en ésta configuración, de igual manera los coeficientes de amplifican provocando la inoperatividad del puerto.

Concluimos que el disminuir del periodo únicamente amplifica el fenómeno de resonancia, aumentando los coeficientes de propagación. La configuración del puerto no es adecuada para los casos mostrados anteriormente, por lo cual se recomienda al consultante evitar ésta geometría cuando se tienen ángulos de incidencia de oleaje parecidos y periodos cortos dónde se puede amplificar considerablemente el fenómeno.

Debido a la fuerza del fenómeno una estructura auxiliar no sería suficiente, los niveles están por encima de las tolerancias de los manuales vistos anteriormente. Se recomienda cambiar la configuración del puerto para poder operar.

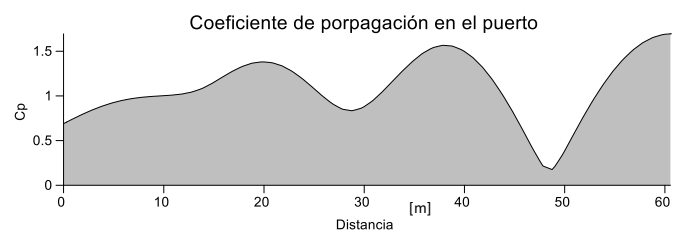


Figura 5. 87. Perfil de CP del canal de acceso

CASO 126:

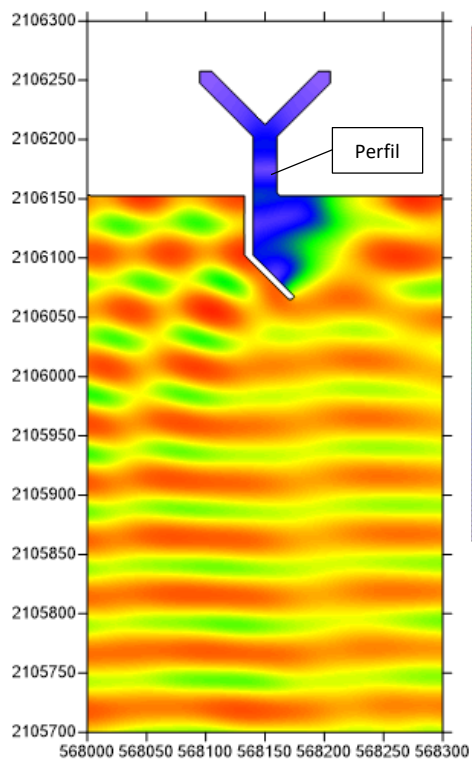


Figura 5. 89. Resultados AMP graficados en surfer

Como se ha visto en los capítulos anteriores el tener una obra de abrigo muy bien diseñada permite proteger a nuestro puerto, en los accesos, zonas de atraque y maniobra, para no tener efectos que interrumpan nuestra labor. Como se puede observar en la Figura 5.89., la posición del rompeolas es adecuado ya que protege por completo la entrada del puerto oponiéndose al ángulo de incidencia de la ola, refractándola para que no se genera casi nada de perturbación en su interior.

Para el caso 127 que se puede consultar en el anexo 1 se presenta el mismo fenómeno, dónde se presenta un ángulo de incidencia mayor de -45° franco sur, pero no se genera ninguna perturbación ya que el rompeolas se opone a la incidencia de la ola funcionando eficientemente.

Se concluye que para estas condiciones no se presenta resonancia, los coeficientes de propagación dentro del puerto son muy bajos y esto se debe en buena medida a la obra de abrigo que funciona bien para estos ángulos de incidencia.

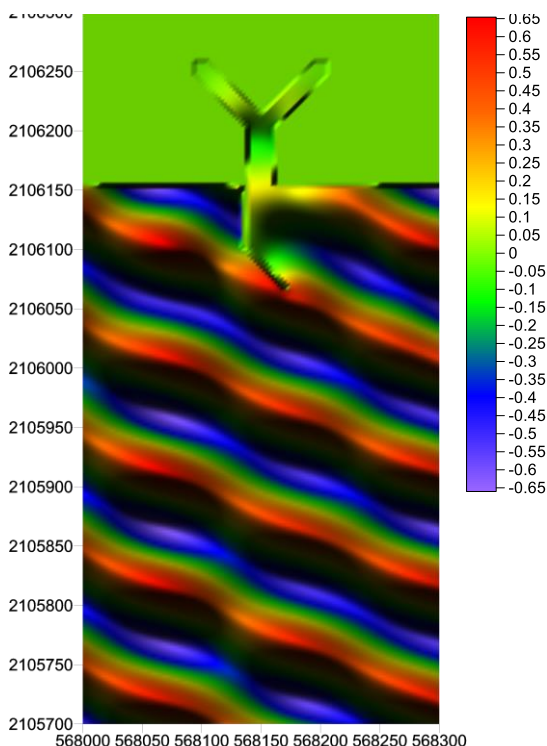


Figura 5. 91. Resultados SUP graficados en surfer

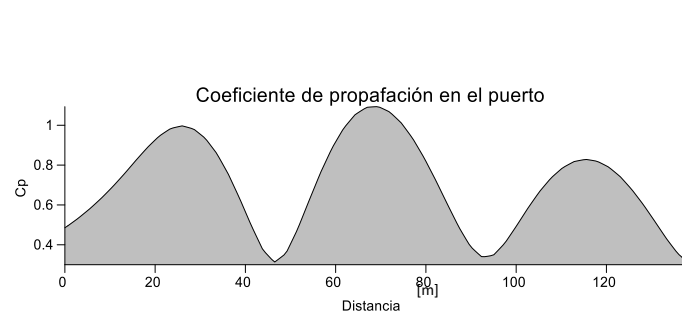


Figura 5. 90. Perfil de CP por el canal de acceso

CASO 128:

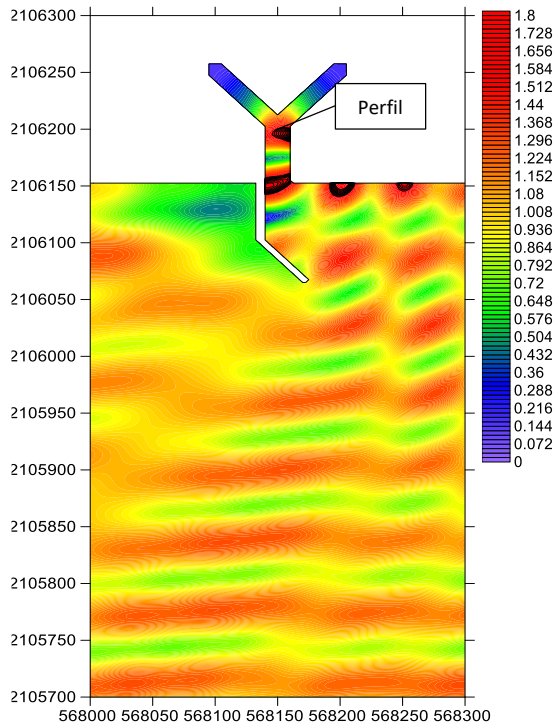


Figura 5.93. Resultados AMP graficados en surfer

Para este caso los resultados presentan efectos de resonancia, ya que observamos que el coeficiente de propagación dentro del recinto presenta valores elevados, las principales afectaciones se presentan en la bocana del puerto y en la bifurcación hacia las zonas de atraque.

A diferencia del caso 126, el ángulo de incidencia del oleaje es de 45° franco sur, esto genera que el oleaje entre de forma directa sin obstáculo al interior del puerto. Se puede observar en la figura 5.92. que en las líneas de oleaje dibujadas se van distorsionando para introducirse dentro del recinto, al llegar a este punto el oleaje ha perdido algo de altura por la difracción en el rompeolas, pero no ha sido suficiente para detenerlo, por tal motivo la onda penetra en el puerto rebotando en sus muros generando resonancia.

El perfil mostrado corresponde a los coeficientes de propagación, como fue visto en planta se presentan los valores más altos en la bifurcación y entrada del puerto. Esta geometría de puerto no es adecuada para estas condiciones.

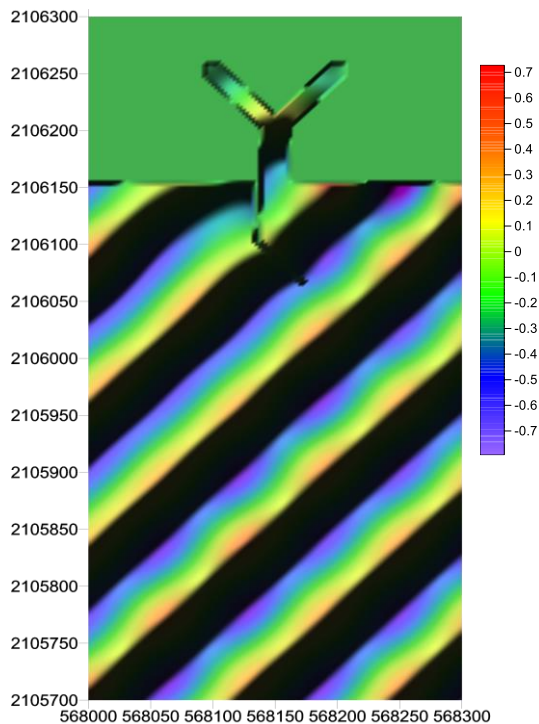


Figura 5.92. Resultados SUP graficados en surfer

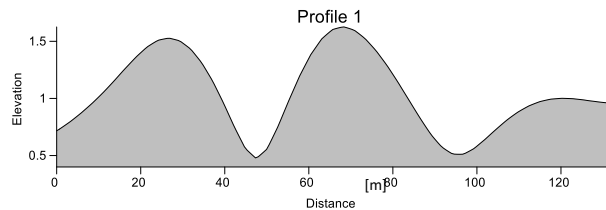


Figura 5.94. Perfil de CP por el canal de acceso

CASO 129:

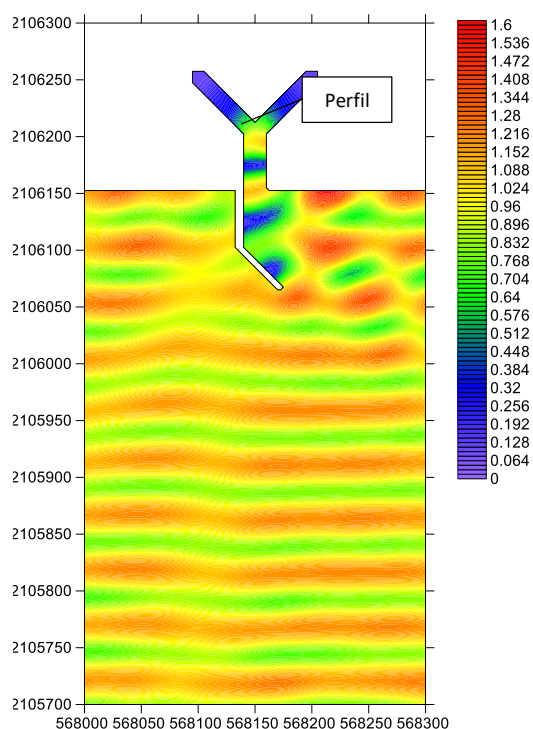


Figura 5.95. Resultados AMP graficados en surfer

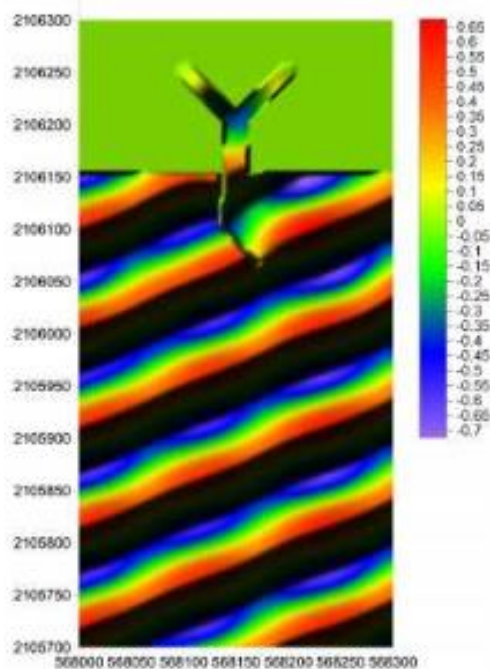


Figura 5.97. Resultados SUP graficados en surfer

Con un ángulo de incidencia de 22.5° franco sur, al igual que lo visto en el caso anterior, se presentan efectos de resonancia dentro del recinto. La dirección de la estructura de abrigo no es conveniente para estos ángulos de incidencia.

Se puede observar en la imagen que al ser menor el ángulo de incidencia de la ola, la refracción en el rompeolas es mayor, lo cual se ve reflejado en coeficientes de propagación menores en comparación del caso anterior. Pero que sigue manteniendo valores altos que en el “manual de dimensionamiento portuario de la SCT” establece como rangos de condiciones inoperables.

Los coeficientes de propagación disminuyen cercanos a 1 en comparación del caso anterior, los sitios dónde se presenta la resonancia son los mismos puntos. La configuración del puerto no es adecuada cuando se tiene oleaje en estas dimensiones.

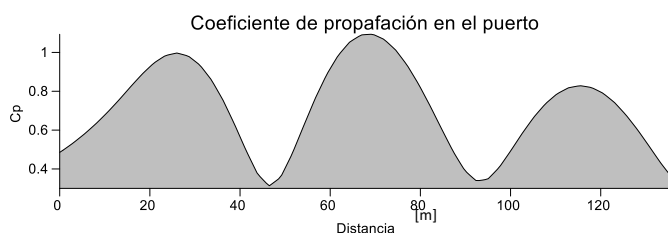


Figura 5.96. Perfil de C_p en el canal de acceso

5.4.2 Protección Lateral.

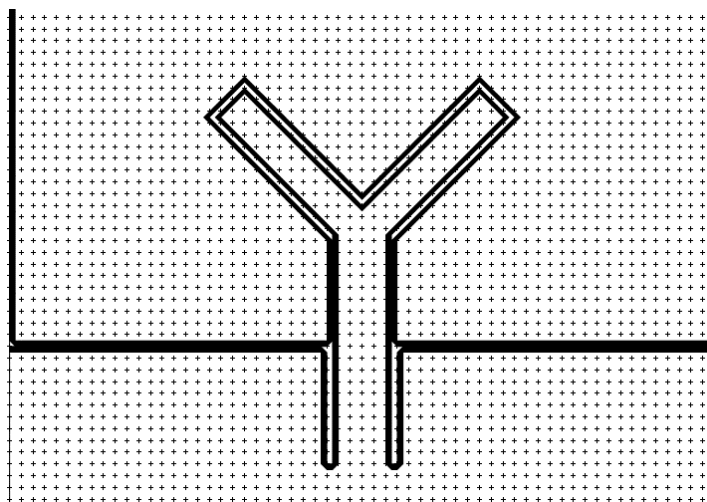


Figura 5. 98. Vista en planta rompeolas laterales

Esta nueva configuración con los rompeolas laterales es simétrica por lo que simplificaremos algunos casos ya que se repiten los mismos valores por ser simétrica. Esta configuración como vemos en los resultados es bastante vulnerable y convendría ser usado como espigón interior en lugar de estructuras de abrigo, presentamos el siguiente análisis:

Tabla 14. Coeficientes de propagación máximos obtenidos para los casos modelados

Caso	Geometría tipo	Forma de rompeolas	Angulo incidente de Oleaje [°]	Periodo [s]	Coefficiente de propagación máximo
Segunda simulación para periodo T = 5 [s]					
116	Forma "Y"	Lateral	-22.5	5	1.457
117	Forma "Y"	Lateral	-45	5	1.178
118	Forma "Y"	Lateral	45	5	1.178
119	Forma "Y"	Lateral	22.5	5	1.457
120	Forma "Y"	Lateral	0	5	1.608
Segunda simulación para periodo T = 8 [s]					
141	Forma "Y"	Lateral	-22.5	8	1.875
142	Forma "Y"	Lateral	-45	8	2.058
143	Forma "Y"	Lateral	45	8	2.058
144	Forma "Y"	Lateral	22.5	8	1.875
145	Forma "Y"	Lateral	0	8	2.026

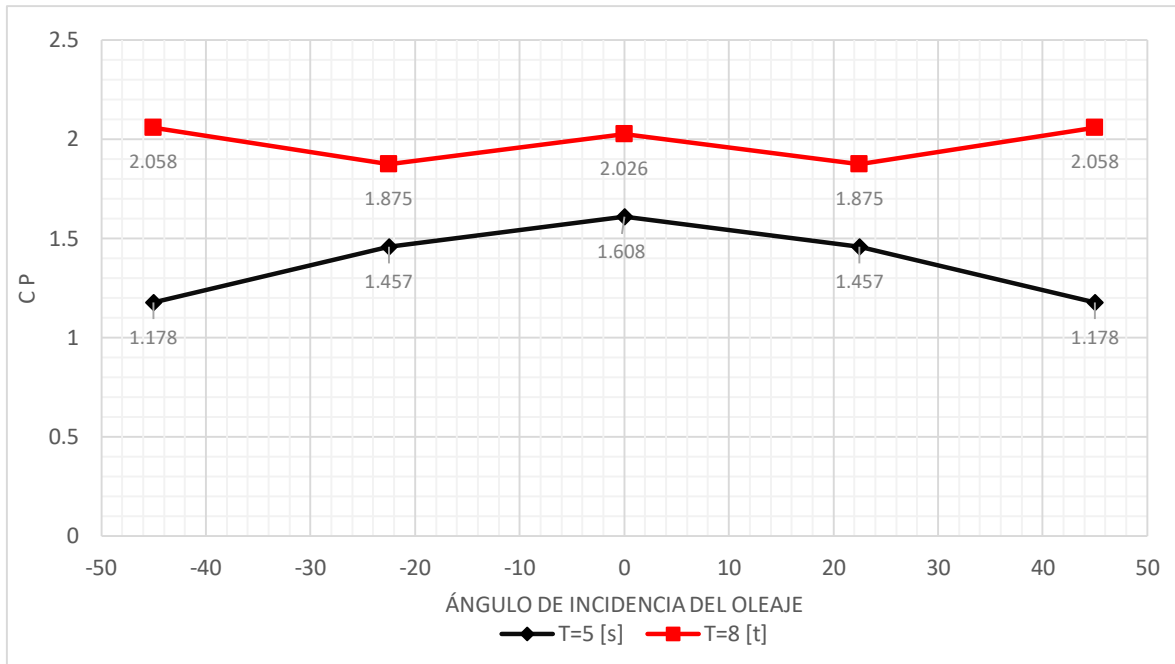


Figura 5. 99. Gráfica Cp vs Ángulo incidente de oleaje

Como podemos observar en la gráfica anterior los coeficientes de propagación para todos los casos modelados son mayores de 1, lo que nos indica que se presenta resonancia en todos los casos analizados dentro del puerto. Por lo cual podemos deducir que esta configuración no es adecuada para zonas portuarias donde el oleaje dominante sea proveniente del norte, o noroeste.

La forma de la gráfica varía respecto a los demás, podemos ver que para el análisis de 5 [s] los coeficientes de propagación disminuyen conforme el ángulo de incidencia de oleaje se acerca a una dirección franco este u oeste, por la forma en que se difractaría el oleaje en los rompeolas para esas condiciones de oleaje trabajarían de manera más eficiente.

Por otro lado, en la modelación con el periodo de 8 [s] para los ángulos de $\pm 22.5^\circ$ hubo la disminución de los coeficientes de propagación esperada, en cambio para los ángulos de $\pm 45^\circ$ existe un aumento en los valores de los coeficientes inesperado que puede explicarse con su similitud de periodo con el periodo natural del puerto, esto es un factor que puede cambiar ciertas condiciones cuando los periodos coinciden.

A continuación, presentaremos los resultados de la modelación, analizando cómo se presenta el fenómeno de resonancia y los efectos que tendría en el puerto; para no repetir los resultados debido a que es simétrica sólo se presentará un caso por cada valor repetido.

CASO 116 5S:

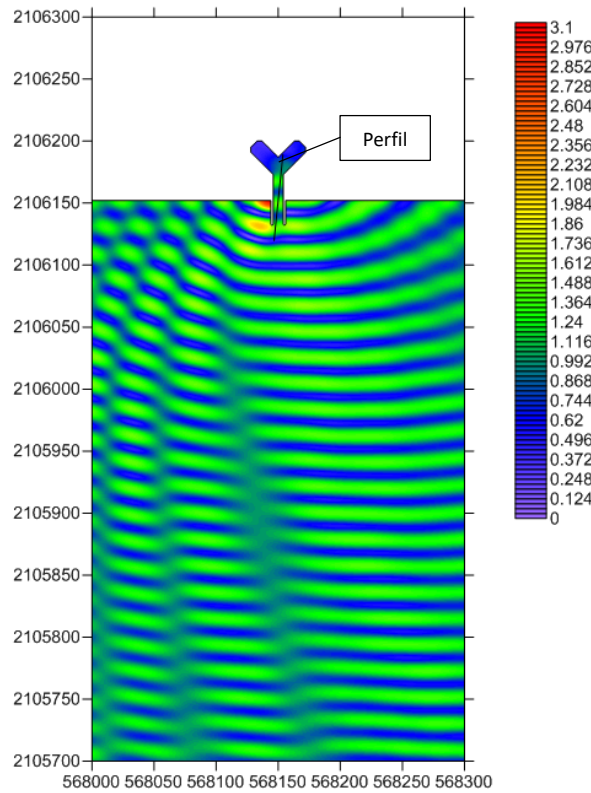


Figura 5. 100. Resultados AMP graficados en surfer

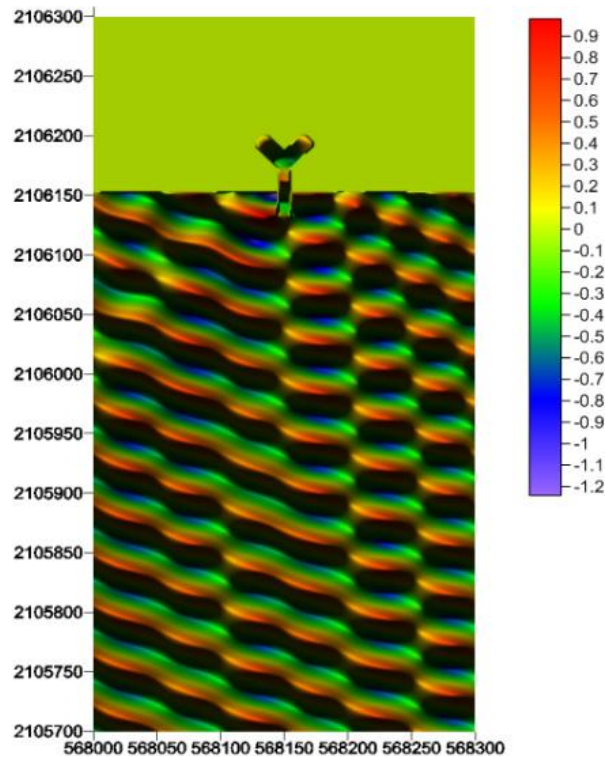


Figura 5. 102. Resultados SUP graficados en surfer

El oleaje incidente con un ángulo de 22.5° suroeste llega a los rompeolas dónde se difracta, la onda reflejada llega a la entrada del puerto y se encuentra con el rompeolas ubicado paralelo al primero, rompe y la onda empieza a rebotar dentro del puerto generando resonancia, el lugar dónde se presenta el fenómeno es en la boca de acceso al recinto y a lo largo del canal de conducción hacia la bifurcación de la "Y". El lugar de la perturbación puede variar dependiendo del periodo de la ola y el periodo de oscilación del puerto.

Podemos observar que por la forma del rompeolas la mayor agitación se genera en la parte externa, la cual no afecta la operación, pero debe ser considerado para el diseño de un rompeolas evitando la socavación.

El valor máximo de coeficiente de propagación es de 1.457 en la parte de acceso al puerto, por ende, no es recomendable esta geometría para esas condiciones de oleaje.

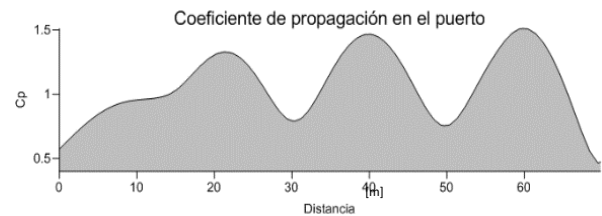


Figura 5. 101. Perfil de CP del canal de acceso

CASO 117 5S:

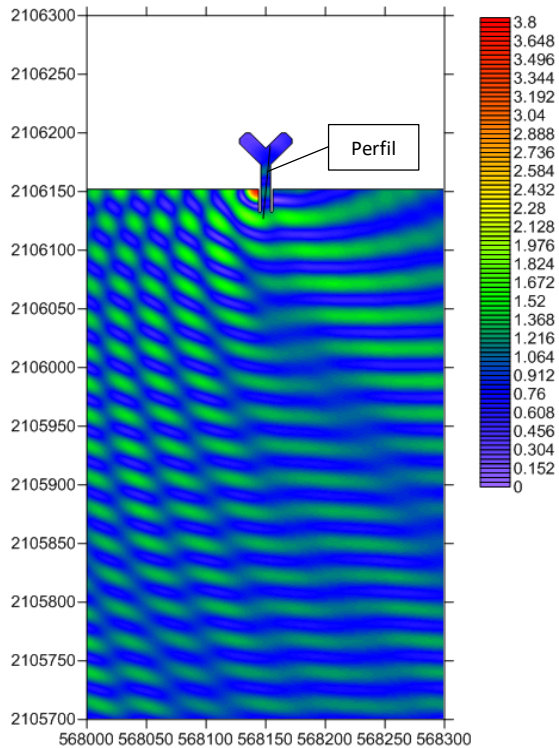


Figura 5. 103. Resultados AMP graficados en surfer

Para este caso podemos observar que los efectos resonantes dentro del puerto son menores debido a lo que explicábamos anteriormente, que con un ángulo de incidencia tendiendo a la horizontal los coeficientes de propagación son menores ya que funciona eficientemente el rompeolas. Por ende, para este caso tenemos oleaje a 45° suroeste, observamos en la imagen de la izquierda como disminuyó los efectos resonantes dentro del puerto de acuerdo a la escala, vemos que de nuevo los valores más grandes se presentan en la parte externa del rompeolas, para efectos de los estudios de esta tesis no será prioridad ya que no afecta la navegación al puerto.

El coeficiente máximo de propagación dentro del puerto es de 1.178, disminuyó el efecto resonante, en la imagen inferior se observa la zona donde existe mayor resonancia, en la imagen inferior izquierda se ve la distorsión de la ola al acercarse al puerto y como en su perturbación en el puerto

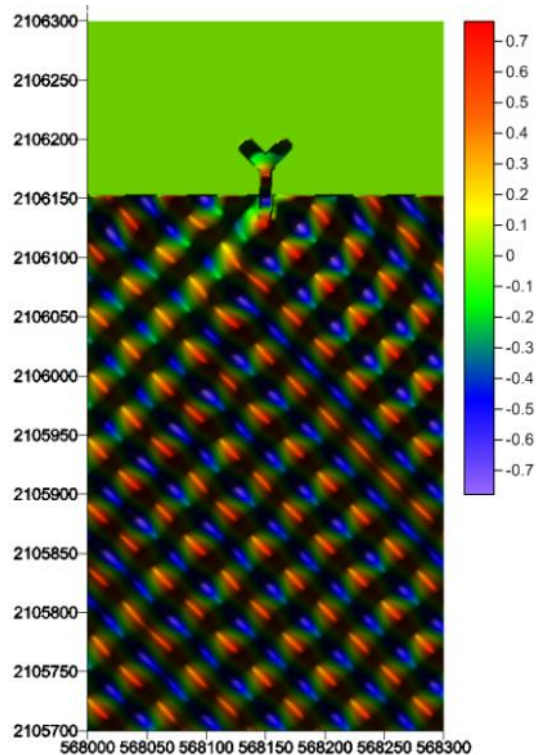


Figura 5. 105. Resultados SUP graficados en surfer

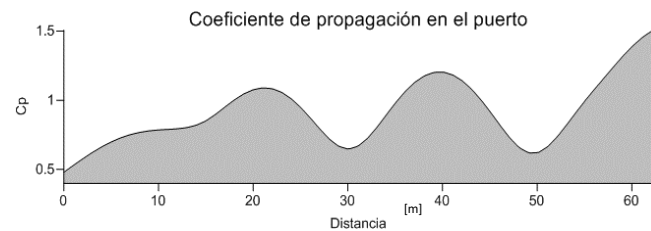


Figura 5. 104. Perfil de CP del canal de acceso

CASO 120 5S:

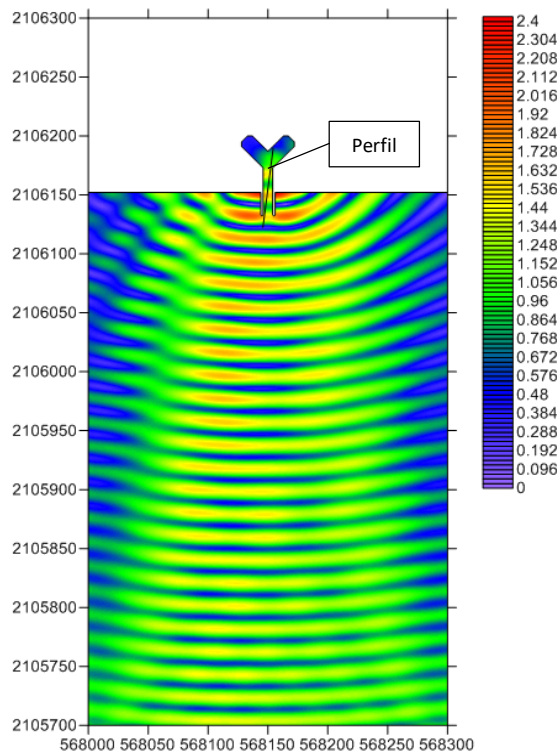


Figura 5. 106. Resultados AMP graficados en surfer

El siguiente caso es el más desfavorable debido a la forma en que llega el oleaje al puerto, su dirección es franco sur por lo cual parte del oleaje llegaría a en su totalidad casi sin deformación. Se observa en la imagen de la izquierda que al llegar la ola al rompeolas se difracta, pero debido a las condiciones en que llega el oleaje es poco en relación a lo que vemos en los casos anteriores, esto sumado a la reflexión dentro del puerto se genera la resonancia.

Se ve claramente que todo el canal principal de acceso se ve afectado con el efecto resonante, la zona de mayor agitación se aprecia, de acuerdo a la escala de color, sucede en la entrada y final del canal con los coeficientes más altos de propagación.

En la imagen inferior izquierda se ve como se deforma el oleaje conforme llega al puerto, y en la imagen inferior de manera detallada la agitación en los puntos señalados, el coeficiente máximo de propagación de oleaje registrado es de 1.608, el mayor registrado.

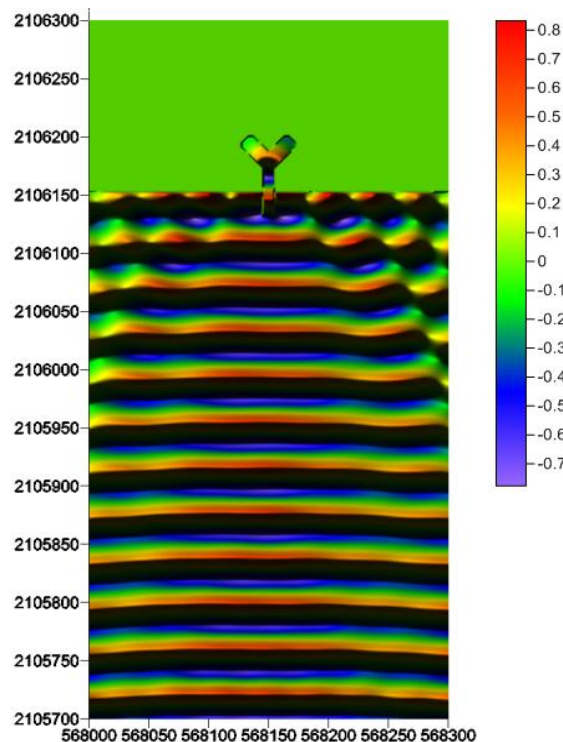


Figura 5. 108. Resultados SUP graficados en surfer

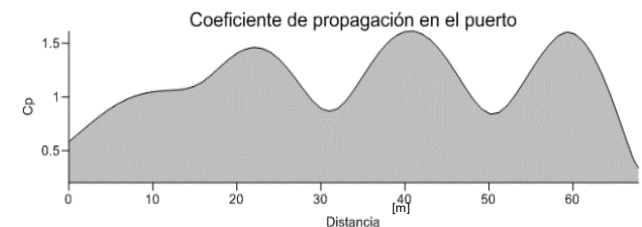


Figura 5. 107. Perfil de CP del canal de acceso

CASO 141 8S:

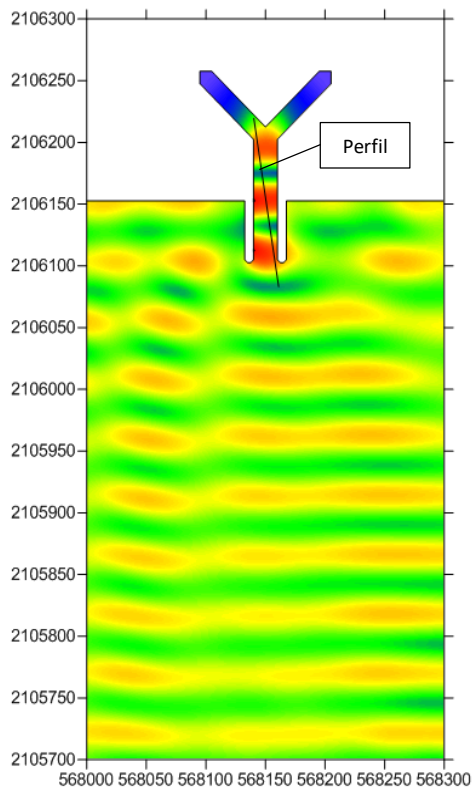


Figura 5. 109. Resultados AMP graficados en surfer

En este caso tenemos una dirección de oleaje de 22.5° suroeste, generando resonancia en nuestro puerto, se observa que al disminuir el periodo la frecuencia de oleaje hacia el puerto disminuye considerablemente como se puede comparar la imagen de la izquierda con el caso anterior.

Se observa de igual manera que al llegar la ola al rompeolas a pesar de ser difractada se genera resonancia en la entrada con valores considerables, además se observa el ángulo con el que entra la ola difractada normalizándose en su orientación conforme avanza por el canal principal. Para este caso tenemos 3 zonas de fuerte agitación, presentándose el mayor en la terminación de los rompeolas y entrada al canal principal, no es recomendable esta combinación de geometría y oleaje.

El coeficiente mayor de propagación de oleaje ubicado en la entrada del canal principal es de 1.875, en el perfil anterior se puede observar la variación máxima.

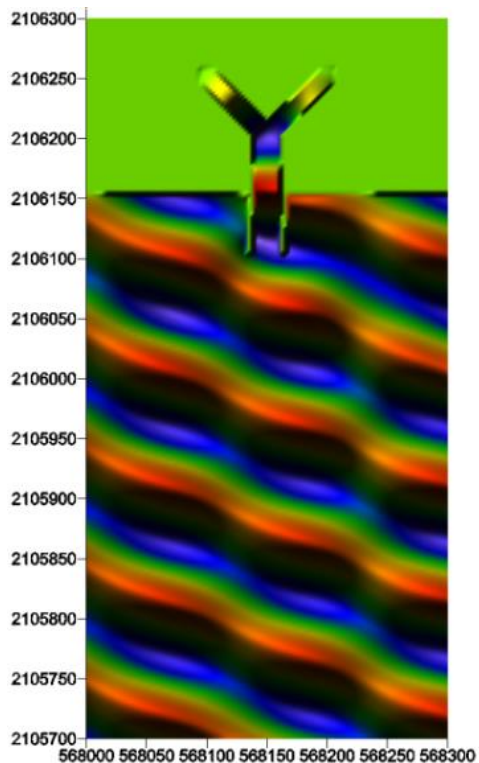


Figura 5. 111. Resultados SUP graficados en surfer

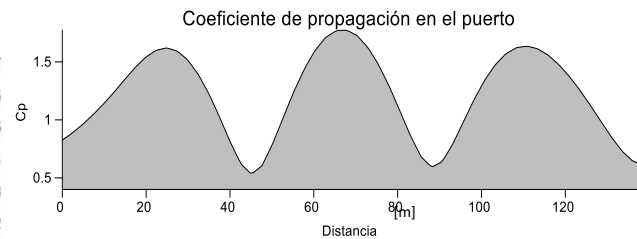


Figura 5. 110. Perfil de CP del canal de acceso

CASO 142 8S:

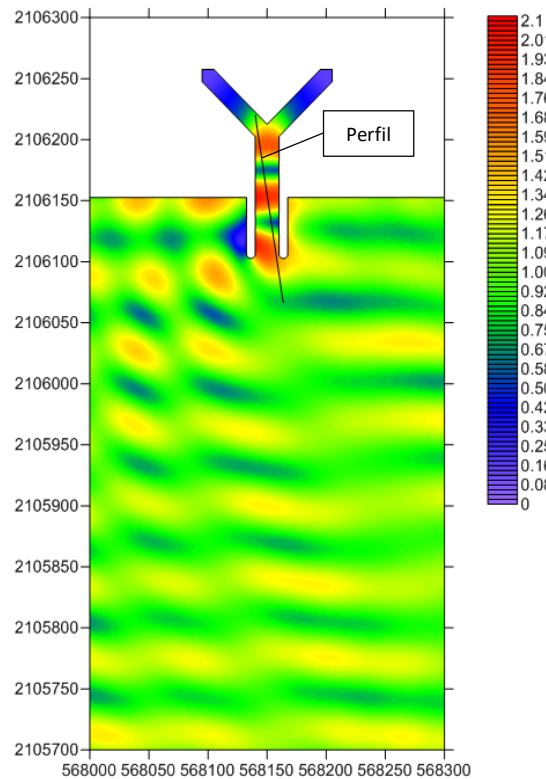


Figura 5. 112. Resultados AMP graficados en surf

Es interesante este caso, se pensaría que al igual que en la modelación para 5 [s] los valores para un ángulo de incidencia de oleaje de 45°, se reducirían los coeficientes de propagación dentro del puerto, pero esto no sucede, los valores aumentaron de manera considerable incluso teniendo los valores más altos que generarían resonancia.

Esto tiene que ver por la variación del periodo, se observa en la imagen inferior izquierda que, al llegar el tren de olas al puerto, la onda que hace contacto con el rompeolas se encuentra en cuando la onda va pasando por un nodo (nivel cero) por lo que pareciera que la difracción fuera casi nula, pero sigue aumentando hasta la cresta (su punto más alto) que se genera ya dentro del puerto lo cual propicia que nuestros valores aumenten de esa manera generando resonancia dentro del puerto.

En el perfil anterior es interesante la amplitud de onda tan grande que se presenta, alcanza un coeficiente de propagación máxima de 2.058 en la parte de entrada al canal.

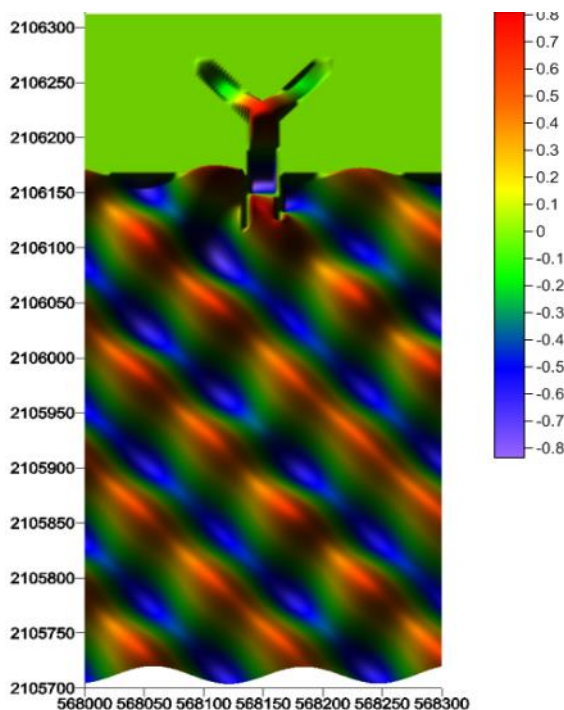


Figura 5. 113. Resultados SUP graficados en surf

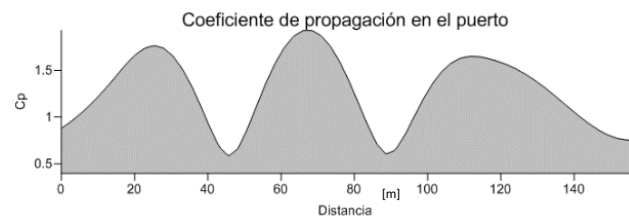


Figura 5. 114. Perfil de CP del canal de acceso

CASO 145 8S:

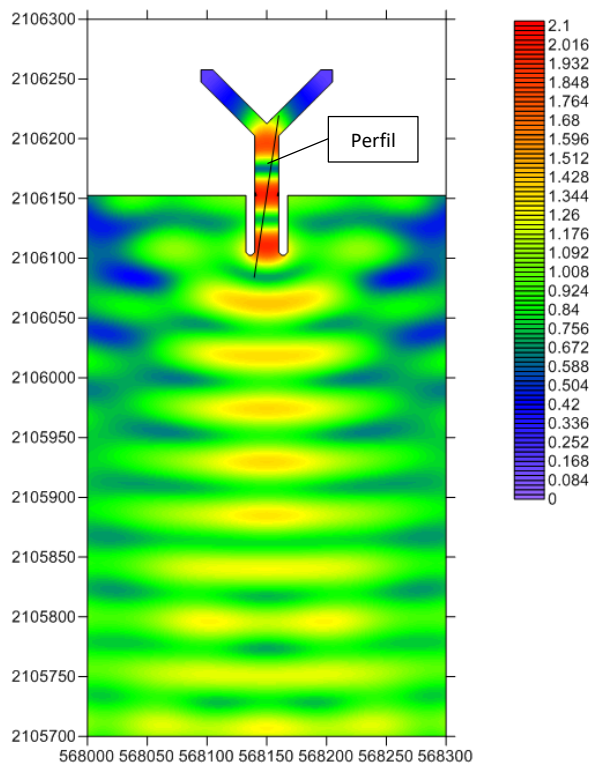


Figura 5. 115. Resultados AMP graficados en surfer

Como mencionamos en el caso anterior por la variación del ángulo de incidencia junto con el periodo de onda originaron que los coeficientes máximos de propagación se generaran en el caso anterior. Es interesante ya que la peor condición se examina para este caso cuando el oleaje llega en dirección franco sur al puerto, en comparación con el modelado para 5 [s] los valores de propagación son del doble aproximadamente.

Podemos observar en la imagen de la izquierda la forma en que se difracta el oleaje, como es que entra en forma recta al canal principal y la zona de influencia de la resonancia en dichos puntos, siendo diferente a los casos antes analizados.

Al tener coeficientes altos de propagación las amplitudes de la onda en el interior son grandes, si coeficiente máximo de propagación se encuentra en la bocana del puerto como se observa en la imagen de abajo, con un valor de 2.026 apenas menor que el caso 142.

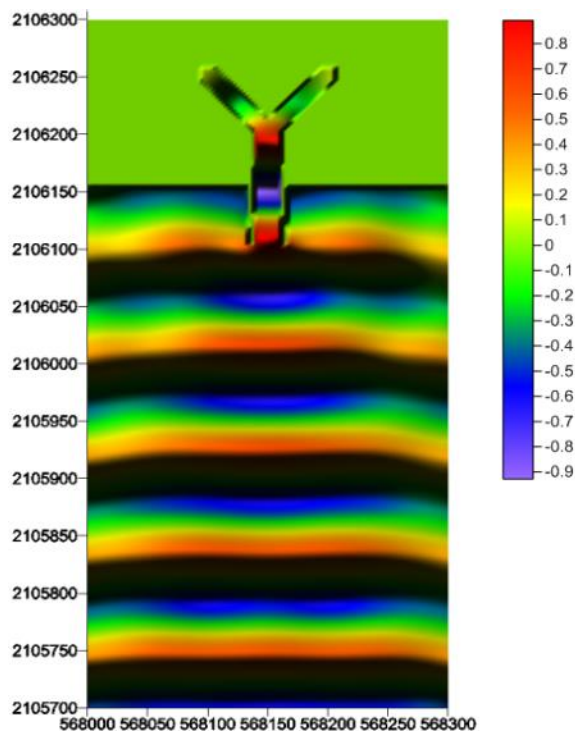


Figura 5. 116. Resultados SUP graficados en surfer

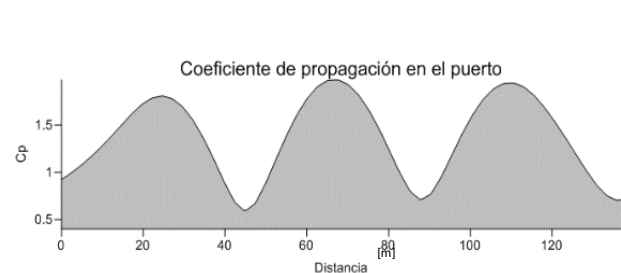


Figura 5. 117. Perfil de CP del canal de acceso

5.4.3 Protección Paralela al Puerto.

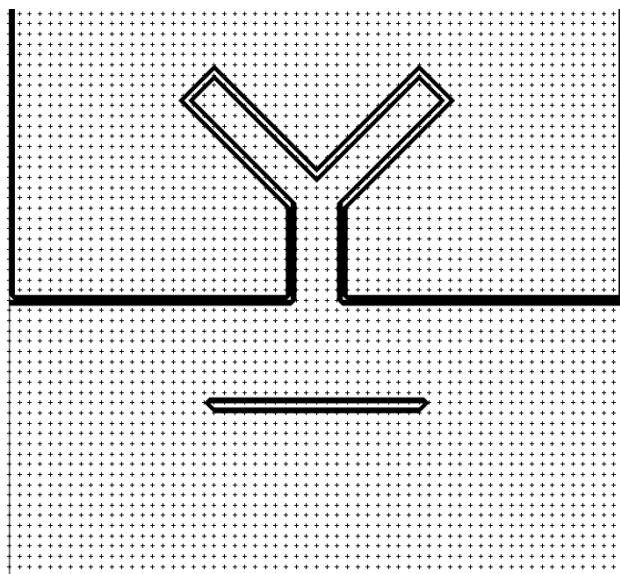


Figura 5. 118. Vista en planta rompeolas paralelo a la costa

El siguiente grupo de casos a analizar corresponde a aquellos con una obra de protección con rompeolas ubicado frente a la costa. De igual manera se analizarán ambos periodos presentando de forma detallada los casos que se presente resonancia, por la configuración se podría suponer que los casos con ángulos tendiendo a la horizontal presentarían las condiciones más desfavorables por la vulnerabilidad del rompeolas para poder proteger el oleaje con esas direcciones. En la siguiente tabla se muestran los resultados del análisis con los casos que se detallarán más adelante.

Tabla 15. Coeficientes de Propagación máximos obtenidos para los casos modelados

Caso	Geometría tipo	Forma de rompeolas	Angulo incidente de Oleaje [°]	Periodo [s]	Coeficiente de propagación máximo
Segunda simulación para periodo T = 5 [s]					
111	Forma "Y"	Separado	-22.5	5	0.816
112	Forma "Y"	Separado	-45	5	1.24
113	Forma "Y"	Separado	45	5	1.386
114	Forma "Y"	Separado	22.5	5	0.816
115	Forma "Y"	Separado	0	5	0.927
Segunda simulación para periodo T = 8 [s]					
136	Forma "Y"	Separado	-22.5	8	0.972
137	Forma "Y"	Separado	-45	8	2.496
138	Forma "Y"	Separado	45	8	2.496
139	Forma "Y"	Separado	22.5	8	0.972
140	Forma "Y"	Separado	0	8	2.3

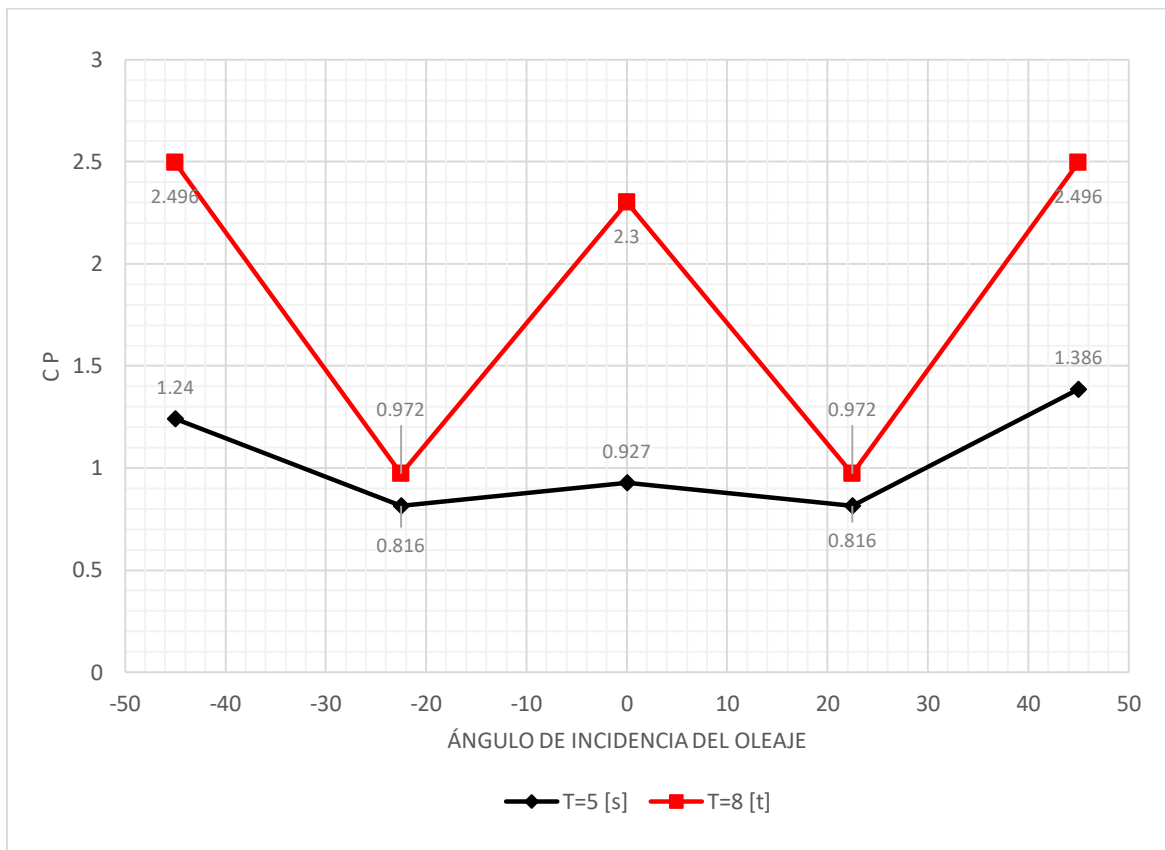


Figura 5. 119. Gráfica CP vs Ángulo incidente de oleaje

Los resultados obtenidos de la modelación son interesantes como se puede observar en la gráfica son mayores los resultados para un periodo de 8 [s] en relación a lo modelado en el periodo de 5 [s], por la configuración del rompeolas se pensaría que un oleaje con una dirección franco sur directo al rompeolas no generaría perturbación, pero no es así, cuando se presenta ese caso los valores de propagación del oleaje llegan a ser superiores a 1 en el caso del periodo de 8 [s], generando resonancia. El rompeolas funciona de manera más eficiente para los ángulos de 22.5° obteniendo los coeficientes más bajos de propagación y como se esperaba para los ángulos de 45° se presentan los valores máximos de resonancia en el puerto.

Analizaremos los casos que presenten resonancia, simplificando a un solo caso cuando se tiene simetría en los fenómenos, para no duplicar la información. Los demás casos podrán ser consultados en el ANEXO 1.

CASO 137 8S:

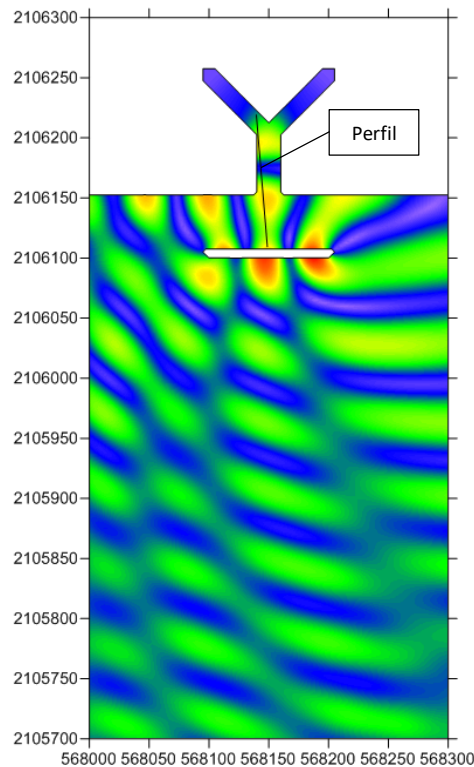


Figura 5. 120. Resultados AMP graficados en surfer

Analizamos las condiciones de este caso que es el más desfavorable, con un ángulo a 45° suroeste tendiendo a la horizontal como podemos ver se genera agitación en la entrada del canal principal del puerto, en la bifurcación de la “Y” y en la parte interior del rompeolas se presenta la mayor perturbación, esta última como mencionamos anteriormente son peligrosas ya que nos pueden generar una socavación y poner en peligro la estabilidad de talud del rompeolas.

Podemos observar en la imagen de la izquierda inferior el oleaje al llegar al rompeolas se empieza a difractar y vemos cómo se deforma la onda difractando la forma de la onda, formando puntos dónde las ondas se encuentran alcanzando los puntos máximos de superficie libre como vemos en la imagen marcados con los puntos rojos.

El coeficiente máximo de propagación registrado para este caso dentro del puerto 2.496, en la parte interior del rompeolas. En la imagen inferior se muestra de mejor manera la perturbación en el rompeolas es interior del puerto.

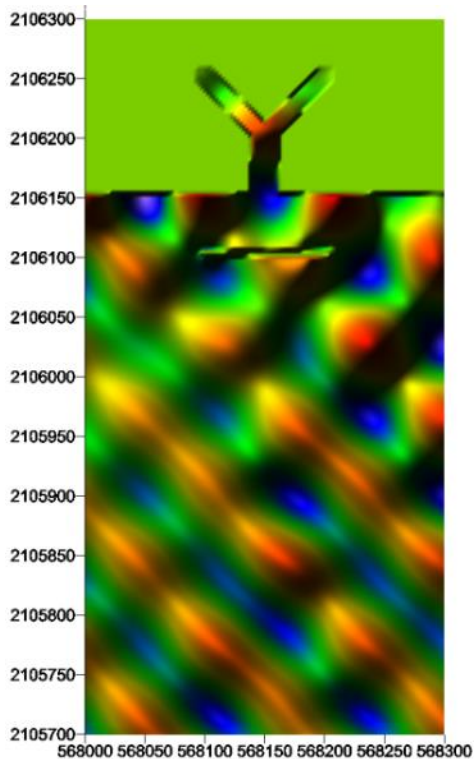


Figura 5. 122. Resultados SUP graficados en surfer

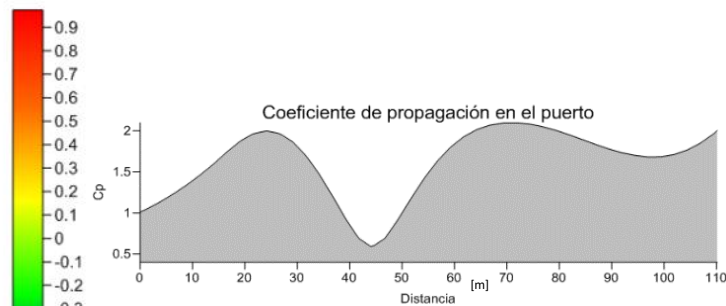


Figura 5. 121. Perfil de CP del canal de acceso

CASO 140 8S:

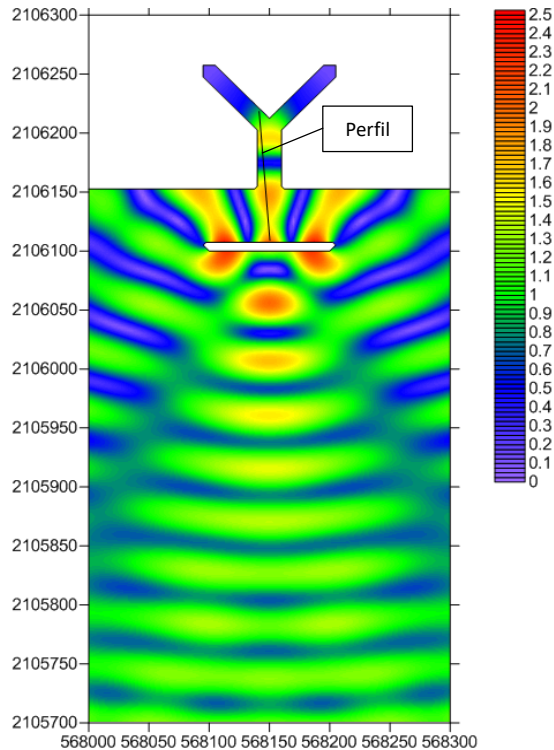


Figura 5. 123. Resultados AMP graficados en surfer

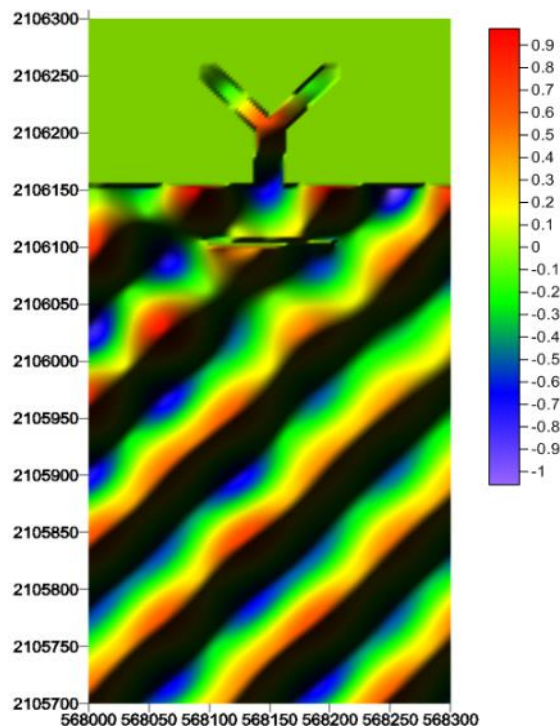


Figura 5. 125. Resultados SUP graficados en surfer

Este caso es interesante ya que nuestra obra de abrigo se encuentra frente al puerto separada una longitud de onda, pensaríamos que al tener el oleaje en una dirección franco sur funcionaría eficientemente el rompeolas disipando el oleaje para que no se generara una perturbación importante.

En la imagen de la izquierda se puede observar que efectivamente el oleaje rompe y se disipa en el rompeolas en la parte central, pero las orillas desde una distancia lejana empiezan a tener refracción y al difractarse entra para rebotar entre el rompeolas y las inmediaciones del puerto.

De nueva cuenta las perturbaciones más grandes las encontramos en el talud interior del rompeolas, a pesar de que no se genera dentro del recinto los efectos más graves, es importante ya que no podemos tener una falla en la estructura de abrigo.

El coeficiente máximo de propagación es de 2.423 y como vemos en la imagen inferior se presenta en la parte interior del rompeolas.

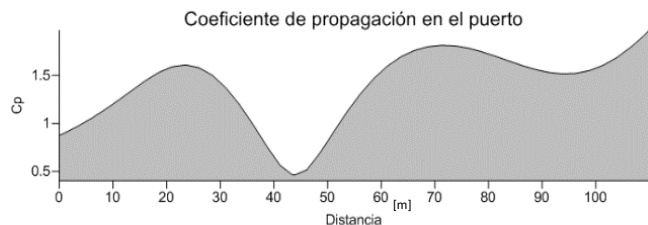


Figura 5. 124. Perfil de CP del canal de acceso

CASO 112 5S:

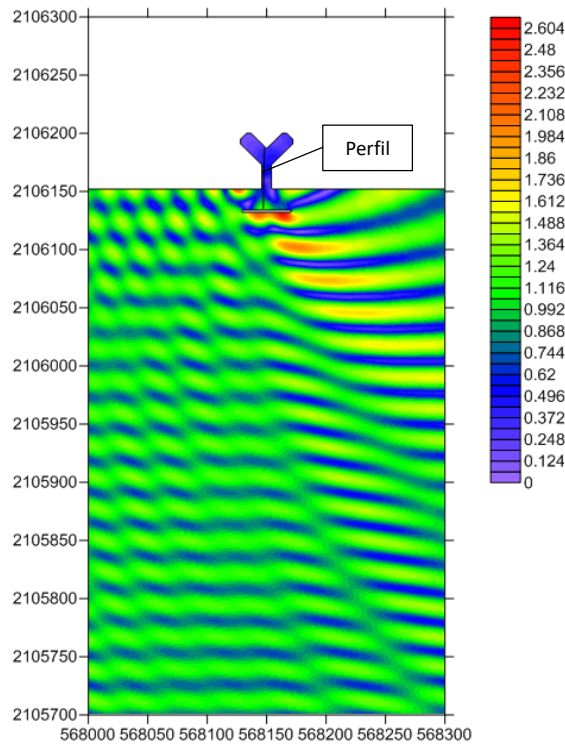


Figura 5. 126. Resultados AMP graficados en surfer

Este caso de igual manera se presenta la peor condición con el ángulo de incidencia de oleaje a 45° dónde se encuentra vulnerable el puerto. Podemos observar que a pesar que se incrementa la frecuencia de oleaje los valores disminuyeron casi por la mitad.

Analizando con detenimiento vemos que los coeficientes de propagación de oleaje dentro del puerto son menores de 1, la perturbación mayor se encuentra en parte interior del rompeolas y en las laderas de la entrada del canal principal del puerto, como mencionamos anterior mente esto puede ser peligroso por el rompeolas y porqué los barcos no podrían maniobrar estas condiciones fuertes de oleaje en una zona tan reducida y podría provocar una colisión.

En la imagen de la izquierda inferior se ve de mejor forma la deformación de la ola, el valor máximo del CP es de 1.24, en las laderas del acceso al puerto. El perfil permite ver la poca agitación dentro del puerto.

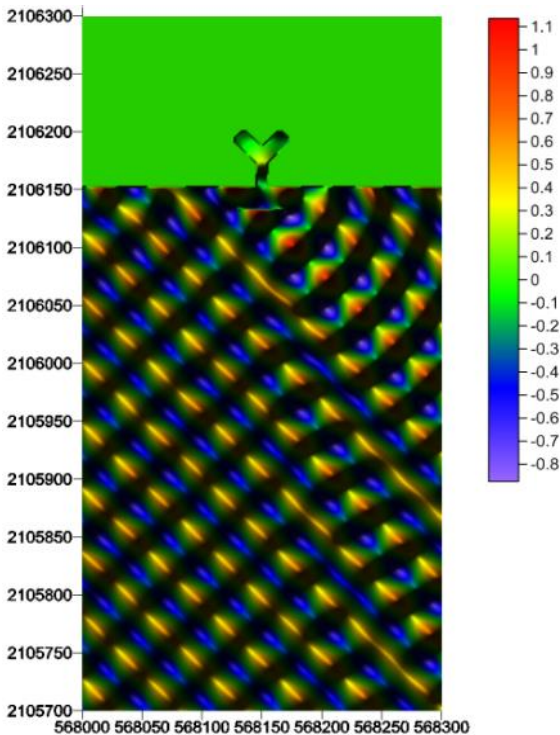


Figura 5. 127. Resultados SUP graficados en surfer

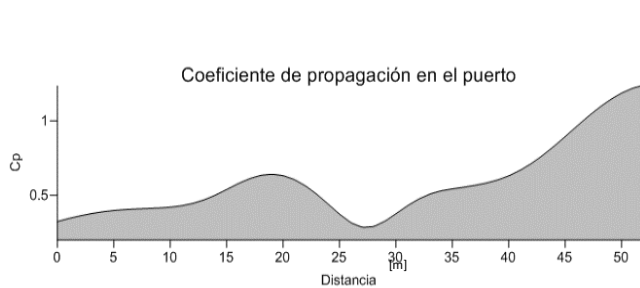


Figura 5. 128. Perfil de CP del canal de acceso

CASO 113 5S:

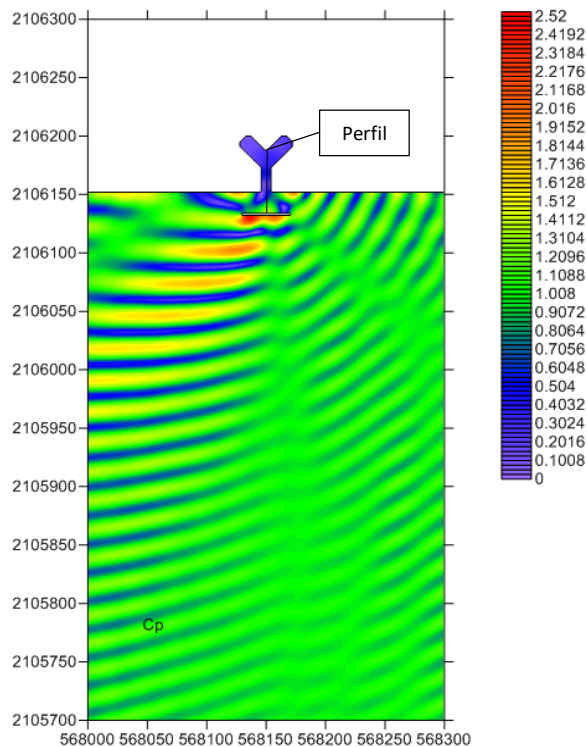


Figura 5. 129. Resultados AMP graficados en surfer

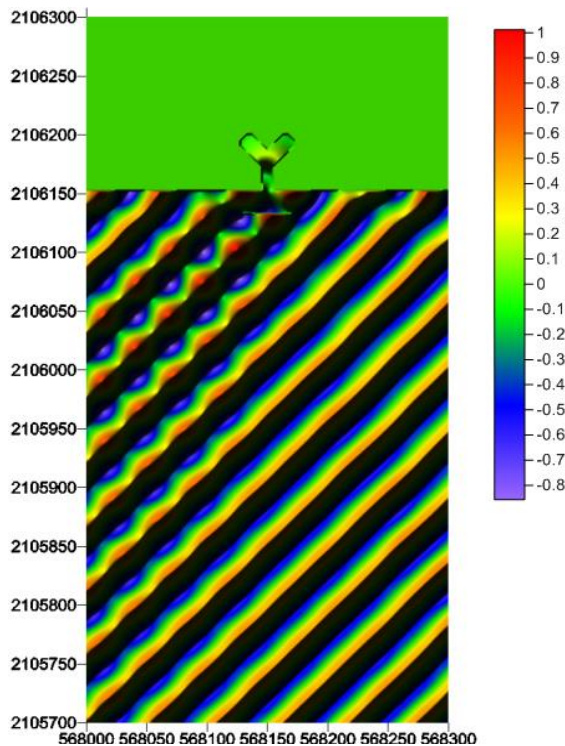


Figura 5. 131. Resultados SUP graficados en surfer

Para la modelación con el periodo de 5 [s] se obtuvo una variación entre los valores de coeficiente de propagación en los casos 112 y 113, que a pesar de tener simetría geométrica no se obtuvieron resultados iguales como en el caso del modelado con periodo de 8 [s], esto puede suceder por cambiar el periodo, la forma en que llega a romper la ola en el rompeolas pudiera causar este suceso. Si ponemos atención a la imagen de la izquierda comparándola con la misma del caso 112 observamos que no se refleja de la misma forma la ola de un lado y otro, en la de este caso existe mayor agitación en el interior del rompeolas en comparación a cuando la ola llega en dirección 45°sw, es importante recalcar como puede llegar a variar mínimamente los valores por incluso la forma en que rompe la ola.

Se observa en la imagen de abajo que la perturbación mayor se presenta en la parte interna del rompeolas con un valor de 1.386 de coeficiente de propagación.

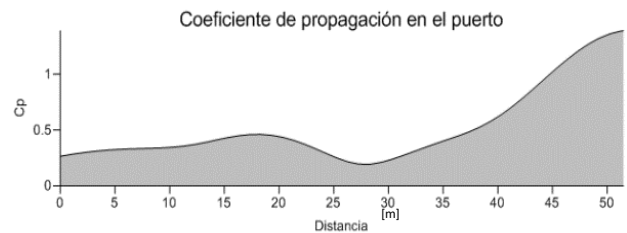


Figura 5. 130. Perfil de CP del canal de acceso

5.4.4 Sin Protección.

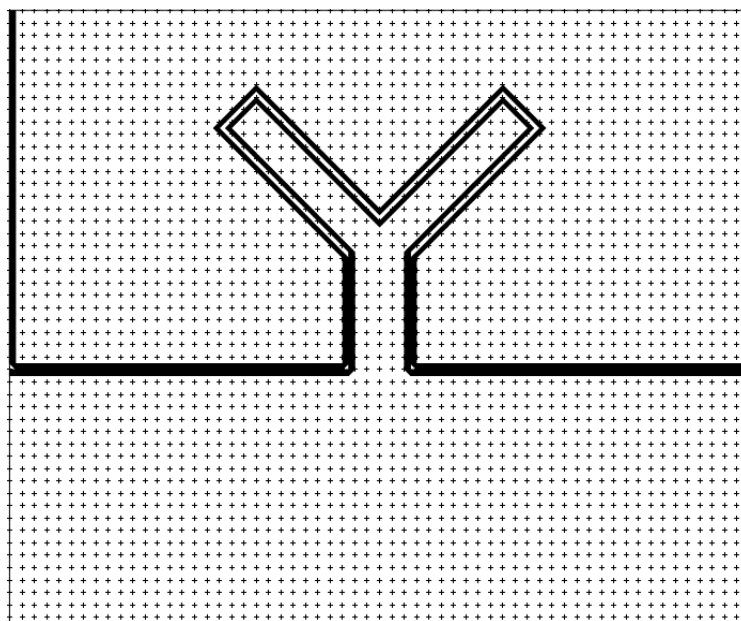


Figura 5. 132. Vista en planta, Puerto sin protección

Con fin de establecer un parámetro de comparación modelaremos todos los casos sin ninguna obra de abrigo, esto será un primer análisis rápido para saber cómo se comporta naturalmente la estructura ante la presencia de oleaje con diferentes ángulos de incidencia y variación de periodo. Estas condiciones iniciales nos ayudarán a descifrar la capacidad de eficiencia o ineficacia que tendría nuestra obra de abrigo propuesta para esas condiciones.

Tabla 16. Coeficientes de Propagación máximos obtenidos para los casos modelados

Caso	Geometría tipo	Forma de rompeolas	Angulo incidente de Oleaje [°]	Periodo [s]	Coeficiente de propagación máximo
Segunda simulación para periodo T = 5 [s]					
121	Forma "Y"	Sin protección	-22.5	5	2.231
122	Forma "Y"	Sin protección	-45	5	2.5
123	Forma "Y"	Sin protección	45	5	1.21
124	Forma "Y"	Sin protección	22.5	5	1.357
125	Forma "Y"	Sin protección	0	5	1.955
Segunda simulación para periodo T = 8 [s]					
146	Forma "Y"	Sin protección	-22.5	8	1.498
147	Forma "Y"	Sin protección	-45	8	1.479
148	Forma "Y"	Sin protección	45	8	1.479
149	Forma "Y"	Sin protección	22.5	8	1.498
150	Forma "Y"	Sin protección	0	8	1.504

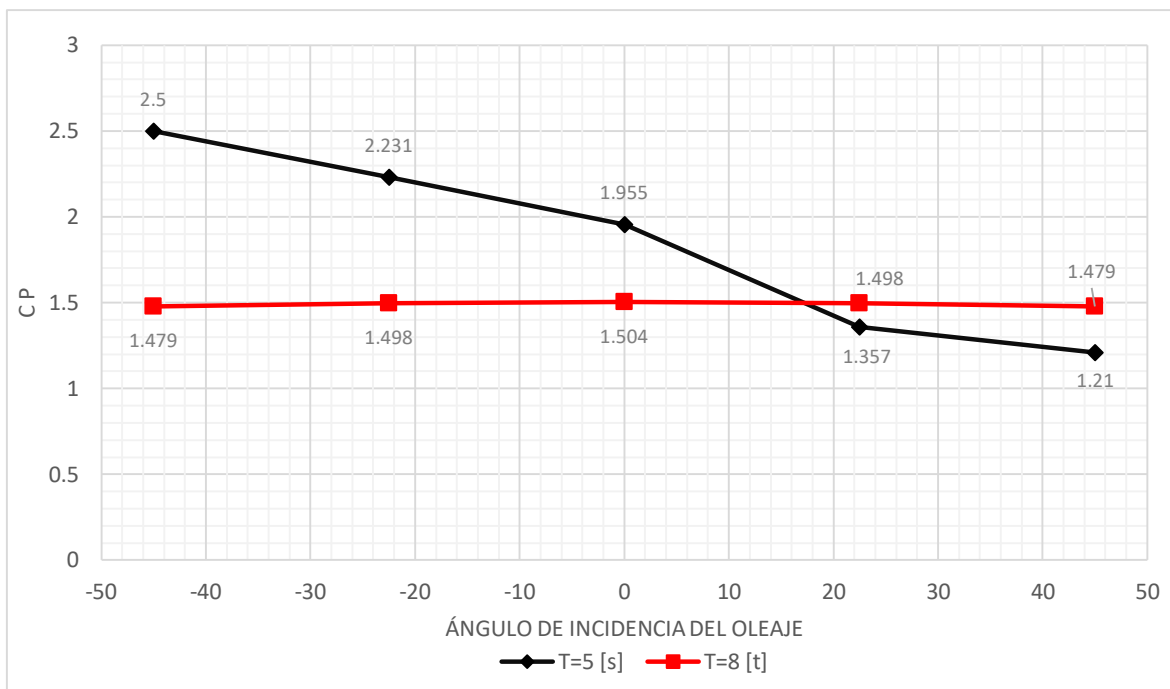


Figura 5. 133. Gráfica CP vs Ángulo incidente de oleaje

Como hemos observado a lo largo de los análisis revisados se están realizando modelados con 2 periodos, de 5 [s] y 8 [s], para ver de forma detallada la relación entre las geometrías básicas con diferentes formas de obras de abrigo, y su respuesta al someterlos a condiciones de oleaje variante. Esto nos ha arrojado resultados muy interesantes, que no se exentaban para esta geometría, basta con empezar a analizar la gráfica anterior de los coeficientes de propagación para los diferentes ángulos de incidencia de oleaje y periodos.

Para la gráfica con periodo de 5 [s] es muy variante ya que se esperaría una simetría en la gráfica, ya que al existir simetría geométrica los resultados para las direcciones de ambos lados podrían ser igual, pero eso no sucede, por el contrario, para un ángulo 45° suroeste se tiene el coeficiente de refracción más grande de 2.5 dentro del puerto para todas las cosas, en cambio el menor se presenta en su contra parte, es decir, en dirección 45° sureste con 1.21 esto lo analizaremos más adelante. Por el contrario, nuestra modelación para 8[s] si se tiene una gráfica con valores simétricos y no tan elevados como en los otros casos, aquí la mayor vulnerabilidad se presenta cuando el oleaje proviene franco sur rumbo al puerto.

A continuación, se presentan la representación gráfica de los resultados arrojados por el programa SURFER con el fin de mostrar de mejor manera la resonancia y zonas vulnerables ante dicho fenómeno. Se presenta un análisis rápido para proceder con la modelación que nos interesa con las diferentes obras de abrigo, en los casos que haya simetría en los resultados se presentará una sola gráfica por ambos casos.

CASO 146 8S:

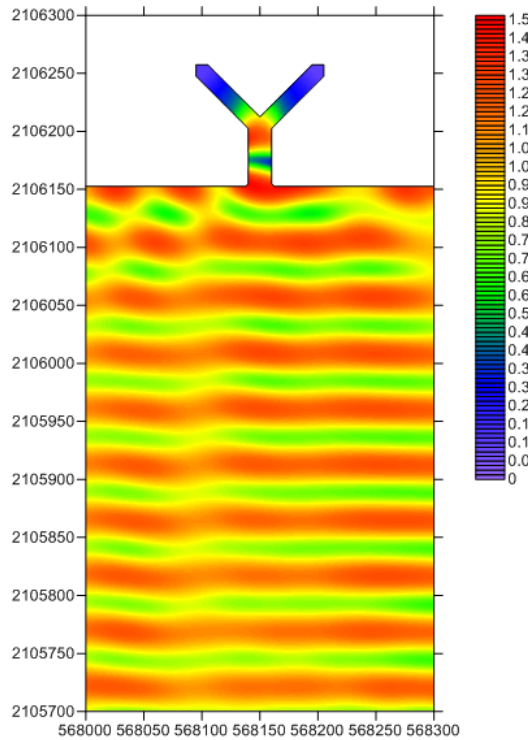


Figura 5. 135. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos

CASO 147 8S:

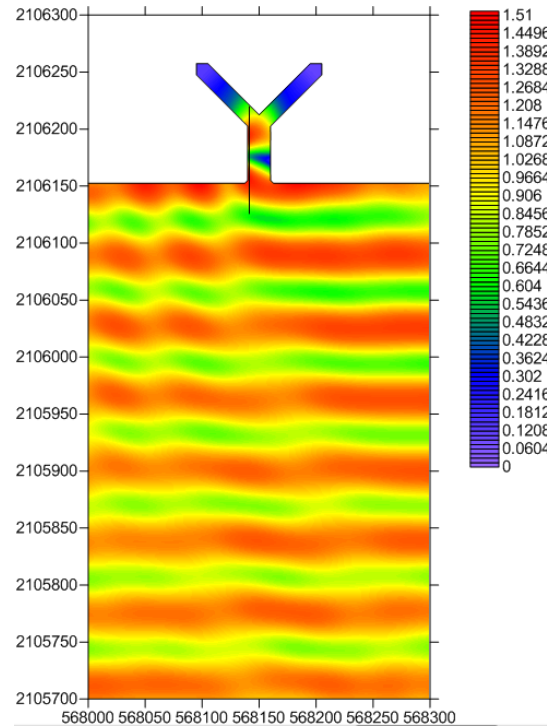


Figura 5. 134. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos

Podemos notar que para los casos 146 y 147 pareciera que el oleaje va horizontal, pero esto sucede por la refracción de la ola que toma la forma del horizonte del puerto, al llegar rompe y se observa cómo se deforma, pero es importante ver que la ola si entra con el ángulo de incidencia al puerto.

CASO 150 8S:

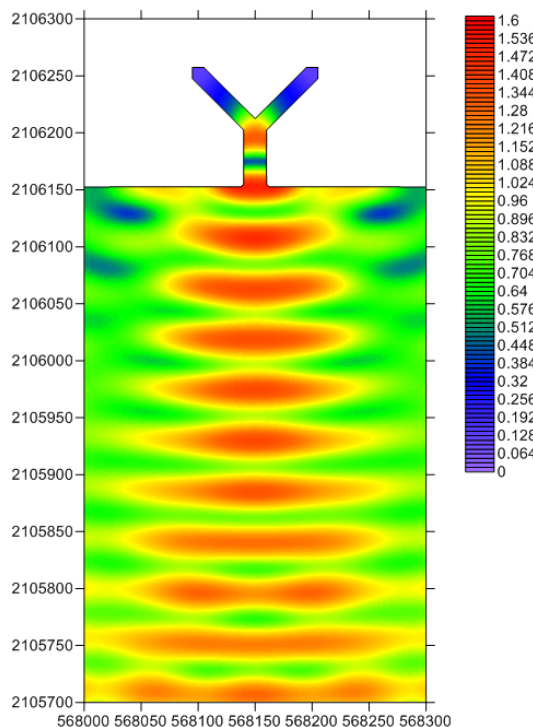


Figura 5. 137. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos

CASO 121 5S:

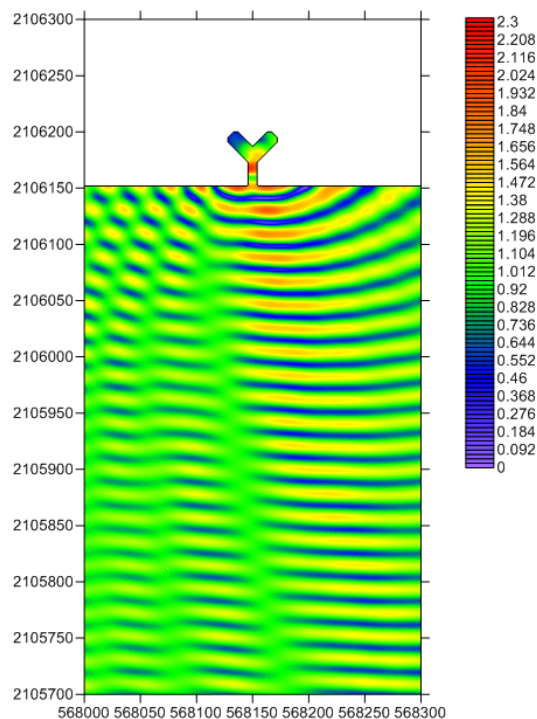


Figura 5. 136. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos

La condición más desfavorable se presenta para el caso 150 de acuerdo a lo visto en la gráfica anterior, se observa en las imágenes que los puntos dentro del puerto dónde se genera la perturbación es prácticamente igual en todos los casos a pesar del ángulo de incidencia diferente. Por su parte el caso 150 con el oleaje franco sur toda la reflexión se concentra al centro y hacia el acceso al puerto.

CASO 122 5S:

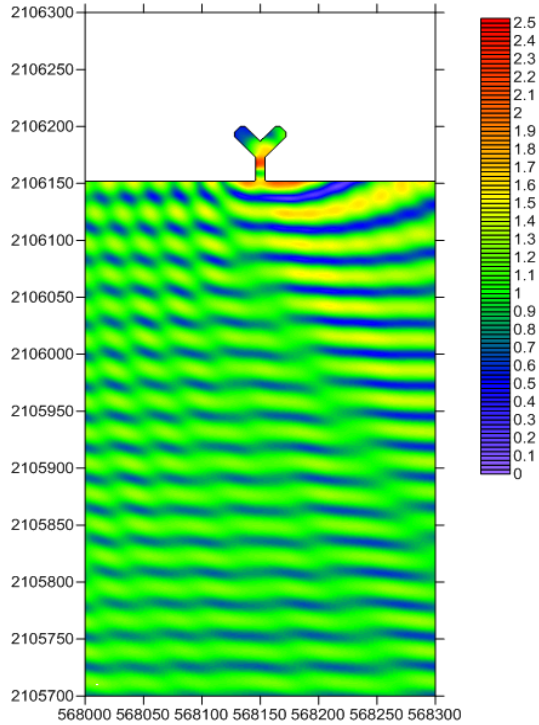


Figura 5. 138. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos

CASO 123 5S:

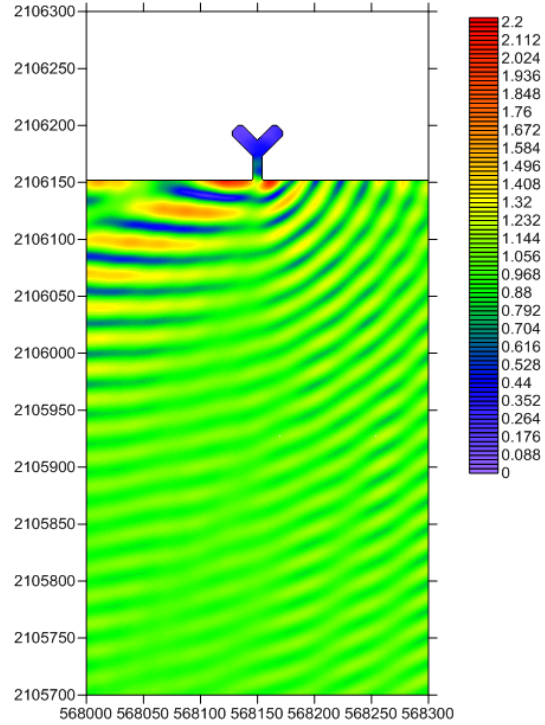


Figura 5. 139. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos

La frecuencia del oleaje respecto a los casos anteriores aumentó por la disminución del periodo, observamos que para los casos 121 y 122 la perturbación es muy similar, incluso el punto dónde se genera la resonancia dentro del puerto es la misma, para el caso 122 presenta el valor máximo de propagación de oleaje. Por el contrario del caso 123 sucede algo interesante, sorprendentemente existe penetración casi nula al puerto es interesante como con este periodo y ángulo de incidencia de oleaje no existe resonancia dentro del puerto, esto por la forma en que se refleja la onda. A pesar de no existir resonancia al interior del puerto, se propone protección para mantener las áreas exteriores en calma.

CASO 124 5S:

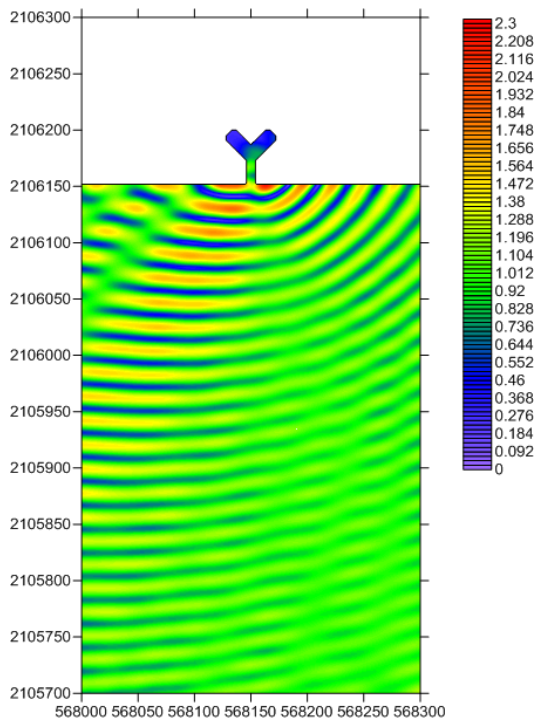


Figura 5. 141. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos

CASO 125 5S:

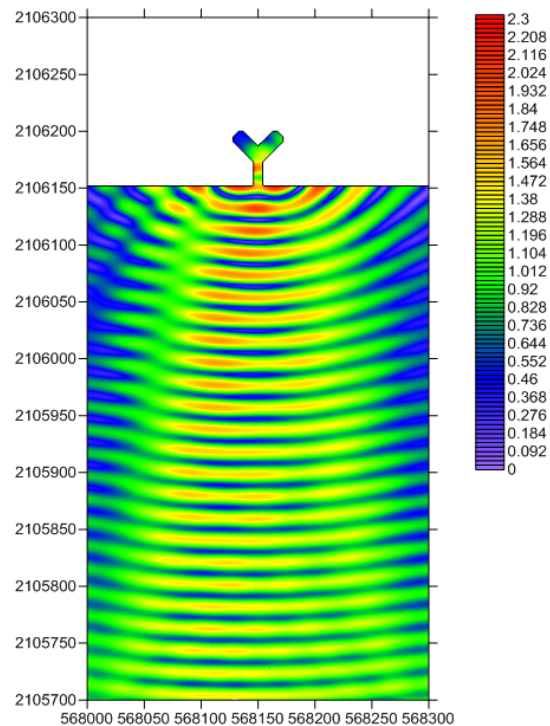


Figura 5. 140. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos

El caso 124 corresponde a un ángulo de incidencia de oleaje de 22.5° sureste generando resonancia dentro del puerto en el canal principal de conducción, pero la mayor agitación se genera en las inmediaciones de la boca del puerto, a diferencia de su contraparte el caso 121 la resonancia no es tan elevada dentro del puerto, se puede observar que en aquel caso se concentraba casi al final del canal principal y para este caso se genera al exterior la mayor perturbación. Para el caso 125 el oleaje entra en dirección franco sur, a pesar de dicha condición no es el caso más desfavorable, debido a la difracción que se tiene en la entrada al puerto, se genera mayor perturbación en las zonas exteriores que en las interiores, será necesario colocar alguna estructura que permita el tránsito al puerto ya que si vemos se generan abanicos de agitación alrededor de toda la bocana.

Es importante analizar estas condiciones iniciales ya comparándolas con los resultados obtenidos para los modelos con obras de abrigo, estableceremos recomendaciones generales que podrán ser consideradas para un pre-diseño cuando se tienen condiciones parecidas a las modeladas en este escrito.

Es importante resaltar que para este caso no se hizo una tabla comparativa como en los casos anteriores ya que por los resultados obtenidos no eran simétricos por lo cual se decidió abordar por separado y dar explicación de los resultados obtenidos.

CONCLUSIÓN

Como hemos visto en el análisis de los casos anteriores los resultados son muy variables dada la interacción del oleaje con las estructuras. Cada estructura de abrigo presenta condiciones ideales bajo las cuales no se genera resonancia, y se mostraron de forma detallada las condiciones bajo las cuales se genera el fenómeno dentro del puerto, el lugar dónde se registraron las mayores perturbaciones son en la entrada del puerto y al final dónde se encuentra la bifurcación de la forma "Y" que es dónde se encontraría la dársena de maniobra.

La estructura de abrigo más desfavorable corresponde a los rompeolas laterales todos los casos modelados presentan resonancia por lo cual no es nada eficiente para la condición de oleaje, la protección es nula y en algunos casos se incrementa el coeficiente de propagación en relación a las condiciones normal. Para los casos con periodo de 5 [s] la geometría más eficiente resulta ser la que tienen el rompeolas separado de la costa, obtenemos los coeficientes de fricción más bajos en forma general. Para los modelados con periodos de 8 [s] la geometría que mejor trabaja y es más eficiente disipando oleaje es con el rompeolas de Brazo a -45° presenta los coeficientes de propagación menores en comparación a las otras estructuras de abrigo.

La geometría más eficiente considerando ambos periodos es con el rompeolas separado de la costa, presentan en general los coeficientes menores de propagación dentro del puerto de hecho para esta condición la mayoría de los casos presentan la resonancia mayor en la parte interior del rompeolas, además las perturbaciones más grandes se generan con oleaje de periodo de 5 [s] bastante desfavorable para la geometría.

Es importante que se atiendan las recomendaciones mostradas anteriormente, se presentan modelaciones bajo las cuales el oleaje puede afectar gravemente el interior del puerto por lo cual se debe de tener una geometría adecuada que no permita un efecto resonante. El poner cuidado en dichas recomendaciones puedes ser una guía rápida para diseño de estructuras portuarias, dónde conociendo las condiciones de oleaje local se puede establecer una configuración rápida que asegure siempre la operatividad del puerto, siempre acompañado de un estudio a detalle para cada caso.

5.5 PUERTO DE VERACRUZ

La ciudad de Veracruz es el municipio más importante del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Tiene el puerto marítimo comercial más importante de México. Está ubicada a 90 [km] de distancia de la capital del estado Xalapa y a 400 [km] de distancia de la Ciudad de México. Su clima es tropical cálido, con una temperatura media anual de 25.3 °C y con una precipitación media anual de 1500 [mm].

Históricamente esta ciudad y puerto destaca por haber sido fundada por Hernán Cortés, encontrándose en la región por la que los españoles desembarcaron para emprender la conquista de Tenochtitlan. Además ha recibido el nombramiento de Cuatro veces heroica por decreto presidencial, a raíz de haber enfrentado cuatro distintas invasiones extranjeras.

Ubicación y Límites geográficos del puerto.

El Puerto se encuentra ubicado en la zona centro del estado, en la región conocida como Sotavento, en las coordenadas 19° 12' 02" N, longitud 096° 08' 15" W, a una altura de 10 [m] sobre el nivel del mar. Limita al norte con el municipio de La Antigua y el Golfo de México; al sur con los municipios de Medellín y Boca del Río; al este con el Golfo de México y al oeste con los municipios de Manlio Fabio Altamirano y Paso de Ovejas.

Los límites geográficos de Veracruz son:

Latitud: 19° 13' 04" Norte

Longitud: 096° 08' 00" Oeste

Latitud: 19° 06' 17" Norte

Longitud: 096° 05' 44" Oeste

El Puerto de Veracruz vivió la requisa de sus instalaciones el 1º de Junio de 1991 a través de la cual el Gobierno Federal tomó su administración y control para el correcto manejo de mercancías. El 1º de Agosto del mismo año las primeras empresas privadas de maniobras iniciaron la actividad portuaria, generando así el beneficio de la competencia y desarrollo de servicios.

Finalmente el 19 de Julio de 1993 el Congreso de la Unión del Gobierno Federal decretó a través del diario oficial de la Federación la Ley de Puertos que tiene por objeto regular terminales, marinas e instalaciones portuarias, su construcción, uso, aprovechamiento, explotación, operación y formas de administración, así como los servicios portuarios.

En el margen de la publicación de la Ley de Puertos, se creó la figura de las Administraciones Portuarias Integrales y el 1º de Febrero de 1994 la Administración Portuaria Integral de Veracruz, S.A. De C.V. (APIVER) inicia sus operaciones.

5.5.1 Historia antiguo Puerto de Veracruz.

Durante más de 300 años, el Puerto de Veracruz fue un centro impulsor de mercados que (por posición, más que por su tamaño) ejerció funciones de embarque y procesamiento, de centro de comunicación hacia el interior y exterior y sede de operaciones financieras: "garganta y paso" o "Llave del Reino", como lo llaman las fuentes coloniales.

En los casi 90 años que transcurren entre 1561 y 1650, la Veracruz absorbía el 90% del movimiento marítimo de la Nueva España, representaba del 40% al 43% del tráfico del monopolio de Sevilla y el 36% del movimiento global trasatlántico.

Entre 1717 y 1738, el movimiento mercantil de las flotas que arribaron a Veracruz totalizó 46,423 toneladas. De 1739 a 1750, España autoriza a varias naciones a cubrir la demanda creciente de mercancías a México (fierro, acero, municiones de plomo, papel, hilos, especias, jabón, aceite, etc.). En esta etapa, el 72.6% de los arribos correspondió a embarcaciones españolas, el 24.3% a francesas, el 1.8% a holandesas y 0.6% a embarcaciones Imperiales.

En esta etapa se vuelve notorio el efecto de la red inglesa (la Real Compañía de Inglaterra) en la estructura del libre comercio y la consecuente economía sólida y crecientemente autónoma con respecto a España y la Ciudad de México. Entre 1755 y 1778, el movimiento de carga alcanzó 83,000 toneladas. Después de 1784, anualmente se introdujeron por Veracruz entre 10 y 20 millones de mercancías europeas, que retornaban a España bajo su equivalente en plata, redistribuyéndose hacia las principales plazas europeas.

En cuanto al número de navíos, entre 1717 y 1812 el aumento fue considerable, pasando de 112 a 801 (con una media anual para los últimos 10 años, de 72 navíos). Adicionalmente, durante las últimas dos décadas del siglo XVIII se apreció un importante comercio intercolonial, en las que el 33.42% de las importaciones recibidas en Veracruz provenían de Maracaibo, el 25.76% de Tabasco, el 20.85% de La Guaira, el 13.71% de Campeche y el 3.54% de La Habana. Además, en esta etapa arribaban barcos provenientes de Nueva Orleans, Isla del Carmen, Caracas, Cartagena de Indias, Trinidad, Santo Domingo, Portobello y Puerto Rico.

A inicios del siglo XIX (entre 1796 y 1820), el comercio marítimo veracruzano representó transacciones por más de 537 millones de pesos. El total de tráfico entre México y España representó, para este período, el 71% del total del Atlántico (Domínguez Pérez, 1990).

El principio de la modernización del Puerto

Las vías del ferrocarril habían llegado en 1873. Dos años después aún se continuaban los trabajos de construcción de edificios para una terminal y del muelle del mexicano:

“El muelle del Ferrocarril Mexicano está situado al noroeste del antiguo y único que había en ese Puerto. El sistema de construcción es de pilotaje, siendo estos tubos de fierro fundido con el extremo en forma cónica, para facilitar su introducción; después de colocados se llenaron de mortero; sobre los pilotes descansan traveses de fierro de láminas y de celosía unidas entre sí por vientos o cruces de Sn. Andrés.

Esta estructuración tiene dos objetos: resistir el peso del ferrocarril, y unir entre sí las longitudinales y transversales; la extensión total del muelle, desde la muralla es de 213 [m]. La planta del muelle se compone de dos partes principales, la que comienza en la muralla y que lleva una sola línea, se subdivide en tres y en consecuencia es más ancha. Los rieles, agujas, cambios, zapos, etc. son de acero y perfectamente acabados. En la parte del abanico se han levantado 4 grúas hidráulicas de un sistema nuevo, para levantar dos toneladas de peso construidas por Armstrong, fabricante de Inglaterra. En la cabeza del muelle, se está armando actualmente una grúa del mismo sistema para levantar pesos de 20 ton.”

Lo anterior descrito es una muestra de inicio de las terminales intermodales que se empezaban a instalar en el último cuarto del siglo XIX. Consecuencia del crecimiento de las líneas ferroviarias, su conexión con el centro y las fronteras del país.

Hacia 1880 se continuó el tendido del ferrocarril dentro del puerto, por cuestiones de seguridad. Logrando mover así mercancía y materiales internamente en el puerto. Ya proyectado el ferrocarril hacia el norte del país comenzó la construcción de las líneas, además de aprobar nuevas obras. Para entonces también se autorizó el levantamiento de mejores instalaciones marítimas en los

principales puertos del comercio exterior: Veracruz, Tuxpan, Coatzacoalcos, Salina Cruz e Isla del Carmen.

En 1881 se aprobaron las obras portuarias en la rada de Veracruz y casi simultáneamente se autorizaron las reparaciones del muelle fiscal del Puerto de Tampico. Estos proyectos impulsaron a los veracruzanos a crear un Puerto que alcanzara los niveles de los del Mediterráneo, dado que la rada veracruzana recibía desde 1840 líneas permanentes de vapor de gran calado. Seguía siendo el Puerto más importante, tenía entradas y salidas de embarcaciones que realizaban el traslado de las mercancías de los principales centros del comercio internacional.

Los encargados de las obras portuarias debieron de considerar los avances de la técnica naviera, el tonelaje de los barcos y vapores que había aumentado considerablemente, así como su velocidad de desplazamiento y la apertura de nuevas líneas navieras. A las ya tradicionales con Europa y Estados Unidos se incorporaron las rutas del Caribe por el lado del Atlántico.

Se presentó un primer proyecto en julio de 1882, y las obras se iniciaron oficialmente el 10 de agosto del mismo año, cuando se colocó la primera piedra para la construcción del dique a un costado del arrecife de la Gallega.

En abril de 1883, la concesión fue otorgada a la compañía francesa Buette Caze and Co. El ingeniero encargado, Eduardo Thiers, realizó algunas modificaciones al primer proyecto de Eads. Un mes después, en mayo, se iniciaron las obras complementarias a los trabajos de construcción del Puerto: el tendido de vías del ferrocarril para realizar el transporte de materiales; la construcción de un muelle de mampostería y hormigón; muros paralelos a la carnicería; talleres de reparación, construcción de casas para operarios y contraamaestres; canales y diques de desviación; así como la demolición de la antigua muralla.

Afrontaron violentas marejadas, que en varias ocasiones destruyeron buena parte de los avances del Dique del Norte en el arrecife de la Gallega. Mejor suerte acompañó a la empresa del ferrocarril Mexicano, en 1883 solicitaron permiso para construir un muelle más para desembarcar carbón de piedra, debido al gran éxito de su muelle metálico y la gran demanda que no daba abasto.



Figura 5. 2. 1. Imágenes del Puerto de Veracruz de incios del Siglo XIX

El restablecimiento de las relaciones diplomáticas entre México y Gran Bretaña en 1884, la restauración del crédito mexicano en la Bolsa de Londres y la renegociación de la famosa “deuda inglesa” en 1886 fueron factores claves para la llegada de Pearson a México.

A pesar de la importancia de los múltiples proyectos internacionales de Pearson, no cabe duda de que el catalizador para la expansión de su imperio empresarial fue la serie de contratos que el gobierno de Porfirio Díaz otorgó a S. Pearson & Sons entre 1889 y 1905 para obras públicas importantes y de gran envergadura (entre los que destacan las obras portuarias de Veracruz, Salina Cruz y Coatzacoalcos). Para el gobierno mexicano estas obras representaron componentes clave en el desarrollo de una infraestructura económica.

En 1895 a la Compañía Pearson & Sons obtuvo el contrato para continuar los trabajos en el Puerto. Aprobado el proyecto de dicha compañía inglesa, las obras se reanudaron con gran rapidez. A partir de ese momento Veracruz se convirtió en un centro de atracción de mano de obra. Los hombres que realizaron la obra negra de la construcción del Puerto manipularon centenares de toneladas de

pedra provenientes de los bancos de Peñuela, y se sirvieron de la maquinaria inglesa que les ayudó a levantar la estructura portuaria por espacio de siete años.



Figura 5. 2. 2. Puerto de Veracruz a mediados del siglo pasado

La presentación orgullosa de un moderno Puerto artificial que para 1902 contaría con una rada de treinta y tres pies, que en dos años más permitiría la entrada sin riesgos de los buques de altura. Cuatrocientos metros se le habían ganado al mar y sobre ellas se había comenzado el levantamiento de las oficinas generales de Aduana, del edificio de Correo y Telégrafo, así como la estación sanitaria.

Los resultados más evidentes de la modernización del Puerto de Veracruz fueron: los cambios en su fisonomía y de igual ir ascendencia el aumento de su población. El tendido de las vías férreas y las obras portuarias provocaron la apertura de un importante mercado de trabajo.

Aún hoy día se conservan y sirven las obras emprendidas desde el último tercio del siglo XIX hasta la primera década del siglo XX. Las actuales remodelaciones y ampliaciones de la zona marítima y de la terminal ferroviaria siguen buscando mantener a Veracruz como un Puerto eficaz en el comercio ultramarino y nacional, respetándose en mucho los diseños visionarios de los liberales de aquella época y sus constructores.



Figura 5. 2. 3. Puerto de Veracruz a través del tiempo

Es así que podemos ubicar las actividades portuarias de Veracruz como de gran importancia histórica para las actividades comerciales no solo de la región sino de la República Mexicana.

5.5.2 Situación actual del puerto

5.5.2.1 Desarrollo portuario

La capacidad de servicio del Puerto de Veracruz fue diseñada hace más de 100 años y a la fecha sigue operando, pero con ciertas limitaciones que impiden que se puedan atender eficientemente las nuevas embarcaciones que hoy en día ya navegan en todo el mundo.

En este sentido, fue necesario desarrollar como medidas de optimización la reconfiguración de la línea de atraque del Puerto de Veracruz, lo cual permitió incrementar la capacidad de servicio de 19.5 a 39.6 millones de toneladas anuales en promedio.



Figura 5. 2. 4. Distribución actual del Puerto de Veracruz
revisión de sus mercancías a través de equipos de Rayos Gamma, Rayos X y control de accesos y cámaras de circuito cerrado.

El Puerto de Veracruz es conocido como La Puerta de México al Mundo, ya que ha sido el más importante del país desde sus inicios en la época colonial hasta la época actual, durante 250 años fue el único Puerto por el cual podían entrar y salir mercancías de América Continental hacia Europa. Actualmente se planea la expansión del Recinto Portuario y se espera que de 19.5 millones de toneladas que tiene de capacidad en la actualidad pase a 118 millones, y de 19 posiciones de atraque a 48.

Cuenta con una infraestructura de servicios moderna que lo ubican como líder nacional en el movimiento de gránulos agrícolas, automóviles y contenedores en el Golfo de México; su aduana es la primera de México por el valor de sus mercancías y la segunda por el volumen total de carga, pero además es la única en el país con

5.5.2.2 Sector comercial



Figura 5. 2. 5. Terminal de contenedores

El Municipio de Veracruz pertenece a la región económica Sotavento. Sus ingresos principalmente provienen del comercio, puesto que es un puerto comercial. Otras actividades comunes son la industria automotriz y la siderúrgica. Otras actividades comunes son la industria automotriz, la siderúrgica y la pesca. El 2.01% de la población municipal se dedica al sector primario, el 24% al sector secundario y el 67% al sector terciario.

5.5.2.3 Sector turístico

El Puerto cuenta con un Club de Yates donde se organizan los torneos más importantes de pesca (sábalo) deportiva del estado y en un futuro contará con una marina, la cual ya está en construcción.

La marina dará la oportunidad de recibir cruceros turísticos y así ampliar la derrama económica hacia los sectores que integran esta área. Veracruz es considerado un destino de historia y cultura con atractivos adicionales como son sus playas; la ciudad cuenta con 118 hoteles locales y 53 en la zona conurbada con un total de 9,637 habitaciones, de las cuales 1,121 corresponden a la categoría de cinco estrellas y más de 300 empresas de servicios turísticos, este sector genera más de 35,000 empleos directos y 55,000 empleos indirectos.

5.5.2.4 Problemática de la situación actual del Puerto de Veracruz

Como hemos visto en los apartados anteriores el Puerto de Veracruz representa un gran poderío comercial y económico para la República Mexicana, favorecido por su intercambio comercial tanto nacional como internacional, por su historia, infraestructura y gran capacidad de operación. Aunado al crecimiento del transporte marítimo como transporte comercial, han propiciado su inevitable crecimiento.

Estos aspectos han generado una problemática sin solución para el Puerto de Veracruz, ya que al ser un Puerto que data de hace muchos años la capacidad tanto operativa como de infraestructura están viéndose rebasadas a mediano plazo, lo cual es preocupante porque limita el crecimiento económico de la región y del sector portuario. Ante ello se ha optado por una ampliación que traerá mejores condiciones para enfrentar los retos actuales y futuros de demanda que se le exigen a un Puerto como Veracruz, por lo cual a continuación presentaremos la problemática que se enfrenta apoyándonos de la información pública presentada por la APIVER.

Las tasas de crecimiento que se tienen pronosticadas para el Puerto de Veracruz en el mediano y largo plazo, hacen necesaria la construcción de la primera etapa de la Ampliación Natural del Puerto de Veracruz en la Zona Norte, proyecto que resultó factible desde el punto de vista técnico, económico, legal y ambiental de entre los 5 sitios que fueron analizados; esta primera etapa considera la habilitación de un rompeolas poniente de aproximadamente 4,325 [m] de longitud, dragando 17.8 millones de [m³], a 16 [m] y 17 [m] de profundidad en diversas zonas. Con este material se habilitará 95 [ha] para construir 4 posiciones de atraque de 360 [m] de longitud cada una.

El tipo de clima, es cálido-húmedo con una temperatura mayor a 18°C. La temperatura media anual es de 25.23°C, con régimen de lluvias en verano donde ocurre la canícula (época de calor), con poca oscilación térmica. La velocidad de los vientos con mayor dominio es de los vientos del norte más de 15.55 nudos, del noreste entre 7.77 y 15.55 nudos, del este de 3.88 a 15.55 nudos y del noroeste de 7.77 a más de 15.55 nudos.

Las playas al norte de Veracruz (Punta Gorda) se caracterizan por estar constituidas por arena fina a muy fina, una pendiente suave, una berma extensa (sitio donde cambia la pendiente situada en lo alto de la playa que señala la línea de pleamar normal, donde se acumulan los materiales transportados por el agua) y la zona de rompiente se presenta a mayor distancia de la costa; la berma de estas playas cambia en época de nortes observándose una ligera erosión, el resto de esta zona es estable siempre.

Existen dos corrientes importantes en la zona: la “Corriente Principal”, determinada por la dirección del viento la cual generalmente se desplaza hacia el noroeste con una velocidad de 0.19 [m/s] (0.37 nudos) con vientos del sureste y con vientos del norte su dirección cambia hacia el sureste. La otra corriente es llamada de la “Bocana del Puerto”, la cual no presenta relación directa con la dirección del viento pero varía en proporción a su magnitud. Los factores que influyen en la dirección y velocidad de las corrientes son la línea de costa y el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), así como la dirección y velocidad del viento.

En el litoral del estado de Veracruz, el tipo de mareas es diurno o mixto, su amplitud fluctúa entre 0.5 y 0.7 [m] y se debe principalmente a la interacción entre la onda mareal y la topografía dominante de cada lugar, así como a las fases lunares-solares.

Las tablas numéricas de predicción de mareas de la SEMAR, nos indican que los meses en que se registran las pleamares máximas son octubre y noviembre (de 0.71 a 0.75 [m]), y las bajamares mínimas en junio y julio (de 0.56 a 0.63 [m]), para Veracruz y Antón Lizardo. Entre los meses de Octubre a Mayo, la altura de las olas se ve influenciada por la intensidad del viento debido de los eventos de “norte” en el Pacífico Sur, presentándose olas mayores a 2.5 [m] hasta alcanzar alturas de 5.0 [m].

El recinto portuario se encuentra dividido en diversas áreas en donde alberga cesionarias que operan terminales de usos múltiples y especializadas en el manejo de contenedores, gráneles agrícolas y minerales; asimismo, ofrece una gran variedad de servicios comerciales, aduanales y de transporte.

La infraestructura de atraque destinada a la atención de las embarcaciones comerciales en el puerto ha sido un factor fundamental para lograr los niveles de servicio registrados y su posición actual en el ámbito nacional.



Figura 5. 2. 6. Mapa de instalaciones del Puerto de Veracruz

Respecto a la zona de muelles y áreas de agua del puerto, se tiene la siguiente infraestructura:

- 6 Muelles en espigón que son el muelle fiscal No. 1, 2, 4, 5, 6 y 8.
- 4 muelles marginales que son el muelle 7 sur y este, muelle de cementos y dos posiciones en el muelle de contenedores (ICAVE)).

Tabla 17. Tabla de muelles, antiguo Puerto de Veracruz

NOMBRE	Long. (m)	Calado oficial*	Prof. Futura (m)	Ocupación 2007 en %	Operador
Muelle fiscal No.1	221.2	31' (9.5 m)	12	46	Uso público
Muelle fiscal No.2	202.8	31' (9.5 m)	12	59	Uso público
Muelle fiscal No.4 sur	380	34' (10.4m)	14	**	Uso público
Muelle fiscal No.4 norte	315	31' (9.5 m)	14	57	Uso público
Muelle fiscal No.5	260	33' (10 m)	14	56	Granel agrícola
Muelle fiscal No.6	260	30' (9.1 m)	14	78	Uso público
Muelle fiscal No.7 sur	243.7	37' (11.3 m)	14	56	Uso público
Muelle fiscal No.7 este	250	36' (11 m)	14	56	Uso público
Muelle de cementos	200	31' (9.5 m)	12	33	Cementos Veracruz
Muelle espigón No.8	200	38' (11.6 m)	14	55	Granos
Muelle de contenedores	507.6	42' (12.8 m)	14	52	ICAVE



Figura 5. 2. 7. Geometría interna del Puerto

Como se puede observar en la Figura 5.2.7. y en los datos proporcionados los niveles de calado y espacios ya sufrieron una ampliación y llegaron a sus límites por lo cual es conveniente hacer una restructuración, a continuación, se presentan los crecimientos de oferta y demanda que presenta el puerto.

5.5.2.5 Análisis de oferta

El Puerto de Veracruz, mantiene un alto índice de crecimiento en el movimiento de mercancías, tal como se indica en la Figura 5.2.8. que muestra el movimiento histórico de carga.

El comercio del Puerto de Veracruz, está enfocado a atender las cargas provenientes del exterior principalmente de Estados Unidos, así como de algunos países latinoamericanos, tal como se indica en la siguiente figura.

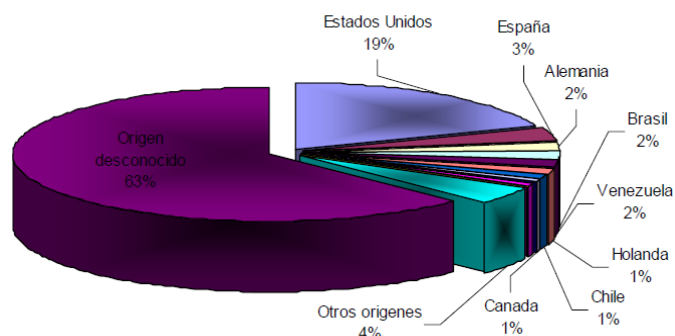


Figura 5. 2. 8. Distribución de origen de mercancía que llega al Puerto de Veracruz

La participación de algunos países es muy importante en el flujo de carga de importación, destacando principalmente Estados Unidos con cerca del 20% del total de importaciones que se realizan por el Puerto de Veracruz.

De la totalidad de la carga de importación, los destinos principales son los siguientes estados del país:

Tabla 18. Destinos principales de mercancía de importación.

Estado	Toneladas
Distrito Federal	3,738,020
Veracruz	1,309,470
Jalisco	921,326
Estado de México	854,897
Puebla	835,957
Nuevo Leon	97,138

De la totalidad de esta carga de importación se tiene que aproximadamente el 57% de la mercancía llega a su destino final utilizando el ferrocarril, mientras que el 43% restante utiliza el autotransporte.

En el caso de la mercancía de exportación que utiliza el Puerto de Veracruz, los estados que tienen participación en el comercio exterior son principalmente Distrito Federal, Veracruz, Estado de México, Nuevo León, Puebla, Oaxaca y Morelos.

Teniendo como destino principal países como Estados Unidos, España y algunos países latinoamericanos.

5.5.2.6 Análisis de demanda

El pronóstico para las operaciones de carga de la misma Administración Portuaria, señala que para el año 2018 se alcanzaría al menos un movimiento anual de 38 millones de toneladas, lo cual duplicaría el tonelaje actual.

Tabla 19. Porcentajes de demanda de movimiento de carga

Los pronósticos de movimiento portuario (demanda), indican que para los próximos años se requerirá atender un crecimiento de carga del 7.11% para el periodo 2008-2010, del 5.64% para el lapso 2010-2025 y de 2.27% para 2025-2058.

De acuerdo a estimaciones de APIVER, se espera que en el año 2058 se alcance un movimiento de 21.7 millones de toneladas en carga, que es 20.5% superior a lo obtenido en el 2007.

Segmento	TCMA por periodo			
	2008-2010	2011-2025	2026-2058	2008-2058
Carga General	6.89%	5.10%	2.39%	2.64%
Granel Agrícola	4.92%	1.94%	1.15%	1.57%
Granel Mineral	9.45%	3.41%	1.54%	2.45%
Fluidos	4.42%	1.90%	1.74%	1.91%
Contenedores	8.35%	8.52%	2.67%	4.65%
Automóviles	8.22%	4.28%	1.43%	2.60%
Total	7.11%	5.64%	2.27%	3.41%

Respecto al arribo de buques y conforme a un análisis tendencial realizado por APIVER, se prevé recibir en el año 2008 un total de 1,600 embarcaciones; es decir, un 1.07 % más que el cierre del 2007.

Las expectativas de crecimiento del manejo de carga en el Puerto de Veracruz presentan tasas de crecimiento media anual de acuerdo al comportamiento histórico registrado en el Puerto, con base en ello se realizaron dichos pronósticos de crecimiento, tomando en cuenta los diversos planes y programas que tiene contemplada la Administración Portuaria Integral de Veracruz, así como las diversas obras que tienen como principal fin el mejoramiento de los servicios del Puerto y una mayor captación de volúmenes de tráfico internacional.

Las expectativas de crecimiento de carga se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 20. Crecimiento de carga respecto a la demanda estimada.

TIPO DE CARGA	2008	2009	2010	2015	2020	2025	2030
Carga General	2,857,291	3,076,767	3,264,654	4,279,970	5,467,831	6,913,478	6,128,256
Granel Agrícola	6,603,189	6,954,582	7,268,704	8,637,721	9,332,751	9,868,253	10,449,693
Granel Mineral	3,239,083	3,509,411	3,880,091	4,618,853	5,408,793	6,429,964	7,707,250
Fluidos	1,018,503	1,066,003	1,110,571	1,273,583	1,390,080	1,490,174	1,604,614
Carga Contenerizada	8,032,293	8,712,623	9,429,035	14,394,778	21,548,622	32,180,106	46,974,191
Automoviles	1,008,073	1,098,800	1,180,593	1,490,219	1,833,560	2,221,930	2,699,393
Total	21,750,359	23,319,386	24,953,055	33,204,905	43,148,077	56,881,975	72,864,004

TIPO DE CARGA	2035	2040	2045	2050	2055	2058
Carga General	7,660,921	8,932,775	9,901,029	10,467,817	10,511,833	10,513,935
Granel Agrícola	11,071,850	11,737,850	12,451,077	13,215,204	14,034,211	14,378,136
Granel Mineral	8,874,630	9,683,524	10,298,921	10,696,215	10,835,952	10,857,635
Fluidos	1,735,368	1,886,091	2,061,531	2,267,933	2,513,577	2,625,187
Carga Contenerizada	66,159,760	75,565,471	77,627,463	78,031,748	78,070,772	78,086,387
Automoviles	3,091,623	3,340,393	3,517,725	3,617,311	3,639,790	3,644,159
Total	95,502,529	107,805,711	112,340,021	114,678,917	115,966,345	116,461,280

Un muelle muestra signos de saturación cuando tiene una ocupación cercana al 65%, para determinado tipo de carga, como son los graneles y autos, mientras que para carga general es del 70% y para la carga contenerizada la saturación se presenta en un porcentaje del 50%. Por tanto si un muelle está ocupado el 65% del tiempo disponible de operación, provocará tiempos de espera a otras embarcaciones, peor aún, si el tiempo de ocupación del muelle está cercano al 80% los tiempos de espera se incrementarán, teniendo como consecuencia un deterioro en la calidad del servicio que ofrece el Puerto y un sobre costo de operación para las mercancías que se manejen por el Puerto de Veracruz.

- Falta de capacidad instalada del puerto que permita atender la demanda de carga, contenerizada principalmente, esperada en el corto y mediano plazo (5 a 10 años).
- Falta de espacios dentro del actual recinto portuario para construir nuevas posiciones de atraque.
- Limitada profundidad en muelles de carga general y dificultades técnicas para su dragado.
- Dársena de ciaboga limitada para recibir embarcaciones de gran porte (superiores a 300 [m] de eslora).
- Edificaciones consideradas como monumentos históricos al interior del puerto que obstaculizan las operaciones en los muelles y que no es posible demolerlas o reubicarlas.
- Falta de espacio para desarrollo de los cesionarios para ofertar un mejor servicio.
- Altos costos de operación por fondeo de buques.

5.5.3 Nuevo Puerto de Veracruz



El perfil de ambos puntos sugiere que en el futuro se debería atender a:

- Servicios logísticos de alto valor agregado a base del uso de contenedores, incluyendo terminales multimodales. El concepto que se pretende desarrollar, considera dos unidades de producción. La primera se integra a cada una de las futuras terminales de contenedores y comprende el muelle especializado, el patio de almacenamiento, bodega de consolidación y/o desconsolidación y patio propio para armado de trenes con salida a la troncal. Separado de estas unidades de producción, en el área de reserva portuaria se prevé disponer de unidades para servicios varios de valor agregado con un patio de operación multimodal.
- Espacio para terminales especializadas para recepción y manejo de materias primas como son graneles agrícolas, minerales, fluidos diversos no petroleros y otros, con zonas adyacentes o cercanas para procesos de transformación.
- Zonas para terminales de industrias de exportación como la de automóviles y para el servicio de factorías ya establecidas en la región. En cuanto a la industria regional, se considera importante lograr una adecuada integración con el parque industrial Bruno Pagliai.
- Accesos terrestres para transportes carretero y ferroviario sin conflictos con los destinados a otros fines, especialmente los urbanos.

La capacidad de los barcos porta-contenedores ha incrementado conforme al desarrollo tecnológico y la demanda de los mercados; en este proceso y de acuerdo a sus dimensiones, las embarcaciones se han clasificado en generaciones.

Tabla 21. Dimensiones de las generaciones de barcos existentes

Generación		1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a
Tipo de Embarcación	Barge	Feeder (1956-70)	Standard (1970-80)	Panamax Class (1980-88)	Post Panamax (1988-2000)	Post Panamax Plus (2000-05)	New Panamax (2006)	Ultra Large Container Vessels (2012)	Triple-E (2013)
Eslora [Largo] (m)	80-120	131-200	215-225	250-290	275-305	300-345	366-398	396-398	400
Manga [Ancho] (m)	10 - 15	17 - 21	20 - 29	32	32 - 40	41 - 43	49	54 - 56	59
Calado [Profundidad] (ft)	< 24	< 30	30 - 37	36 - 40	36 - 44	43 - 47	50 - 52.5	50 - 52.5	50 - 54
No. de Filas aprox.	2-6	8	10	13	16	17	20	22	23
Sección Transversal									
Capacidad: TEU's	100	500 800	1,000 2,500	3,000 4,000	4,000 5,000	5,000 8,000	11,000 14,500	16,020	18,270

El Puerto de Veracruz siempre atendió con muchas restricciones al estar diseñado para un buque Post-Panamax Class, el nuevo Puerto de Veracruz estará diseñado para buques Post-Panamax Plus de 5ª generación, con una eslora de 324 [m] y 42.5 [m] de manga: como el Maeva, Charleston y Lucy (MSC), el naviero de carga más común.

Se hicieron modelaciones con el departamento de Costas y Puerto del Instituto de Ingeniero de la UNAM, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y diversas instituciones especializadas en obras marítimas, acordes con la magnitud del proyecto. Resultando ser *Bahía de Vergara*, la opción más conveniente y con menos desventajas.



Figura 5. 2. 10. Propuesta del Nuevo Puerto de Veracruz, en la bahía de vergara

El Proyecto de Ampliación del Puerto está fuera de la Poligonal del Área Natural Protegida. Desde 2001, la Administración Portuaria Integral de Veracruz estudió a fondo las ventajas y desventajas de las opciones de ubicación de la ampliación del Puerto.

La Manifestación de Impacto Ambiental en su modalidad Regional (MIA-R) se ingresó a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través de la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental (DGIRA), emitió Resolutivo Favorable el día 13 de noviembre del 2013.

La MIA-R se basa en más de 87 estudios especializados realizados durante más de 10 años en el sitio del proyecto y zonas de influencia. Se incluyeron estudios relacionados con:

- Hidrodinámica.
- Geotecnia.
- Transporte de Sedimentos.
- Calidad del Agua.
- Corrientes Marinas.
- Corrientes Eólicas.
- Oleaje.
- Modelación Hidráulica.
- Flora y Fauna Marinas.
- Condiciones Hidrometeorológicas.
- Caracterización del Granulado de arena marina.

APIVER firmó Convenio con la Universidad Veracruzana, para que ésta sea su Acreditado Ambiental Autónomo cuyo objetivo será:

- Evaluar ambientalmente la ejecución y operación del Proyecto.
- Supervisar el Programa de Monitoreo y Seguimiento Ambiental, verificando el cumplimiento de sus acciones.
- Informar al Comité Técnico anualmente lo que se ha realizado.
- Se crearán 350,000 [m²] (35 ha.) de Arrecifes Artificiales.
- Se sembrarán 88,300 [m²] (8.83 ha.) de Pastos Marinos.
- Se rescatarán y reubicarán los Corales Formadores de arrecifes que se pudieran encontrar en la zona de influencia directa del Proyecto.
- Se establecerá un Centro de Monitoreo que medirá la vitalidad real de los organismos rescatados durante los cinco años siguientes a su reubicación, con una periodicidad mensual el primer año y semestral a partir del segundo.
- Se instalará un Sistema de Monitoreo en Tiempo Real con Instrumentos que enviarán mediciones vía satélite, acerca de las condiciones ambientales en el área de influencia directa.
- Se colocarán Mallas Geo Textiles fijas y móviles como barreras anti dispersantes de sólidos para proteger de sedimentos a las comunidades coralinas vecinas.
- Disminución radical de la presión ambiental que actualmente ejerce el Puerto. Cuando el nuevo Puerto ya operé, habrá mínima espera en la zona de fondeo dentro del área natural protegida.
- Se colocarán Boyas delimitadoras de canales navegables para evitar encallamientos.
- Los residuos generados por corte y soldadura submarina se recolectarán y se les dará el tratamiento establecido por la normatividad en la materia.
- Las actividades de extracción y vertimiento de material se harán en condiciones meteorológicas adecuadas según lo indique capitanía de Puerto, previniendo la posible dispersión de sedimentos fuera del área de trabajo o que representen algún riesgo de descontrol.
- Todos los Residuos se manejarán conforme lo establecen las Normas Oficiales Mexicanas: los peligrosos, los de manejo especial y los no peligrosos.
- Los aceites gastados se almacenarán en barriles de 200 [l] con etiqueta de Residuo Peligroso para su destino y tratamiento final adecuado.
- El mantenimiento preventivo de la maquinaria se hará a más de 100 [m] de cualquier cauce y en sitios sin riesgo de inundación.
- Uso de Biocombustible condicionado a todos los contratistas desde la Licitación.

Es importante la consideración del estudio de los impactos ambientales, ya que son medios que se alteran fácilmente pero que tantas cientos de años en formarse por tal motivo el Puerto de Veracruz buscar mantener una operación y construcción sustentable.

Esta obra como se ha mencionado buscar satisfacer los incrementos de demanda, por tal motivo a continuación se presenta las características que tendrá el nuevo Puerto:

Tabla 22. Inversión para la construcción y empleos generados

Periodo	2014 - 2030	
Importe del Proyecto:	\$ 70,000 mdp	
	Inversión Privada	\$ 42,000 mdp (60%)
	Inversión Pública	\$ 28,000 mdp (40%)
La Ampliación del Puerto generará:	Empleos	140,000
	Directos	40,000
	Indirectos	100,000

Tabla 23. Datos generales entre el puerto existente, ampliación y totales

Puerto	Posiciones de Atrake	Profundidad o Calado Final (m)	Capacidad Teórica de Movimiento de Carga (Millones de Toneladas)	Hectáreas de Agua	Hectáreas de Tierra
Existente	18	12 / 14	23	237	367
Ampliación	35	18	95	446	448
Total	53	12 / 18	118	683	815

La ampliación del Nuevo Puerto de Veracruz implica un aumento del 50% de la capacidad actual del puerto, como se puede ver en la Tabla 24. La incorporación de esta capacidad no será total en un inicio ya que la construcción se realizará en dos etapas, una que establecerá cerca del 60% de instalación esperada, con 2 terminales principales (A y B) además de una terminal para gráneles, se estima su realización para el 2019. La segunda etapa de ampliación incluirá nuevas zonas terminales y más puntos de atraque, así como una segunda zona de abrigo para proteger del oleaje las obras de segunda etapa, estima su terminación para 2030.



Figura 5. 2. 11. Arreglo del Puerto en primera etapa



Figura 5. 2. 12. Arreglo del puerto en segunda etapa

5.5.4 Caso de estudio

La configuración de la ampliación del Puerto de Veracruz tiene una forma muy peculiar, ya que la bocana del puerto se encuentra libre y orientada hacia el norte, lo cual podría ser preocupante debido a que en esta región se presentan los fenómenos meteorológicos de tormenta llamados “Norte” que traen olas de altura importante del norte en dirección casi perpendicular a la bocana del puerto. De acuerdo con las configuraciones estudiadas en el capítulo anterior, no es recomendable esa forma de canal de acceso por la agitación que se puede producir en su interior.

El análisis que se presenta a continuación, es con fines académicos y es claro que necesitaría un análisis más detallado para corroborar la información.

5.5.4.1 Condiciones locales

5.5.4.1.1 Protección Natural.

La ampliación del Puerto de Veracruz se encuentra en una bahía, aun así, en el área no existen buenas protecciones naturales que se pudieran aprovechar. De acuerdo con los estudios realizados esta región se presentan condiciones tranquilas y tiene una pequeña protección natural del lado izquierdo del puerto de donde parte el rompeolas que actualmente se construye. Aquí será más importante una adecuada geometría externa para la protección del Puerto.

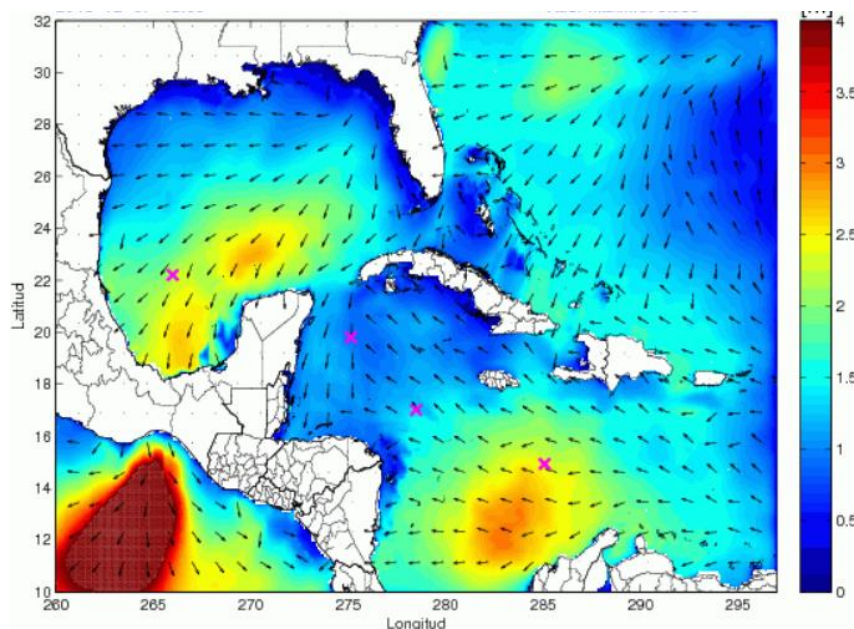


Figura 5. 2. 13. Direcciones del viento predominantes en Golfo y Caribe

5.5.4.2 Casos de estudio a modelar

Hemos descrito en los apartados anteriores como ha sido el desarrollado del puerto a lo largo del tiempo, su situación actual y las condiciones oceanográficas, climáticas y geográficas de la costa de Veracruz. Se ha presentado la descripción del proyecto de ampliación, la geometría definitiva y su ubicación, partiendo de dichas condiciones y los propósitos de estudio de esta tesis analizaremos la geometría del nuevo puerto de Veracruz bajo diferentes condiciones de oleaje, realizando el modelado con el programa WAPO, para determinar si llega a presentarse resonancia y estudiar si su geometría está correctamente diseñada.

Para poder realizar un análisis adecuado se utilizarán combinaciones de oleaje que tienen más probabilidad de ocurrencia, estableciendo 2 casos cuando el puerto opere con condiciones normales más comunes y 2 casos extraordinarios cuando exista efectos de tormenta, con los datos de mayor probabilidad. Para ello se utilizó el atlas de clima marítimo elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM con información de 43 años. A partir de ello se obtuvieron las condiciones más probables de ocurrencia de alturas, periodos y direcciones del oleaje y se construyeron los casos para la modelación numérica. A continuación, se presentan dichos casos:

- Oleaje en Condiciones Normales

Las condiciones encontradas de oleaje normal obtenidas a partir del Atlas de Clima Marítimo fueron las siguientes:

Tabla 24. Tabla de datos con los casos para condiciones normales de oleaje

Caso	Periodo [s]	Altura de Ola [m]	Dirección del Oleaje
1	6	0.4	45°Sur
2	3.8	0.4	45°Sur

- Oleaje de Tormenta

Las condiciones extremas de tormenta fueron:

Tabla 25. Tabla de datos con los casos para condiciones de oleaje de tormenta

Caso	Periodo [s]	Altura de Ola [m]	Dirección del Oleaje
3	11	6	-22.6°Sur
4	12	8	0°Sur

5.5.4.3 Batimetría

Como se mencionó en el Capítulo 4, el programa WAPO_V4 requiere de una malla batimétrica de la zona en estudio en la cual se proyecta la batimetría de todo el fondo marino en el sitio de interés y la geometría del puerto que se proyectará, como vemos en la Figura 5.2.15 se dibuja la zona de tierra con la geometría del rompeolas el puerto, marcadas por el color café y los puntos menores a cero que sería la parte de agua con color azul, a más profundidad el color se oscurece.

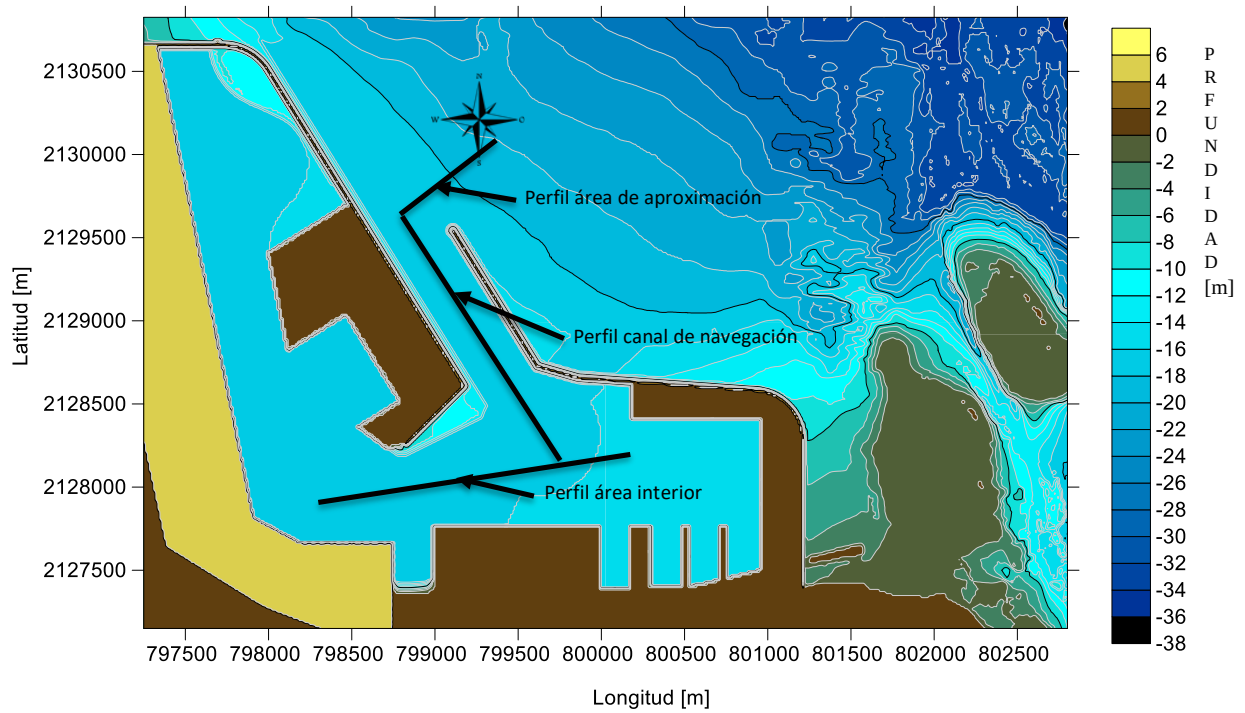


Figura 5. 2. 14. Batimetría del Proyecto Nuevo Puerto de Veracruz

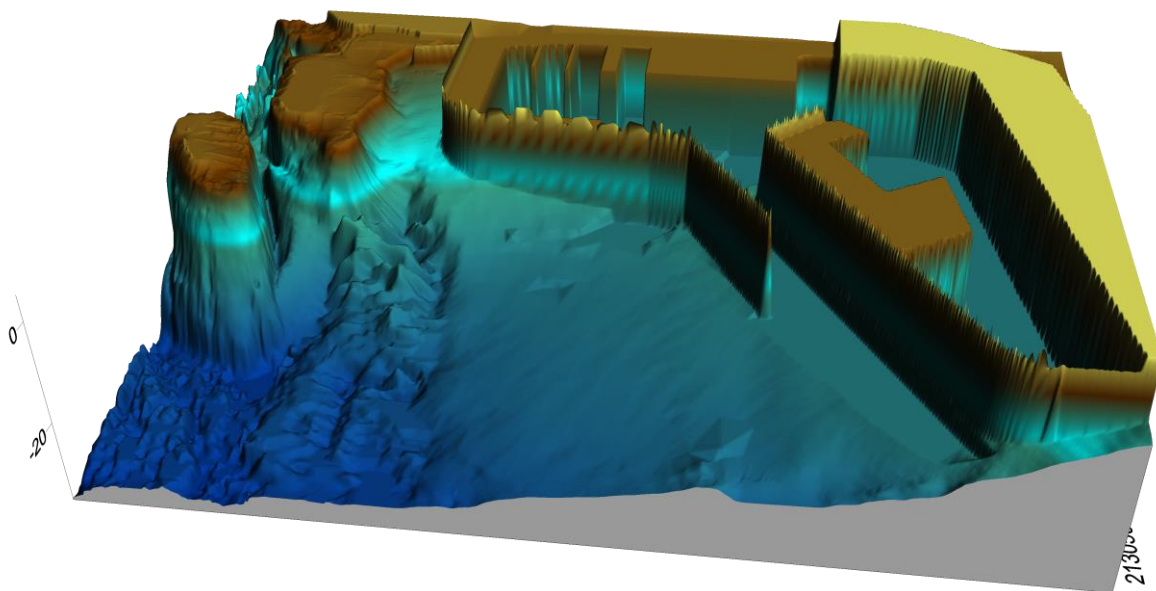


Figura 5. 2. 15. Vista en 3D de batimetría del Nuevo Puerto de Veracruz

5.5.4.4 Análisis de los casos de estudio

Se tienen las condiciones de oleaje y batimetría con la que se realizará el análisis, realizando el análisis numérico en el programa WAPO, con los archivos de datos para cada uno de los 4 casos a modelar. Será interesante analizar los resultados que se obtendrán ya que es un proyecto que actualmente se encuentra en construcción y encontrar algún dato interesante nos pondría a pensar sobre un posible mal diseño o cálculo.

Al realizar una revisión de los casos analizados en el capítulo 5.1 con el fin de proponer una primera especulación sobre los resultados. Las condiciones más desfavorables se podrían presentar con las condiciones de tormenta en dirección norte, altura y periodo ola se suponen bajo esta misma condición de tormenta, ya que en el Golfo de México se presentan condiciones de oleaje estable con alturas no mayores a 0.6[m] a lo largo del año. La posición de las estructuras de abrigo supone una vulnerabilidad para el canal de acceso, que con un periodo y altura de ola adecuada podría llegar a generar resonancia dentro de las instalaciones.

Los resultados del análisis para cada caso se presentan a continuación, mostrando el archivo de datos y una representación gráfica por medio del programa SURFER de los resultados obtenidos por el programa WAPO, en que se podrá ver la propagación de oleaje en las diferentes zonas y revisar la existencia o no de resonancia. En caso de que se presente resonancia se mostrará el análisis de superficie libre de agua para mostrar de mejor manera el fenómeno.

CASO 1:

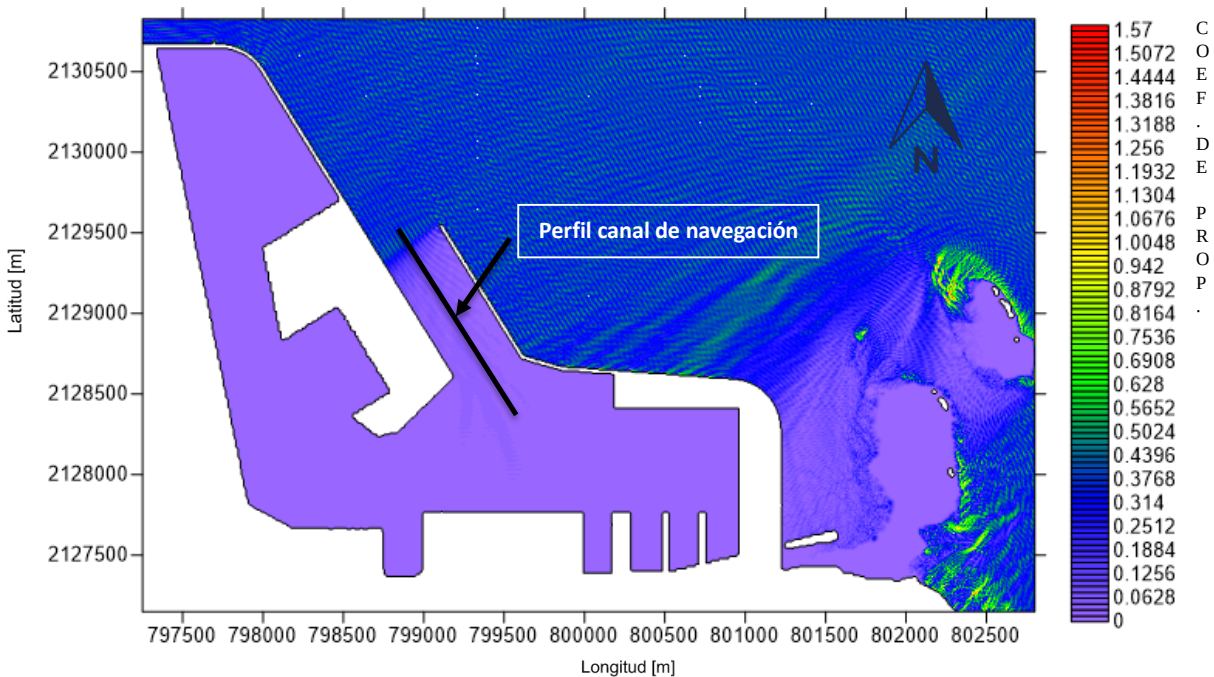


Figura 5. 2. 16. Modelación de coeficientes de propagación de oleaje

Este primer análisis se realizó con condiciones normales de oleaje para una dirección 45°E se observa claramente como entra el oleaje del lado este, podemos observar que los coeficientes de propagación de acuerdo a la imagen, en las inmediaciones del puerto no es mayor a 0.356 mientras que en su interior es de tan solo 0.0628 en sus valores más altos, la configuración de rompeolas funciona correctamente lo que es satisfactorio ya que son las condiciones con las que operará la mayor parte del tiempo.

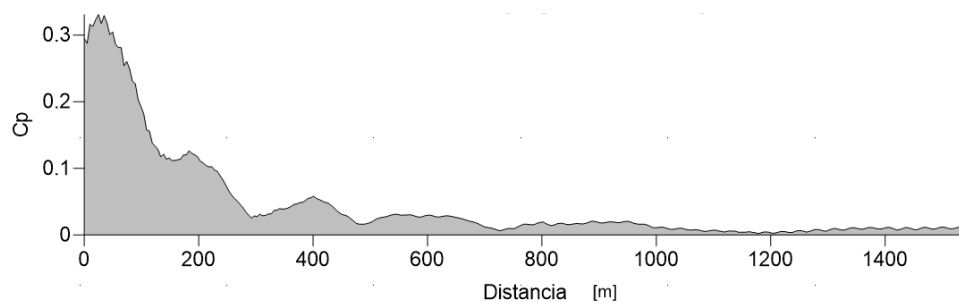


Figura 5. 2. 17. Perfil de CP en el canal de acceso

Se llega a observar en el canal de acceso al puerto que existe una ligera perturbación de oleaje entrante no presenta ningún riesgo, pero como comentamos anteriormente podría llegar a ser vulnerable con un norte. El rompeolas de brazo exterior se encuentra bien orientado disipando totalmente el oleaje, como se vio en los casos de puerto tipo.

CASO 2:

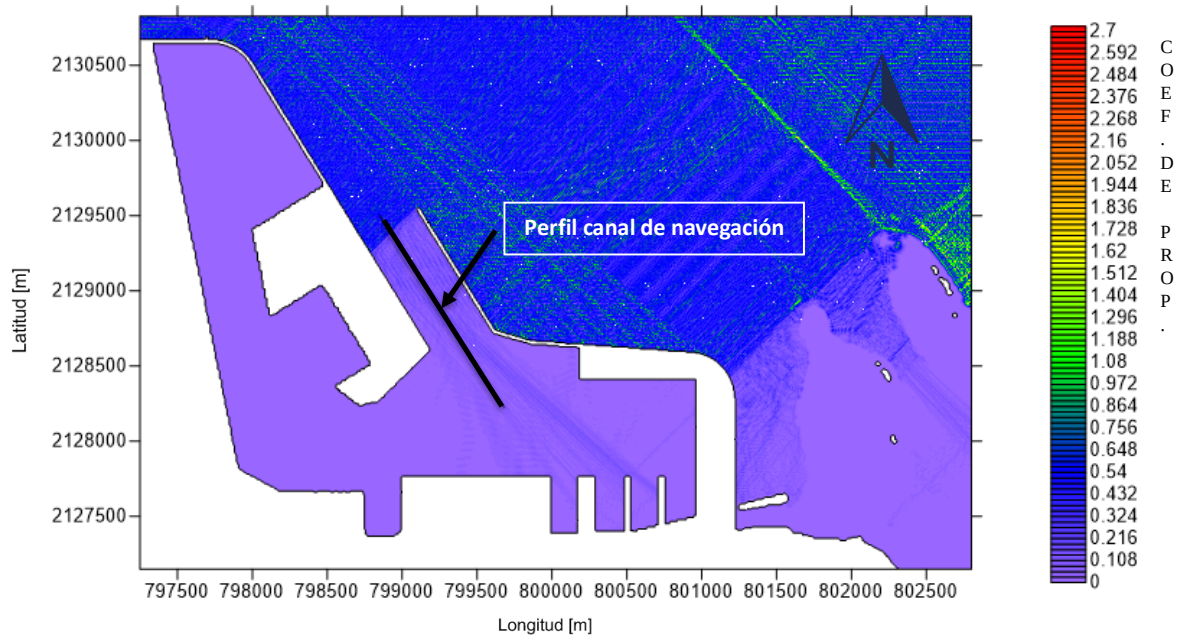


Figura 5. 2. 18. Modelación de coeficientes de propagación de oleaje

Segundo caso modelado con condiciones normales, misma dirección de oleaje y periodo casi del 50% menor, en la Figura 5.2.18. no es posible apreciar las líneas suavizadas como el caso anterior esto se debe a la disminución del periodo que aumenta la frecuencia de nuestro oleaje al refractarse al acercarse a tierra genera una mayor perturbación y deformación que no nos permite ver de forma clara el tren de olas.

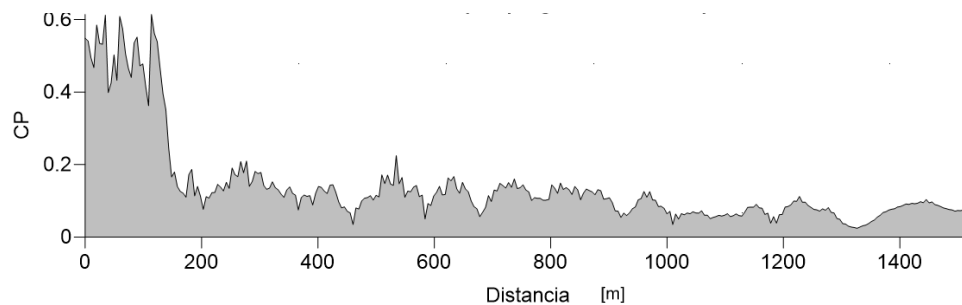


Figura 5. 2. 19. Perfil de CP en el canal de acceso

Los coeficientes de propagación aumentaron cerca de un 50% en las inmediaciones del puerto tenemos valores de 0.642 y 0.1284 dentro del puerto, ambos mantienen valores menores a 1 que nos garantiza que no se presente resonancia. Se observa de nueva cuenta oleaje que llega a filtrarse por el canal de acceso, que no genera ningún daño, pero vemos que es vulnerable, además que se propaga como se observa en la Figura 5.2.19 habrá que poner cuidado a esto en los siguientes casos, pero en general para condiciones normales el puerto funciona correctamente.

CASO 3:

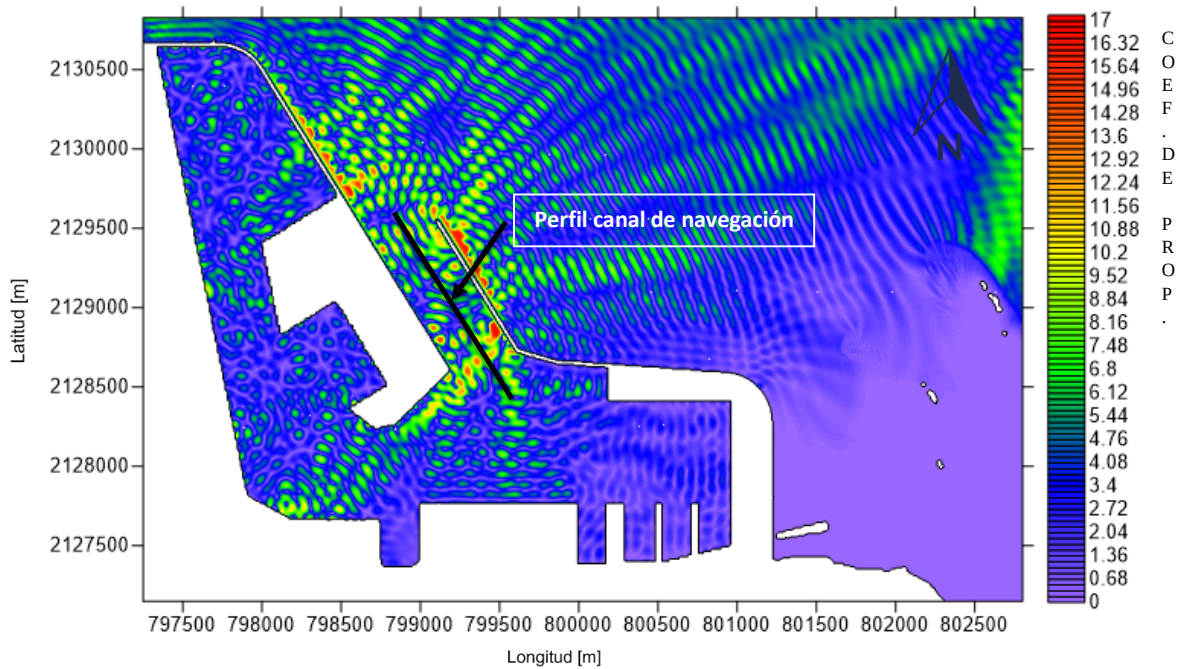


Figura 5. 20. Modelado de coeficientes de propagación de oleaje

Este tercer caso presenta afectaciones importantes que ponen en riesgo la operatividad del puerto, como hemos ido mencionando a lo largo de este subcapítulo se observaba algo de filtración de oleaje por el canal principal sin presentar valores de propagación mayores de 1 que generaran perturbaciones para la navegación, para este caso observamos que esa filtración ha sido importante generando resonancia con altos valores de propagación de oleaje como se observa en la Figura 5.2.20. respecto a la escala de color.

Este es el primer caso modelado con condiciones de oleaje de tormenta, es importante recalcar que para los casos modelados se usaron los datos con mayor probabilidad de ocurrencia, esto conlleva a un análisis realista sobre las condiciones a las que estará expuesto lo que da mayor confiabilidad en los resultados, ya que esta condición tiene alta probabilidad de presentarse. Tiene una dirección de oleaje de 22.5°NE vemos se propaga el oleaje en esta dirección, en las inmediaciones de los rompeolas rompe y difracta pero dicha ola deformada empieza a ser armónica con el tren de ola que llega, esto nos puede indicar que el periodo del puerto es similar al de la ola generando que se empiece a generar resonancia tanto en las inmediaciones del puerto como en la parte interior, la ola llega a entrar por el canal principal rebotando en sus paredes e interior amplificándose la ola generando dicho fenómeno vemos coeficientes muy altos lo que es preocupante, de acuerdo a lo establecido al manual de diseño portuario de la SCT rebasa los niveles admisibles para operación dentro del puerto, por ende al presentarse esta condición sería obligatorio parar actividades además se tendría que tener cuidado por lo alta agitación podría generar un daño estructural al puerto u obras de abrigo.

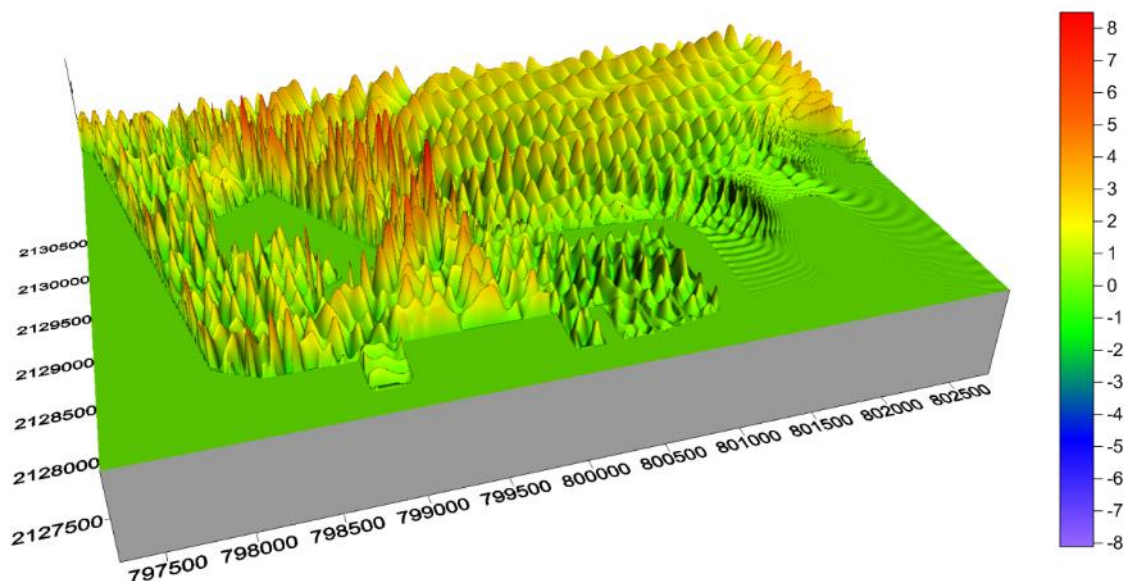


Figura 5. 2. 21. Niveles de Superficie Libre del agua

En la Figura 5.2.21. se observa de mejor la resonancia que se genera dentro del puerto bajo estas condiciones de oleaje. A comparación de los otros casos se observa que los niveles de superficie libre alcanzan niveles de 8 [m] a causa de la resonancia que se presenta en el canal de acceso principalmente, de acuerdo a lo analizado en todos los casos anteriores podríamos atribuirlo al periodo, ya pesar de que el oleaje no es franco norte llega con un ángulo que permite el fácil acceso por la bocana del puerto. Si recordamos la teoría explicábamos que una ola con un periodo parecido al periodo natural del puerto es peligrosa, ya que, al momento de romper por tener periodos similares, puede llegar a encontrarse con otra ola incidente generando amplificación, este proceso se vuelve cíclico a lo largo de la geometría del puerto provocando resonancia. Esto podría explicar los valores altos de resonancia que se presentan en el interior de 14.26, muy preocupante.

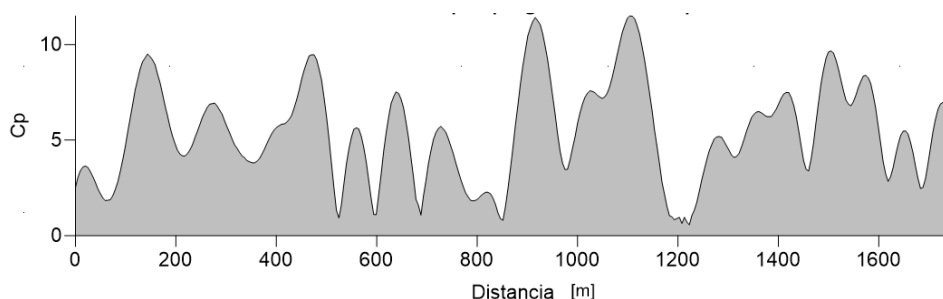


Figura 5. 2. 22. Perfil de CP en el canal de acceso

Debido a la importancia del puerto y el hecho que se encuentra en construcción se recomendaría un análisis detallado considerando estas condiciones que son muy probables a presentarse. Los resultados expuestos se dejan como recomendación y consulta sobre una futura problemática de operación que pudiera presentar el puerto, la orientación de los rompeolas se pensaría como la principal problemática, una reorientación como el invertirlos podría funcionar por las direcciones de oleaje, de igual manera se requeriría un análisis para conocer su comportamiento.

CASO 4:

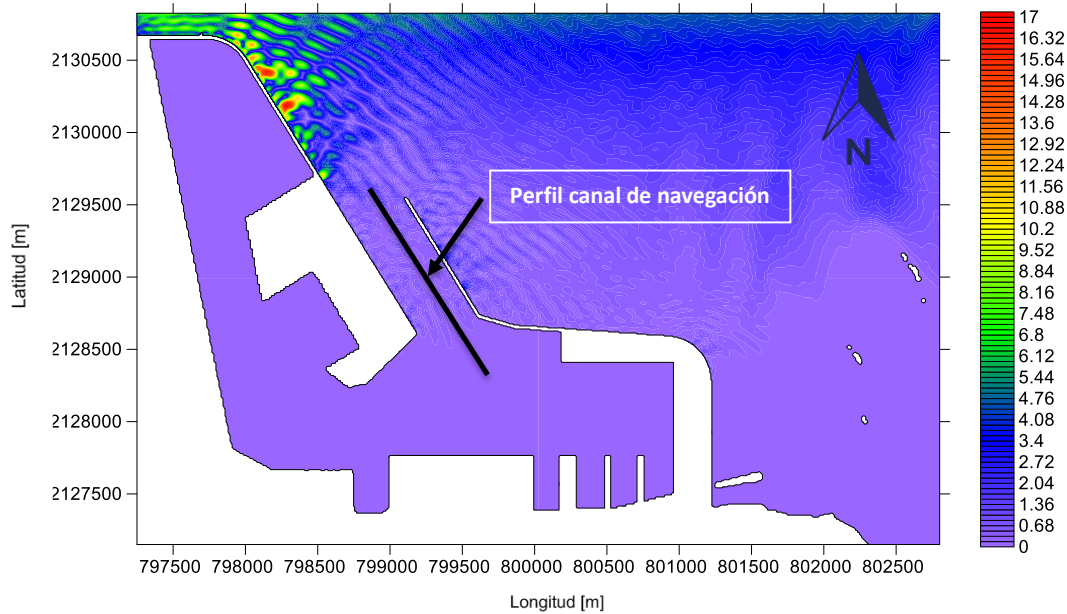


Figura 5. 2. 23. Modelación Coeficiente de Propagación de oleaje

Este siguiente caso de igual manera se modeló con oleaje de tormenta, pero con una dirección franco norte, la más frecuente cuando se tiene temporadas de huracanes. Se esquematizan los resultados en la imagen 5.2.23 mostrando que no se generan fenómenos resonantes para esta condición, se pensaría al ver el caso anterior que la resonancia se presentaría en igual o mayor forma, pero no sucede así los coeficientes de propagación dentro del puerto apenas alcanzan los 0.68 y un 1.36 en algunas partes de la bocana pero que están dentro de los valores de operación permitidos por SCT.

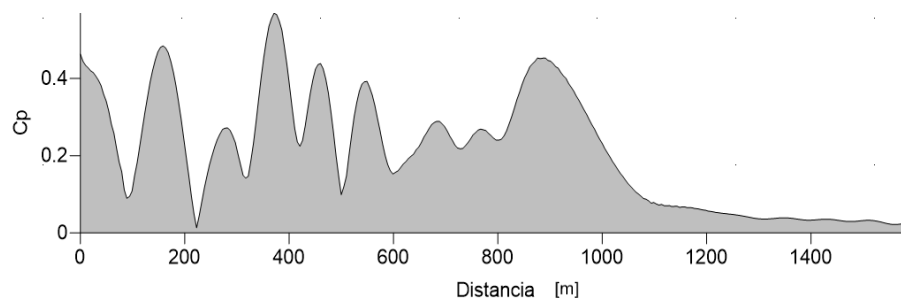


Figura 5. 2. 24. Perfil de CP en el canal de acceso

Esto refuerza nuestra suposición de que la resonancia registrada en el caso 3 se genera principalmente por el periodo, ya que para este caso 4 tiene un valor de 12 [s] contra los 11 [s] del caso anterior, se pensaría entonces que el periodo natural del puerto sería un valor aproximado a los 11 [s] por lo cual entra en armonía con la oscilación de la ola amplificándose y tenemos resonancia. Por tal motivo en este caso a pesar de tener oleaje franco norte, el periodo modelado es diferente lo que genera que la ola al romper en la estructura se refleje con una oscilación diferente la ola incidente no propiciando que se amplifiquen los fenómenos y por ende no exista agitación.

5.5.4.5 Conclusión

Los resultados presentados en esta tesis son completamente con fines de estudio para generar una revisión real conforme a los alcances de la misma, dichos resultados podrán servir como consulta si fuese necesario y como punto de partida para un mejor análisis donde se analice todas las posibilidades que pudieran afectar nuestro proyecto.

La ampliación del Puerto de Veracruz busca satisfacer la demanda y atender el rápido crecimiento del transporte marítimo, por lo cual como se mencionó anteriormente debe tener un diseño óptimo y eficiente que permita la operatividad permanente del puerto. Los resultados presentados que se exponen en el caso 3 son generados por los fenómenos de resonancia en los canales de acceso e inmediaciones del puerto, que debieron haber sido vistos y atendidos durante su diseño, que si fuera un caso aislado podría pasar como una recomendación, pero al ser condiciones con alta probabilidad de ocurrencia debe ser atendido.

Para un oleaje de condiciones normales no presenta mayor problemática, los rompeolas funcionan de manera eficiente garantizando condiciones idóneas para la navegación y operación en su interior.

Debido a lo analizado en el caso 3 se propone un análisis detallado del comportamiento del puerto para un periodo de ola de 11 [s], por los valores de resonancia tan altos que se presentaron con el fin de conocer si este es la única combinación que presenta resonancia o existen otras combinaciones desfavorables para el puerto, con ello obtener más datos que permitan plantear una solución o en todo caso establecer un plan de actuación del puerto en caso de presentarse estas condiciones.

Una observación que realizamos es la orientación del rompeolas que, si bien funcionan, también permiten la entrada de oleaje por la posición de la bocana y sumándole un oleaje predominante del norte. Una reorientación se pensaría como una solución adecuada, pero por el hecho que se encuentra en construcción es descartada, se podría pensar en una obra auxiliar para cuando existan estas condiciones. Es importante dejar claro que para proponer una solución óptima se deben estudiar más factores como la estructura del lecho marino, rutas y accesibilidad a la navegación, etc. que no entran dentro de los alcances de esta tesis, pero es un caso de estudio interesante que necesita un estudio a detalle para obtener valores definitivos, pero es una buena aproximación a los fenómenos que se generan.

5.6 PUERTO DE MANZANILLO

Ubicación

El Puerto de Manzanillo se encuentra ubicado dentro de la Ciudad de Manzanillo, en la costa Oeste de la República Mexicana. Sus coordenadas geográficas son: Latitud Norte 19°03.45 y Longitud Oeste 104°18.08.



Fig. 5.3. 1 Ubicación del Puerto de Manzanillo

Manzanillo es la ciudad cabecera del municipio de nombre homónimo en el estado de Colima y limita al norte con Minatitlán, al este con Coquimatlán y Armería; al sur, está el océano Pacífico; y al oeste y noroeste limita con el estado de Jalisco. Es el puerto comercial más importante de México. La ciudad se compone de 9 localidades Tapeixtles, Salagua, Naranjo, Colomos, Miramar, Valle, Brisas, Santiago y Manzanillo.

La Ciudad está conformada por un sistema de lagunas costeras, compuesto por 3 grandes bahías: Manzanillo, Santiago y Cenicero.

5.6.1 Historia

Anterior a la conquista, en la región que hoy ocupan el Puerto y la Ciudad, habitaban indígenas que se dedicaban a trabajar cerámica, así como una gran variedad de artesanías como collares, aretes, pulseras, entre otros, utilizando conchas y caracoles.

El explorador Álvaro Saavedra Cerón exploró por primera vez las Bahías de Manzanillo en 1527. Posteriormente, el Puerto de Manzanillo se convierte en el tercer puerto que crearon los conquistadores en el Pacífico. Fue fundado en 1530 por capitán Gonzalo de Sandoval con el nombre de Tzalahua o Salagua.

Durante la Colonia, el Puerto de Manzanillo tomó gran importancia al convertirse en uno de los más importantes centros navales y de construcción de navíos Novohispanos, a partir de la cual se lanzaron importantes expediciones al hoy conocido Mar de Cortés, descubriendo la Península de Baja California y describiendo las costas de los estados de Sonora y Sinaloa.

Fueron también expediciones procedentes del Puerto de Manzanillo las que descubrieron en octubre de 1533 el Archipiélago de Revillagigedo, como parte de la expedición de Hernando de Grijalva.

Cortés aprovechó la localización del Puerto de Manzanillo para descubrir nuevas rutas a las Islas orientales y China, para así aumentar la presencia de la Corona Española en el Lejano Oriente, además de establecer rutas comerciales directas entre la Nueva España y las Molucas, las Islas Salomón y China.



Fig. 5.3. 2 Escudo de la ciudad

Con estos descubrimientos se estableció la importante ruta conocida como Galeón de Manila o Nao de China, a través de la cual las naves españolas cruzaban el océano Pacífico dos veces al año.

En 1569, Álvaro Mendaña regaló una palma de coco a los habitantes de Santiago. Dicha palma procedía del viaje de Mendaña a las Islas Salomón. Es digno de mencionar esta palma debido a que los habitantes la explotaron enormemente, aprovechando la mano de obra china que los galeones de manila traían. A partir de entonces el Puerto se caracterizó por sus diversos productos realizados a base del coco, que incluso ha llegado a nuestros días formando parte de su tradición.

El Puerto de Tzalahua y de Bahía de Navidad fueron los precedentes del actual Puerto de Manzanillo, aunque durante la época de la Colonia y el Virreinato tuvieron papeles fugazmente importantes, como el mencionado anteriormente. Estos puertos eran utilizados como lanzaderas para exploraciones y puntos de abastecimiento, astilleros para construcción y reparación de naves y paradas comerciales para las rutas mercantes con Asia que pasaban costearo el país hasta llegar al Puerto de Acapulco, ya que, por su

cercanía a la Ciudad de México, era el más importante del Pacífico.

Después de la Guerra de Independencia, uno de los principales objetivos de la Nación era establecer buenas relaciones internacionales, para lo cual era necesario tener conexiones comerciales con las potencias mundiales.

El 1° de mayo de 1824, el Gobierno General de la República decretó la apertura de Manzanillo, como puerto del Pacífico, aunque es hasta mayo de 1848 cuando el Presidente de la República, el Sr. Manuel de la Peña y Peña, expide el decreto donde se establece la aduana marítima y lo habilita para el comercio exterior e interior, quedando como "**Puerto de Altura**". Es hasta el 17 de junio de 1873 cuando se erige al Puerto de Manzanillo como municipio.

Al ser el principal puerto del Pacífico Mexicano, el puerto experimentó gran desarrollo y modernización en su infraestructura, así como el impulso de conexiones tierra adentro durante el gobierno de Porfirio Díaz. Una de las obras más importantes fue la construcción y finalización del ferrocarril a Guadalajara, terminado en 1908, haciendo que Manzanillo fuera nombrado oficialmente **Puerto de Entrada a México**.

Durante la Revolución Mexicana sirvió como capital provisional del Estado de Colima, cuando las tropas de Pancho Villa tomaron la ciudad de Colima.

En los años 50's, el puerto experimentó una gran modernización, que incluyó dragado de los canales de entrada, el mejoramiento de las obras de protección y la adecuación de las zonas de atraque, permitiendo que nuevas líneas navieras de todo el mundo pudieran acceder con sus flotas.

En 1971, el gobierno mexicano, consciente de la importancia y el potencial que el puerto podía tener, puso en marcha una inversión de 250 millones de pesos para inaugurar el Puerto interior de San Pedrito, ganándole tierra a la Laguna de San Pedrito, además de la construcción e inauguración del Aeropuerto Internacional Playa de Oro y la termoeléctrica "General Manuel Álvarez", creada inicialmente para satisfacer las necesidades eléctricas exclusivas del municipio.

5.6.2 Puerto Moderno e Infraestructura

En la gráfica siguiente se puede observar la importante tendencia de crecimiento que hubo en el transporte de TEU's en los puertos mexicanos. El manejo de mercancías pasó de 263,616 en 1994 a 5,273,945 en 2014, de acuerdo con datos de la SCT y del Banco Mundial, lo que quiere decir que en 20 años la capacidad de manejo de TEU's se incrementó 20 veces en nuestro país. Dentro de esta tendencia, el Puerto de Manzanillo experimentó un crecimiento mayor a la media del país, creciendo casi 37 veces su capacidad en 1992 a 2014, al igual que el movimiento de carga contenerizada que realizaba a nivel nacional, pasando de 49,654 contenedores en 1992 a 2,355,149 en 2014, lo que representa el 44% del movimiento de contenedores a nivel nacional.

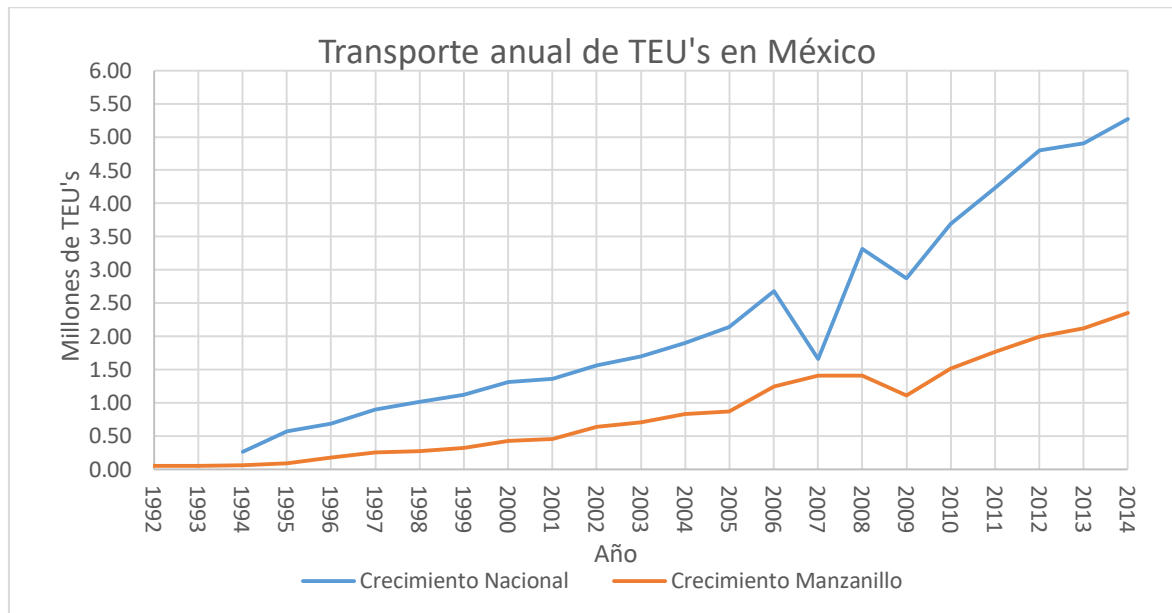


Fig. 5.3. 3 Evolución del movimiento de carga contenerizada en México

A nivel Latinoamérica, Manzanillo ocupa el 5to lugar en movimiento de carga contenerizada, por detrás de recintos como Cartagena, en Colombia, y Porto dos Santos, en Brasil, de acuerdo con datos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

El puerto de manzanillo esta administrado por la Administración Portuaria Integral de Manzanillo S.A. de C.V., un organismo perteneciente al Gobierno Federal, establecido en 1993 y que cuenta con una concesión por 50 años, otorgada por la SCT, para la operación, administración, promoción, construcción, desarrollo y mantenimiento de la infraestructura del Recinto Portuario de Manzanillo, Colima.



Fig. 5.3. 4 Escudos de la SCT y la API Manzanillo

La descentralización de la administración del puerto y la apertura gradual a las concesiones de los recintos son en gran medida las razones de su acelerada expansión en cuanto a la capacidad operativa. El crecimiento anual de Manzanillo como puerto de contenedores rebasa la media del crecimiento nacional, como lo podemos apreciar en la siguiente gráfica:

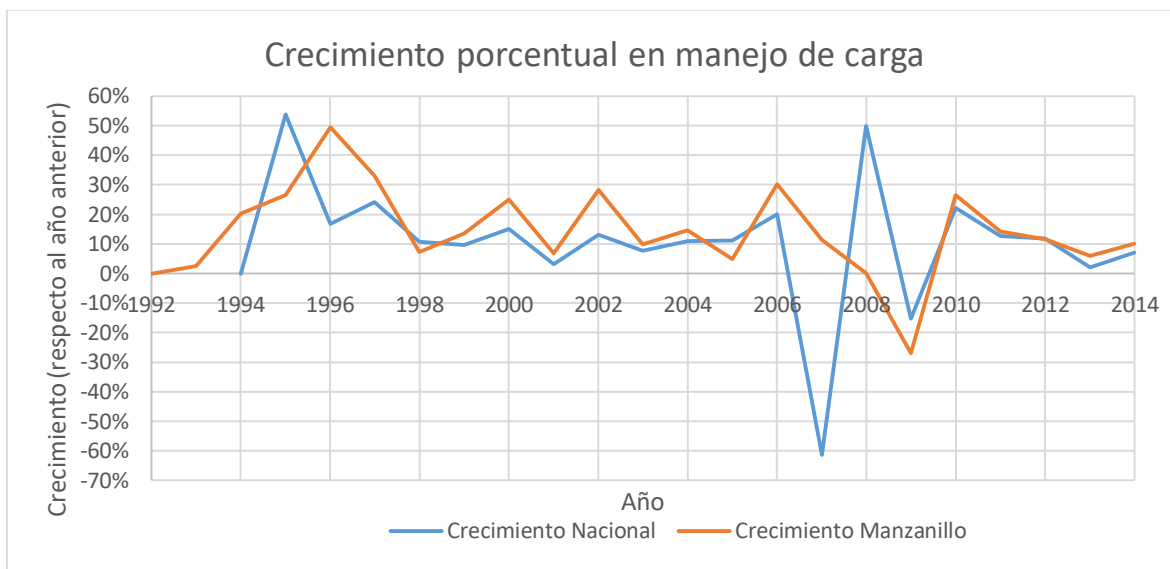


Fig. 5.3. 5 Evolución del manejo de carga a nivel nacional y en el Puerto de Manzanillo

Esto también se ve reflejado en la inversión de capital privado en los puertos a nivel nacional, gracias a la fuerte participación de las empresas en conjunto con las API's, comprando concesiones y áreas de maniobras dentro de los recintos e inyectando fuertes cantidades de capital para mejorar la infraestructura existente.

El puerto actualmente cuenta con 21 posiciones: 16 comerciales, 3 de hidrocarburos, y 2 para cruceros.



Fig. 5.3. 6 Reconocimiento del buque Cezanne

Los buques de diseño, o de mayor tamaño, para la operación del puerto, son de 9200 TEU's y graneleros de 100 mil toneladas, aunque en 2015, arribó el carguero Cezanne, perteneciente a la naviera Maersk, con capacidad para 10 000 TEU's, una eslora de 299.92m, manga de 48.2 m y un calado de 14.5 m.

El Puerto cuenta con un gran índice de eficiencia, reflejado en el promedio de capacidad de carga/descarga de contenedores por hora/grúa, manteniendo un promedio de 45 contenedores por grúa/hora.

Al ser el principal puerto de entrada del pacífico y mover el mayor número de contenedores para



Fig. 5.3. 7 Buque portacontenedores

importación/exportación en nuestro país, cuenta con 9 módulos de revisión de la Aduana en la Zona de San Pedrito y dos módulos más en la Zona Norte

En el Puerto de Manzanillo hay, actualmente, 14 empresas operadoras conformadas por capital privado, nacional y extranjero, dedicadas al manejo de todo tipo de carga. El número de empresas y las variaciones de su origen provocan que haya una gran competitividad dentro del mismo puerto y esto se traduce en un elevado nivel y calidad de servicio en comparación con otros puertos del Pacífico.



Fig. 5.3. 8 Promocional del Puerto de Manzanillo, API MAN, 2017

5.6.2.1 Área agua.

- **Calado.** El calado oficial dentro de los canales de navegación es de 15 [m], aunque de forma no oficial se tienen calados de 16 [m], y está en marcha un proyecto de ampliación que incluye el dragado para tener calados oficiales de 17 [m].
- **Canal de acceso.** El canal de acceso al puerto tiene una dimensión de 240 [m] en distancia a rompeolas, y tiene una franja de dragado de 100 [m] al centro.
- **Dársenas.** El puerto interior cuenta con 2 dársenas de maniobras, una norte y una sur.
- **Canal Secundario.** La configuración del puerto hace que solo sea necesario un canal secundario, que recorre todas las posiciones de atraque y bandas de muelles hacia el interior del recinto.

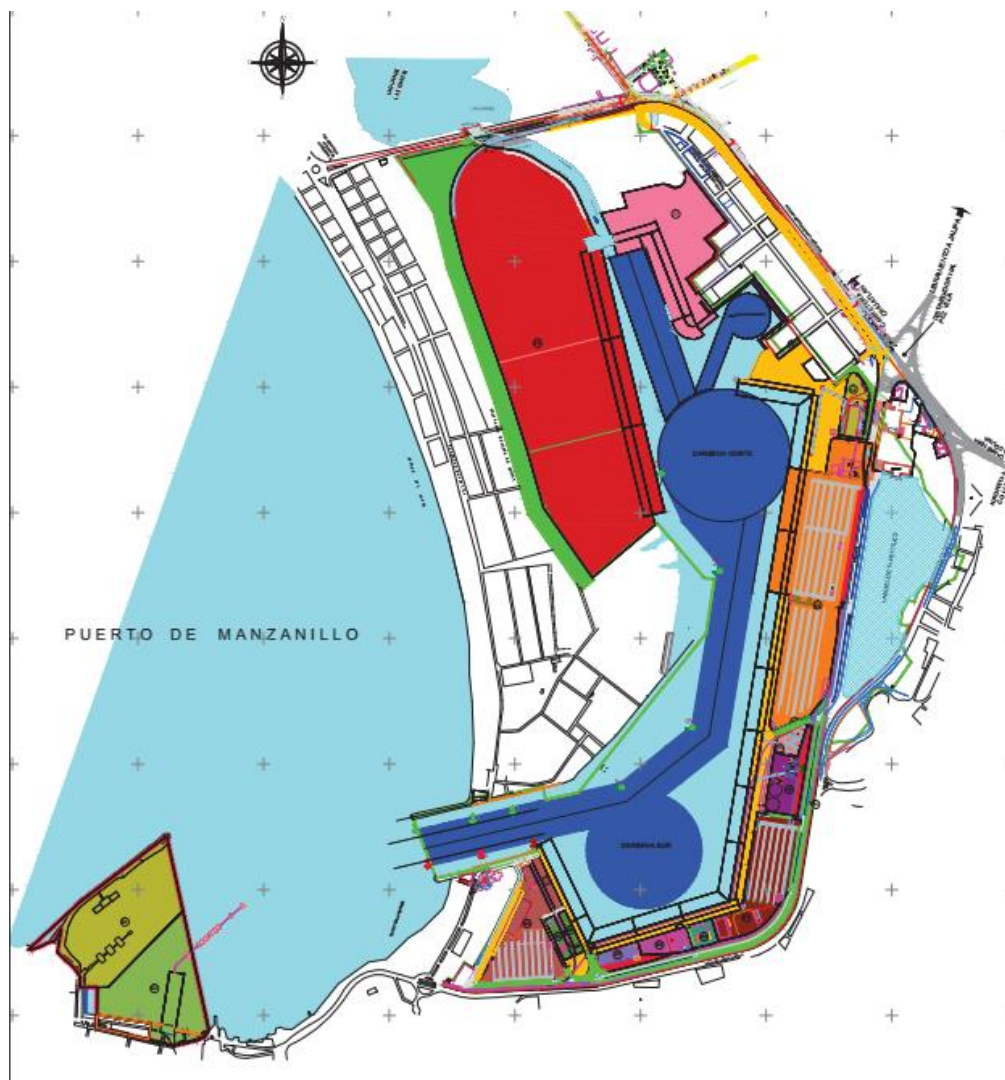


Fig. 5.3. 9 Plano del Puerto de Manzanillo, API MAN

Tabla 26. Infraestructura del Puerto de Manzanillo

Infraestructura Áreas Agua					
Obra	Ubicación	Longitud [m]	Ancho [m]	Calado [m]	Diámetro [m]
Canal de Acceso	De bocana a dársena	826.00	150.00	15.00	
Canal Secundario	Entre dársena de Ciaboga y dársena de contenedores	575.00	230.00	15.00	
Canal Secundario al Puerto Pesquero	Entre dársena de contenedores y dársena pesquera	525.00	60.00	15.00	
Bocana	Entre escolleras, frente a canal de acceso.	--	200.00		
Dársena Norte	Frente a muelles del Puerto Interior	600.00	600.00	15.00	600.00
Dársena Sur	Frente a muelle de contenedores	575.00	575.00	15.00	575.00
Dársena Pesquera	Frente a Terminal Pesquera	210.00	210.00		210.00

5.6.2.2 Área Tierra

El puerto cuenta con capacidad estática de 52,812 TEU's y capacidad dinámica de 2'772,536 TEU's.

Las instalaciones más destacadas dentro del puerto son:

- Instalación de minerales preferentemente de Yeso, con capacidad de almacenamiento de 60,000 toneladas y rendimiento de carga a buque de 2000 ton/hora.
- Cámaras de congelación en la terminal pesquera con capacidad de almacenamiento de hasta 3,500 toneladas de productos del mar.
- La Terminal Especializada en el manejo de contenedores (TEC), con capacidad de operación de hasta tres buques simultáneamente, y rendimientos de hasta 120 cajas por hora buque.
- Instalación granelera con tres silos de almacenamiento de 7,000 toneladas c/u. La instalación granelera de Comercializadora La Junta, con capacidad de descarga de hasta 1,000 toneladas por hora, y almacenamiento para 50,000 toneladas.
- Dos Instalaciones de usos múltiples para el manejo de carga general y contenerizada. Una instalación para el manejo especializado de productos líquidos a granel, como lo son el aceite de palma, y el aceite de pescado, con capacidad de almacenamiento por 13,900 m³.
- Un frigorífico para el almacenamiento de productos perecederos, con capacidad para 3,000 toneladas.
- Un almacén para el manejo de cemento a granel con capacidad de 25,000 toneladas operado por APASCO.
- Dos almacenes operados por CEMEX, uno para el manejo de 50,000 toneladas de clínker y el segundo para el manejo de 16,000 toneladas de cemento a granel.

Tabla 27. Concesionarios en el Puerto de Manzanillo

Empresa	Superficie (m ²)	Uso
PEMEX refinación	27,933.29	Terminal de Hidrocarburos
Operadora de la Cuenca del Pacífico, S.A. de C.V. (OCUPA)	85,477.37	Instalación de Usos Múltiples No. 1 (IUM)
Terminal Internacional de Manzanillo, S.A. de C.V. (TIMSA)	84,956.90	Instalación de Usos Múltiples No. 2 (IUM)
Cementos de México, S.A. de C.V. (CEMEX)	12,545.18	Cemento
Cementos Apasco, S.A. de C.V.	17,440.35	Cemento
Servicios Alimenticios Mejorados (Corporación Multimodal)	8,915.14	Productos Refrigerados
Comercializadora la Junta	35,090.88	Graneles Agrícolas
Granelera Manzanillo	10,844.06	Graneles Agrícolas
SSA de México, S.A. de C.V.	259,422.79	Terminal Especializada de Contenedores (TEC)
Exploración de Yeso (USG)	25,051.20	Granel Mineral (Pref. Yeso)
Frigorífico de Manzanillo, S.A. de C.V. (FRIMAN)	16,426.00	Productos Refrigerados y Fluidos
Marítima y Servicios (MARFRIGO)	2,200.00	Instalación para Productos del Mar
Gobierno del Estado de Colima (Terminal Turística)	22,666.70	Terminal de Cruceros

Servicios Terremar	373.52 419.223	&	Báscula y Pesaje
--------------------	-------------------	---	------------------

5.6.2.3 *Servicios Portuarios*

El puerto de Manzanillo ofrece una variedad de servicios para las embarcaciones y los clientes potenciales que existen.

- Servicios a las embarcaciones.
 - Amarre y desamarre
 - Remolque
 - Lanchaje
 - Recolección de desechos sólidos urbanos
 - Suministro de combustibles y lubricantes.
 - Avituallamiento.
 - Suministro de agua.
- Servicios de Maniobras.
 - Carga y descarga.
 - Alijo
 - Acarreo
 - Almacenaje
 - Estiba
- Servicios Conexos.
 - Acarreo de carros de ferrocarril.
 - Reparación y mantenimiento industrial a instalaciones.
 - Báscula y pesaje
 - Fumigación
 - Reparación de todo tipo de contenedores, montacargas y chasises
 - Inspección, supervisión y certificación de mercancías
 - Transporte y alimentación.

Además, cuenta con el Centro de Reparaciones Navales Número 14, a cargo de la Secretaría de Marina Armada de México, en donde se proveen los servicios de maquinado, fundición, mecánicos a bordo, carpintería, sopleteo y pintura, balanceo dinámico de hélices, sistemas y equipos eléctricos, sistemas y equipos de refrigeración, sistemas de propulsión, pailería y soldadura y reparación de sistemas de tuberías.

Las características de este centro de reparaciones navales son:

- Calado máximo: 6.2 [m].
- Eslora útil: 122 [m].
- Manga útil: 14.9 [m].
- Capacidad de levante de carga: 2,500 [ton].

5.6.2.4 *Proyectos de ampliación.*

El Puerto de Manzanillo se encuentra considerado dentro de los ejes estratégicos principales para el desarrollo económico del país, lo cual se ve reflejado en el Plan Maestro de Desarrollo 2007-2030, en el cual se establecen las políticas y estrategias económicas a implementar para aumentar la competitividad del Puerto y las obras de infraestructura necesarias para poder impulsar este crecimiento.

Al ser el principal puerto de entrada de contenedores a nuestro país, las obras de ampliación de Manzanillo se encuentran entre las prioritarias del Gobierno Federal. Entre ellas, existen proyectos para mejorar la conectividad ferroviaria, agilizar el paso de las mercancías por las aduanas, y aumentar y mejorar la capacidad de almacenamiento y transferencia modal de los contenedores.

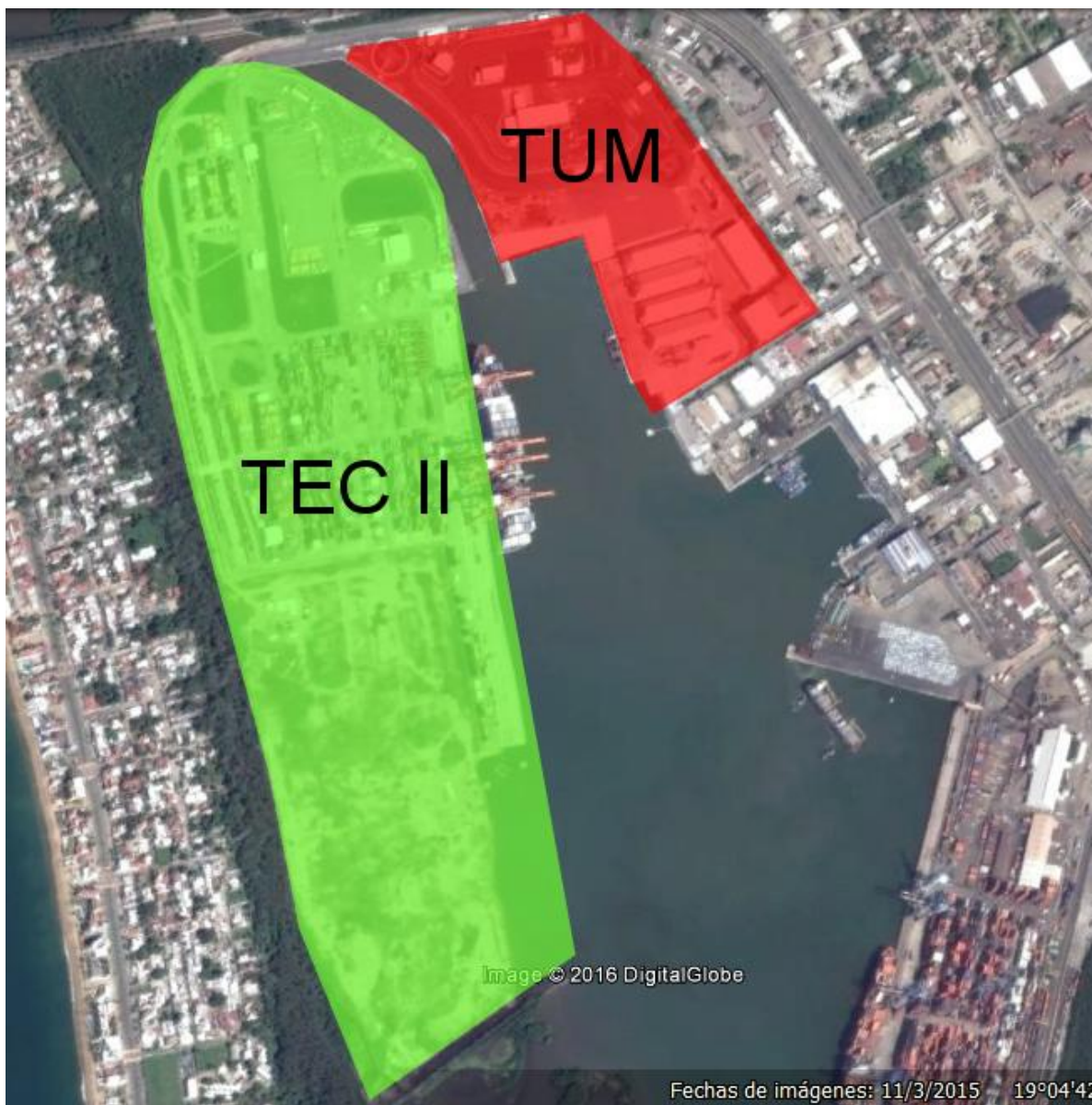


Fig. 5.3. 10 Áreas en desarrollo y crecimiento

Específicamente hablando en infraestructura marítima, existen 3 proyectos principales:

- TEC II. Terminal Especializada de Contenedores II.

Junto con la TUM, es la última ampliación que se tiene planeada dentro del Puerto Interior, debido a que considera el uso al 100% del espacio dentro del recinto, sin posibilidades de expansión debido a la mancha urbana y, principalmente, debido a que ya no queda más espacio utilizable.



Esta ampliación está dividida en 3 etapas; programadas para operar en el siguiente orden: La primera en 2013, la segunda en 2017 y la tercera después del 2020.

La primera etapa fue concluida en tiempo, mientras que la empresa CONTECON, concesionaria de la TEC II decidió adelantar la segunda etapa por la tendencia incremental de la carga contenerizada, comenzando la operación en 2016 y terminada en el año 2017, con la adición de múltiples grúas y vehículos para agilizar el movimiento de contenedores. Al finalizar, la Etapa II moverá 1,000,000 de TEU's anualmente. Es capaz de recibir 2 buques súper post-panamax.

agilizar el movimiento de contenedores. Al finalizar, la Etapa II moverá 1,000,000 de TEU's

Fig. 5.3. 11 Etapas de la TEC II

- Capacidad actual: 650,000 TEU's.
- Capacidad al finalizar Etapa III: 2 millones de TEU's.
- Calado final: 16 m.
- Uso de la nueva Aduana de Manzanillo Zona Norte.
- TUM. Terminal de Usos Múltiples. Inició su construcción en 2013 con el objetivo de mejorar las condiciones de carga de mineral, a granel y general, aumentando la eficiencia y velocidad de carga/descarga, reduciendo al mínimo la pérdida de carga en las maniobras y evitando que esta se disperse en el medio ambiente, mejorando la ecología del Puerto. Cuenta con 2 bandas transportadoras que alcanzan una velocidad de carga/descarga de 1000 toneladas/Hora. Tiene 2 bodegas independientes para el almacenaje, por lo que puede dar servicio simultáneo a 2 embarcaciones tipo Panamax de 180 m de eslora máxima. Inició operaciones en enero de 2016.



Fig. 5.3. 12 TUM manejando carga a granel

- Área Total: 15.9 [ha].
- Carga general, sobredimensionada y de graneles minerales.
- Capacidad 2.5 millones de THBO en graneles minerales.
- Puerto Laguna de Cuyutlán. Es el proyecto más importante de la API Manzanillo. Se trata de habilitar la actual Laguna de Cuyutlán, al sur de la Península de Santiago, ubicada en el extremo sur de la Bahía de Manzanillo. Al ser una de las lagunas costeras de mayor tamaño en el país, ofrece condiciones favorables para la actividad portuaria. Al finalizar su habilitación podrá aumentar 15 veces la capacidad del Puerto de Manzanillo incluyendo la Etapa III de la TEC II.

El proceso de habilitación inició en 2004 cuando se construyeron obras de acceso que mantienen la laguna abierta todo el año y una Terminal para la recepción y almacenamiento de Gas Natural. Se espera que el proyecto inicie de manera contundente en 2022. Al año 2017, el proyecto aún se encuentra en la etapa preliminar, realizando estudios y comenzando con la planificación presupuestal.

Tendrá capacidad de:

- 40 posiciones de atraque.
- Calado oficial de 18 [m].
- Superficie utilizable total de 3,409 [ha].
- Puerto multipropósito, capaz de manejar carga contenerizada, graneles minerales y agrícolas, plataforma de exportación/importación de automóviles y Terminales de Usos Múltiples.



Fig. 5.3. 13 Propuesta de expansión en Laguna de Cuyutlán

5.6.2.5 Impacto Ambiental

Como toda obra de ingeniería, el Puerto de Manzanillo ha tenido un gran impacto sobre el entorno que lo rodea, impacto que en ciertos aspectos no es positivo.

El incremento del tráfico marítimo y el comercio que ha provocado el crecimiento y la expansión del puerto y que ha traído grandes beneficios económicos a la región y al país, también ha provocado un importante crecimiento poblacional en la zona, tanto por el aumento de las familias que ahí residen, como por la migración de zonas más pobres en busca de mejores oportunidades económicas. Esto es causa de los problemas a los que se enfrentan las grandes ciudades: congestionamiento de las vialidades, aglomeraciones de personas, servicios insuficientes, aumento de la delincuencia y generación de grandes cantidades de basura.

Las ampliaciones del puerto hacia la Laguna de San Pedrito y la parte occidental del recinto original han provocado la deforestación de grandes áreas boscosas y de manglar, que a pesar de haber sido consideradas y mitigadas dentro de la Manifestación de Impacto Ambiental, las acciones de mitigación y compensación contempladas y prometidas por la API y las empresas inversionistas, se han visto delegadas y retrasadas de forma alarmante, a pesar de que se pagó una fianza de 38 millones de pesos por concepto de medidas de reforestación.

Dichas obras han provocado la pérdida 90 hectáreas de humedales costeros, de las cuales 30 son manglares. A pesar de que la NOM (Norma Oficial Mexicana) 022 protege a los manglares, esta permite su destrucción en caso de que el daño sea reparado, aunque no especifica la forma de medir la reparación.

El proyecto contemplo la reparación del daño mediante El Programa de Restauración de la Laguna del Valle de las Garzas. Bajo el Amparo del Programa de Rescate Protección y Reforestación de Manglar del Programa Maestro de Desarrollo Portuario 2000-2010, se han realizado las siguientes actividades:

- Se registró ante la SEMARNAT la Unidad de Manejo Ambiental (Vivero), en donde se reproducen las dos especies de Mangle (Rojo y Blanco), en la cual se han producido aproximadamente 25 mil especímenes. Hasta el momento se han sembrado 12,485 individuos de mangle blanco en La Laguna del Valle de las Garzas, teniendo un porcentaje de sobrevivencia del 95%. Ésta Reforestación cubre un área aproximada de 3.5 hectáreas.

- Se ha delimitado la Zona Federal Marítimo y Terrestre junto con la SEMARNAT, con la colocación de postes de concreto y alambre cubierto con PVC y señalamientos. Esto se considera primordial porque por primera vez hay un límite claro para el Desarrollo Urbano que incide y presiona a este cuerpo Lagunar.
- A la par realizó estudios junto con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Instituto de Ingeniería de la UNAM que demuestran bajo argumentos científicos que la reconexión con la Laguna de San Pedrito si es posible, por lo que al llevar a cabo la construcción del Dren de intercomunicación la Laguna se sujetaría a un intercambio de agua completo en ambas direcciones regulado por las señales de marea; cabe resaltar que actualmente el flujo de interconexión entre ambas lagunas fluye de la Laguna de las Garzas hacia la de San Pedrito. Esto tendrá como beneficio la conservación de un espacio auto sostenido para la Flora y Fauna que habita en la Laguna.

5.6.3 Laguna de Cuyutlán

Aunque se establece que está conformada por 4 vasos, en realidad, el intercambio de las corrientes y materia orgánica entre estos es muy grande, por lo que no se pueden considerar aislados unos de otros.



Fig. 5.3. 14 Puerto actual y futura ampliación de Cuyutlán

La gran extensión de esta Laguna la hace ideal para la construcción de un Puerto Interior de gran tamaño, por lo que la estrategia nacional portuaria contempla como una de sus metas la expansión a largo plazo del Puerto de Manzanillo mediante la habilitación de la Laguna como puerto de altura.

Esto ha traído grandes protestas por parte de grupos ambientalistas nacionales e internacionales, uno de ellos Bios Iguana, que declara el incumplimiento y la falta de aplicación de leyes y Normas Oficiales Mexicanas en materia de legislación ambiental, referente a la autorización de dos proyectos de gaseras en el Vaso II de la Laguna de Cuyutlán.

5.6.4 Caso de Estudio.

La elección del Puerto de Manzanillo como caso de estudio y aplicabilidad de los temas expuestos en este trabajo de tesis radica en la importancia que tiene este recinto para nuestro país. Manzanillo literalmente es el puerto comercial más importante del país, seguido solamente por el Puerto de Veracruz.

Las razones de su éxito principalmente son su posición geográfica, al estar ubicado en la costa del pacífico mexicano y por su latitud, es un destino cómodo para atender los corredores comerciales asiático-americanos. Además, esta posición también le permite aliviar y atender la carga que excede los saturados puertos de la Costa Oeste de Estados Unidos.

La dependencia de nuestro país hacia el Puerto de Manzanillo hace que sea relevante llevar a cabo un estudio de la interacción que tiene el puerto con el oleaje que incide en la bahía de Manzanillo.

Adicionalmente, se cumple con el objetivo de mostrar al lector el efecto que tienen los dos océanos que rodean a nuestro país sobre estos puertos.

5.6.4.1 Condiciones Locales

Protección Natural.

La ubicación del puerto dentro de la Bahía de Manzanillo le brinda una excelente protección natural contra el oleaje proveniente del Sur.

Además de eso, la construcción y ampliación del Puerto aprovechando la antigua Laguna de San Pedrito ha hecho que Manzanillo tenga todas las ventajas de un puerto fluvial en un puerto costero, enfrentando, sin embargo, la desventaja de llegar a saturar el espacio disponible para crecimiento, situación que actualmente ya ha sido alcanzada.

Sin embargo, el puerto se encuentra en riesgo cuando el oleaje proviene del Oeste y el Suroeste. En la figura siguiente, se pueden apreciar las direcciones que pueden llegar a incidir en la zona, y tener una idea preliminar del riesgo que produce cada una sobre el Puerto.



Fig. 5.3. 15 Direcciones de oleaje con mayor influencia anual

El muelle marginal ubicado en la terminal marítima de PEMEX, en la punta Este de la bahía, brinda de una importante protección contra el oleaje proveniente de esta dirección.

Es probable que, sin él, pudiéramos llegar a encontrar cierta agitación en el recinto interior de San Pedrito, como se discutirá más adelante.

Para no extender más el análisis del fenómeno se decidió limitar el estudio a 2 casos de Oleaje Normal y 2 casos de Oleaje de Tormenta (Extraordinario). De esta manera se considera que se cubren las situaciones más probables y recurrentes de oleaje que hay en el puerto.

Batimetría

Como se mencionó en el Capítulo 4, el programa WAPO_V4 requiere de una malla batimétrica de la zona en estudio.

Después de diversas consultas a las cartas batimétricas disponibles, se hizo uso de una malla proporcionada por el Dr. Edgar G. Mendoza Baldwin, Director de este trabajo de Tesis.

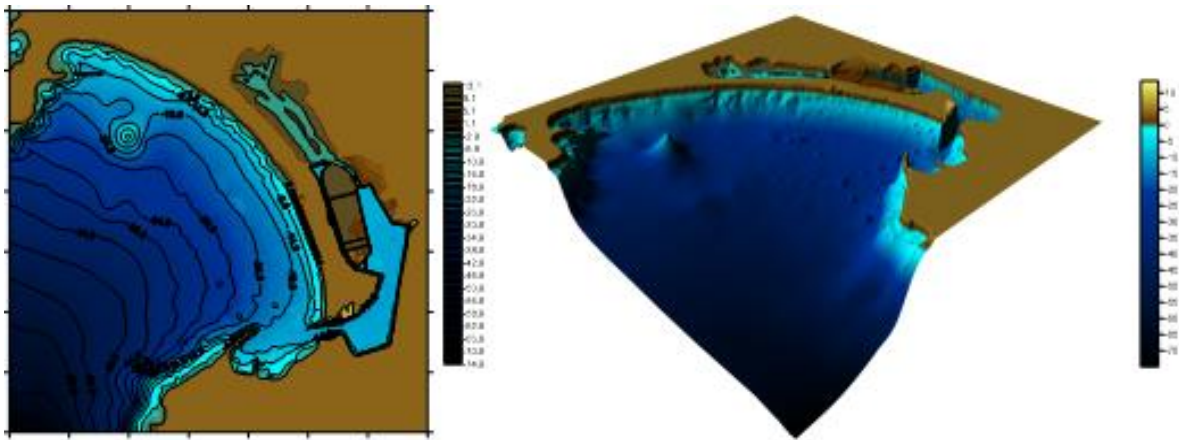


Fig. 5.3. 16 Batimetría representada por curvas de nivel y superficie 3D

La información de la malla batimétrica, además de ser la más actual disponible, solo tuvo que ser modificada para ajustar el tamaño y número de celdas recomendadas para iniciar el análisis en el programa.

Está conformada por una malla cuadrada de 701 celdas en cada dirección (X, Y). Cada celda cuadrada abarcaba 10 m lineales en la realidad.

5.6.4.2 Ejecución del Modelo.

Cada corrida de análisis del software requirió 2 iteraciones con 183 archivos de cálculo. El tiempo de cálculo llegó a ser de hasta 2 horas.

5.6.4.3 Oleaje Normal

Las condiciones encontradas de oleaje normal obtenidas a partir del Atlas de Clima Marítimo fueron las siguientes:

Tabla 28 Casos modelados en condiciones de Oleaje normal

Caso	Periodo [s]	Altura de Ola [m]	Dirección del Oleaje
I	7	1	W
II	9	2	NW

Caso I

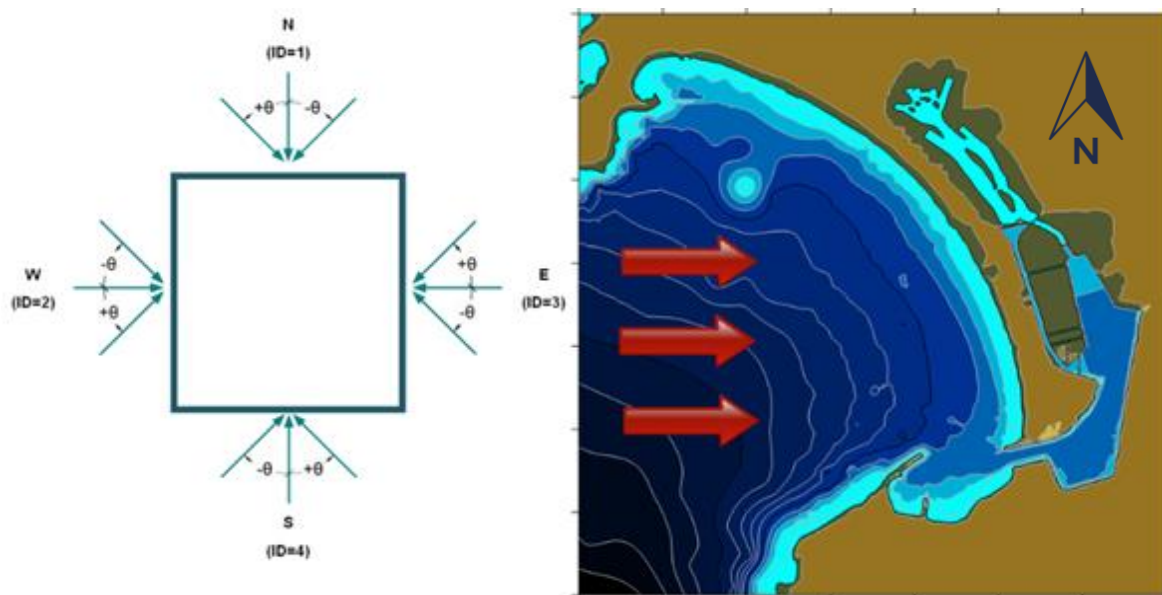


Fig. 5.3. 17 Incidencia de oleaje para Caso I de oleaje normal

De acuerdo con la información del software WAPO_V4, la frontera de propagación del oleaje **corresponde al ID 2, con un ángulo de Incidencia $\theta=0^\circ$.**

Resultados

Una de las principales ventajas que nos brinda el software es que nos presenta los resultados de manera gráfica, de forma que podemos visualizar rápidamente qué tan afectadas se encuentran las zonas de nuestro interés.

En primer lugar, a partir de la observación del archivo que presenta la amplitud del oleaje, podemos observar que, en general, dentro de la Bahía se mantiene un nivel de calma generalizado.

La escala de color nos indica que los valores máximos que alcanza la amplitud del oleaje es de 2.4, pero dentro del mapa de contornos se puede observar que esto se alcanza solamente en puntos muy específicos y pequeños, que no tienen influencia significativa en nuestro estudio.

También se puede apreciar que las zonas con mayor “turbulencia” están en la línea de acción del oleaje incidente. Presentan una ligera inclinación debido, probablemente, al efecto que tiene la forma de la bahía, demostrando el efecto del someramiento.

De igual manera, los valores más altos dentro de la bahía se presentan en la zona costera que esta frente a la línea de acción del oleaje, reforzando la hipótesis anterior.

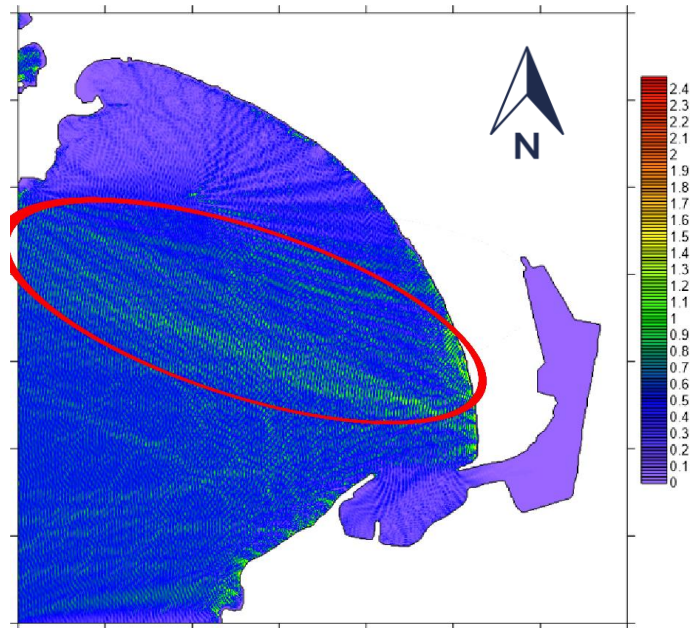


Fig. 5.3. 18 Superficie Libre, Caso I

Además, se puede apreciar directamente la forma en que la entrada al puerto y el recinto interior se encuentran completamente protegidos, al grado de tener aguas prácticamente en calma.

Para poder visualizarlo de manera más concreta, se hizo una ampliación de la zona protegida del puerto, obteniendo también los perfiles de la amplitud (que para nosotros es el **Coefficiente de Propagación**) de las zonas con mayor interés.

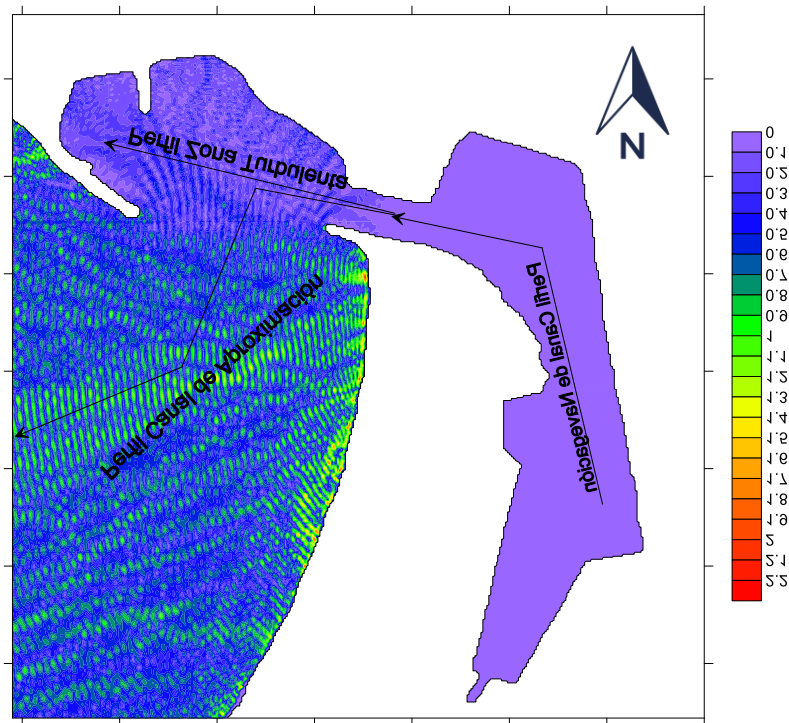


Fig. 5.3. 19 Agitación en la zona de interés, Caso I

Resalta la poca agitación que se presenta dentro de la zona protegida del puerto.

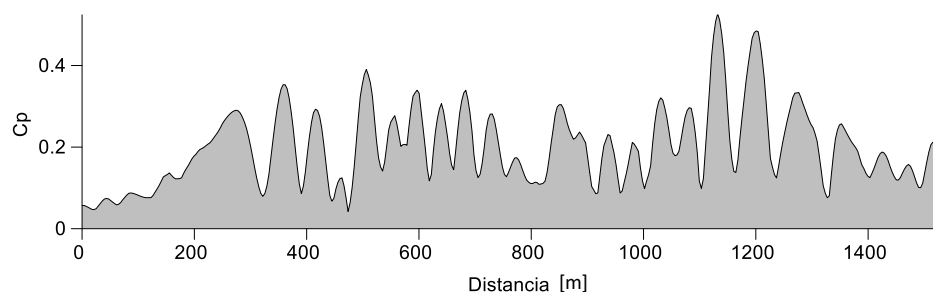


Fig. 5.3. 20 Perfil de CP en zona turbulenta

Aunque parece que hay mucha variación dentro de la Zona Turbulenta, esta no sobrepasa el intervalo entre 0.2 y 0.4, teniendo solamente un par de picos con un valor máximo de **0.5271**

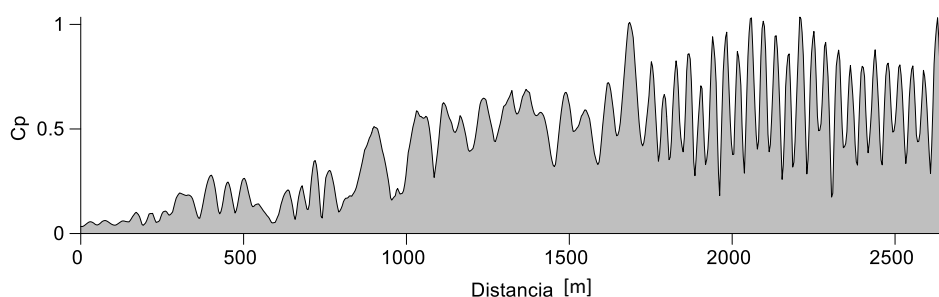


Fig. 5.3. 21 Perfil de CP en Canal de aproximación

En el perfil obtenido del canal de aproximación podemos observar que alrededor de la distancia recorrida 1600 m, el C_p supera la unidad. Esto se interpreta como el cambio de la zona protegida del puerto por el Muelle Marginal hacia la zona de fondeo en la Bahía, expuesto al oleaje incidente en su totalidad.

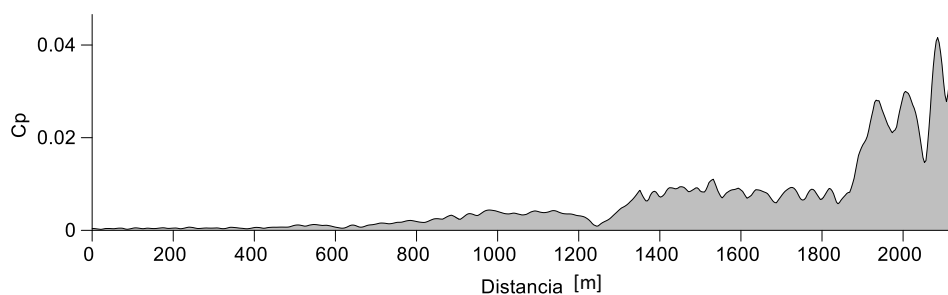


Fig. 5.3. 22 Perfil de CP en Canal de navegación

El perfil obtenido dentro del Canal de Navegación comprueba que, para esta condición del oleaje, el Puerto tiene una protección prácticamente inmejorable, ya que el oleaje es casi nulo, con lo que se tienen condiciones de operación inigualables.

Estos resultados también se corroboran con un vistazo al archivo generado por el programa con la superficie libre instantánea del oleaje, lo cual se hace en las Figuras:

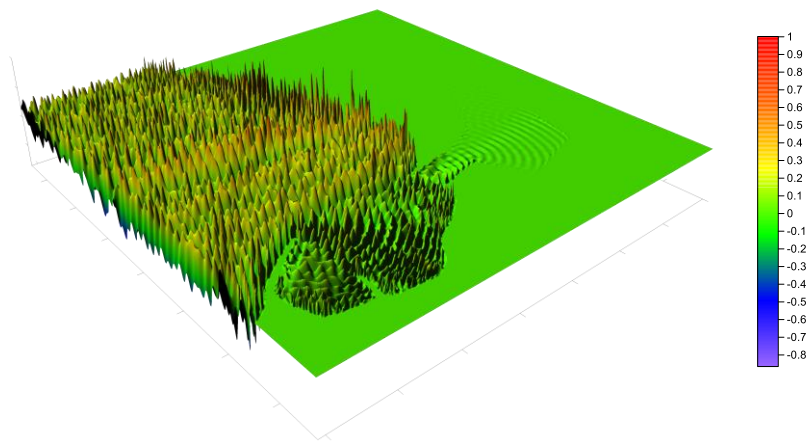


Fig. 5.3. 23 Modelación de la Superficie Libre del agua, Caso I

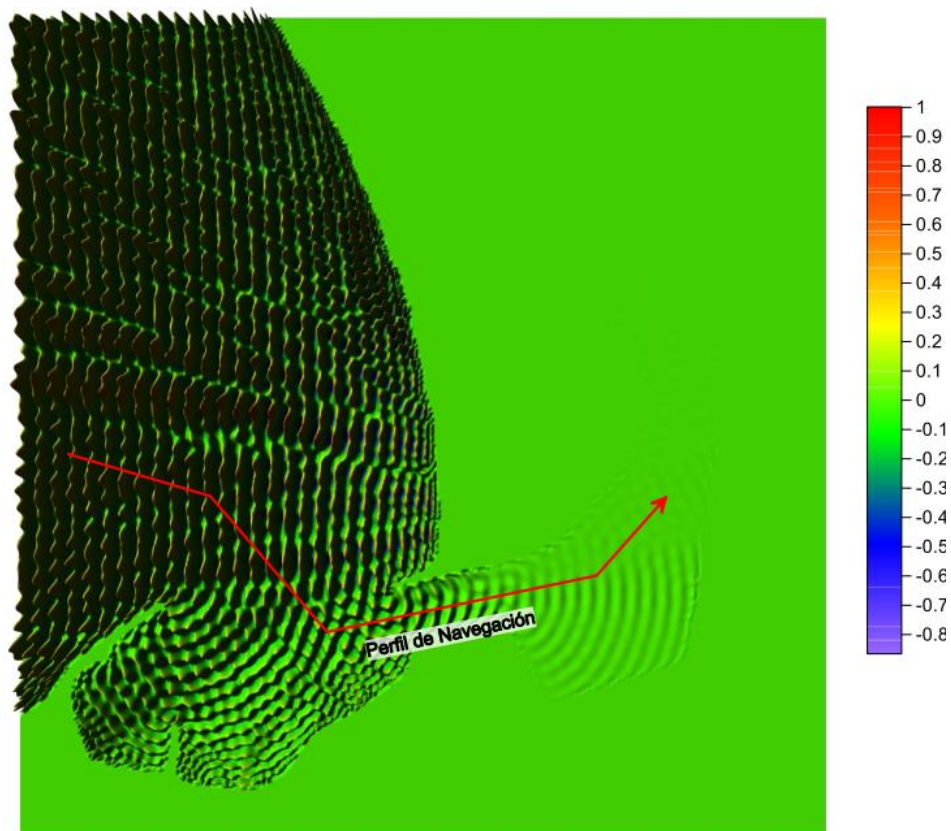


Fig. 5.3. 24 Superficie Libre en área de interés

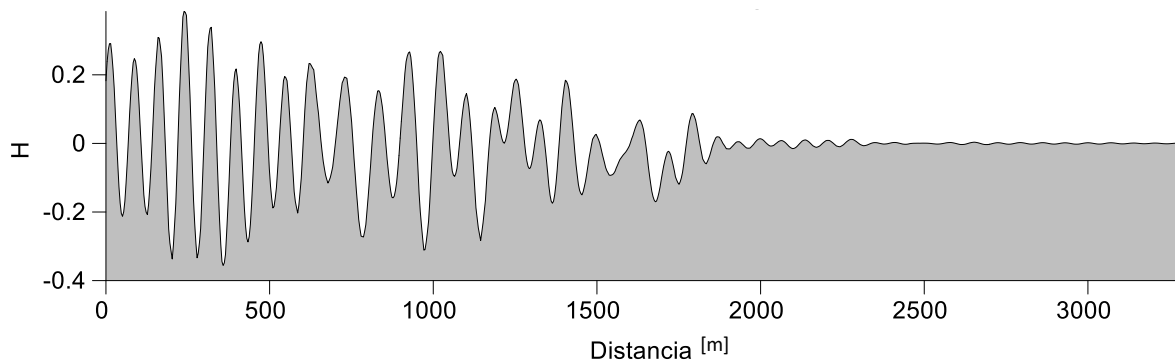


Fig. 5.3. 25 Perfil SL en ruta de aproximación

Como se puede apreciar, se tienen pequeñas olas dentro de la bahía, alcanzando un máximo, en este caso, de **0.45 m**, lo cual es aceptable, al no ser ninguna zona con navegación restringida ni de calado limitado.

De igual forma, se observa que, conforme el buque se acerque al canal de entrada y al recinto interior, irá encontrando aguas cada vez más calmadas, mucho más tranquilas respecto a la entrada por la bahía, teniendo excelentes condiciones de maniobrabilidad **desde el punto de vista oceanográfico**.

Sin embargo, estos datos son meramente ilustrativos, ya que la altura de oleaje puede variar incluso 1 m en cualquier dirección. Es por eso que se utiliza con más seguridad el **Coefficiente de Propagación obtenido del análisis del archivo de Amplitud del oleaje**.

Tabla 29 Tabla de resultados, Caso I

Oleaje Ordinario. Caso I			
Oleaje Incidente (H0) [m]	1	T [s]	7
Región	Zona Turbulenta	Canal de aproximación	Recinto Interior
Cp (máx.)	0.5271	1.038	0.0467
Oleaje Propagado (H1) [m]	0.5271	1.038	0.0467

El oleaje propagado se obtiene multiplicando el Coeficiente de Propagación (Cp) por el oleaje incidente.

$$H_1 = Cp * H_0$$

Caso II

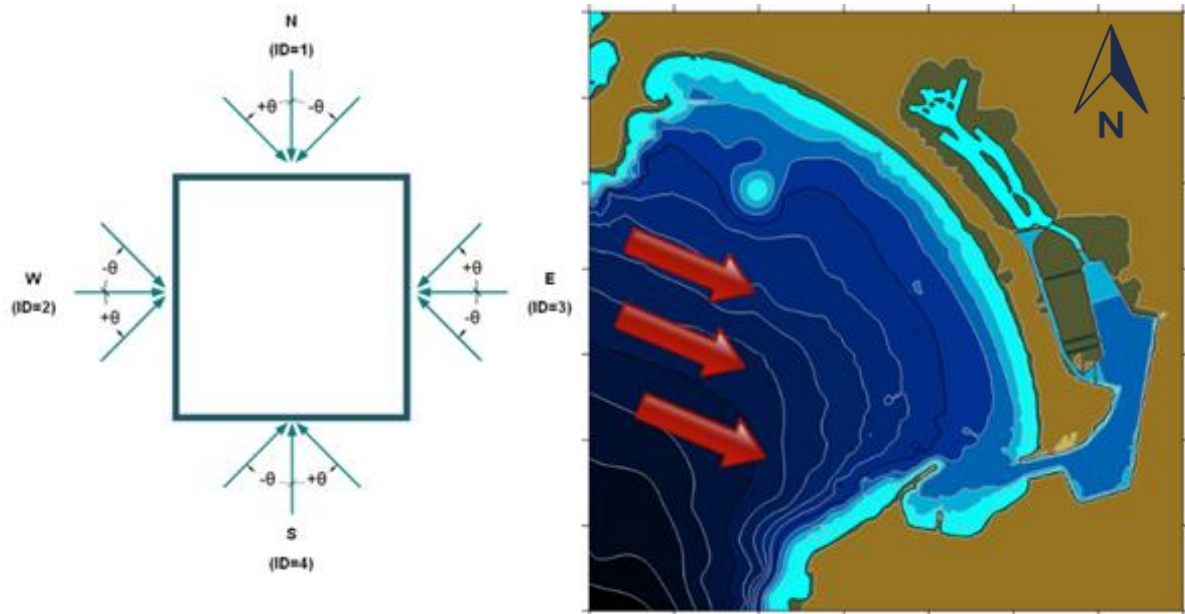


Fig. 5.3. 26 Incidencia de Oleaje para Caso II de oleaje normal

De acuerdo con la información del software WAPO_V4, la frontera de propagación del oleaje **corresponde al ID 2, con un ángulo de Incidencia $\theta = -22.5^\circ$.**

Resultados

A pesar de que este caso de oleaje presentaba factores de mayor riesgo para el recinto, debido a la dirección, la altura del oleaje y el periodo, la condición de Bahía natural de nuevo desarrollo una protección muy importante para el puerto contra el oleaje, ya que la Península de Santiago, ubicada en la punta norte de la bahía, cumple la función de un rompeolas natural de dimensiones descomunales.

En el archivo de amplitud de oleaje se puede apreciar este efecto:

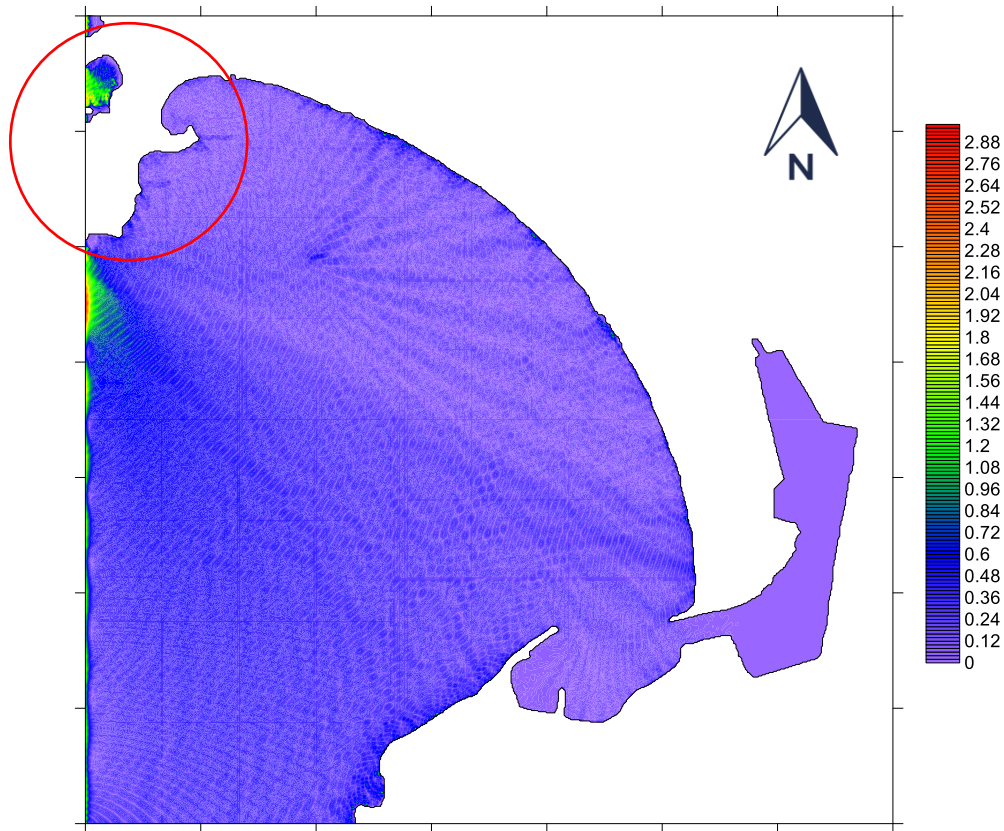


Fig. 5.3. 27 Agitación intensa fuera de la bahía. Se puede observar que la zona encerrada presenta altos valores de agitación

Los valores máximos de la amplitud son alcanzados en el vecindario de la Península de Santiago, mientras que el resto de la bahía presenta una relativa calma incluso mayor a la del Caso I.

El oleaje que no es atenuado por la península y que se propaga dentro de la bahía no produce efectos considerables en el oleaje dentro del Puerto, debido principalmente al rompeolas del Muelle Margina, ya que protege casi por completo al recinto interior del poco oleaje que llega a la bahía.

Dentro de la zona protegida por el rompeolas marginal, la turbulencia que se genera es menor, tanto en extensión como en valores máximos, que la que se presenta en el Caso I. En ese caso, se presentaban valores de C_p distintos en casi toda el área, mientras que, en este caso, parecen concentrarse en la bocana del recinto interior.

El valor máximo del C_p encontrado en el Caso I, ronda 0.5, mientras que en este caso es de 0.24.

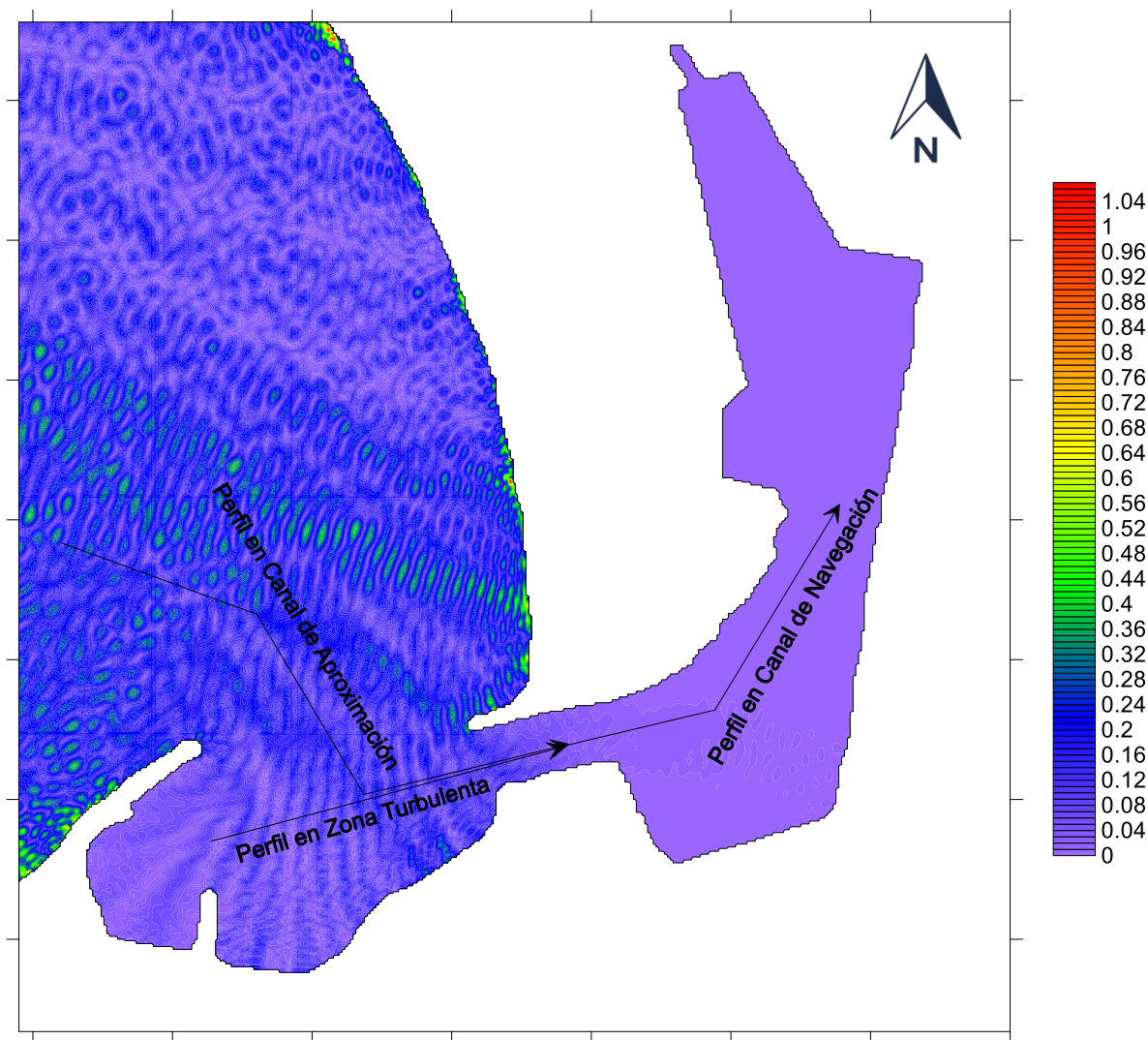


Fig. 5.3. 28 Agitación en el área de interés para el Caso II de oleaje normal

De nuevo, se trazaron los perfiles transversales para conocer la variación del Coeficiente de propagación en cada zona de interés.

Una vez más se puede observar claramente que el recinto interior está completamente protegido contra el oleaje que incide dentro de la bahía.

La punta de la flecha indica la dirección creciente del perfil

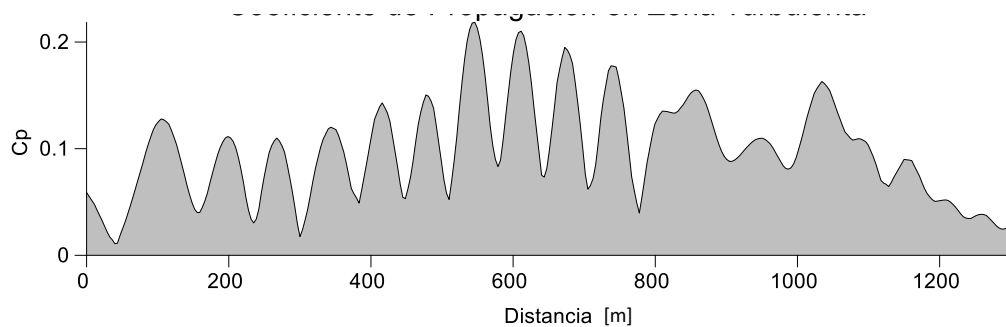


Fig. 5.3. 29 Coeficiente de Propagación en la zona turbulenta

Los valores dentro de la zona turbulenta presentan muchos valores extremos; sin embargo, estos valores van desde 0.02 a 0.22. Además, la distancia entre los valores extremos es en promedio de 25 m, por lo que puede considerarse que el oleaje es relativamente tranquilo.

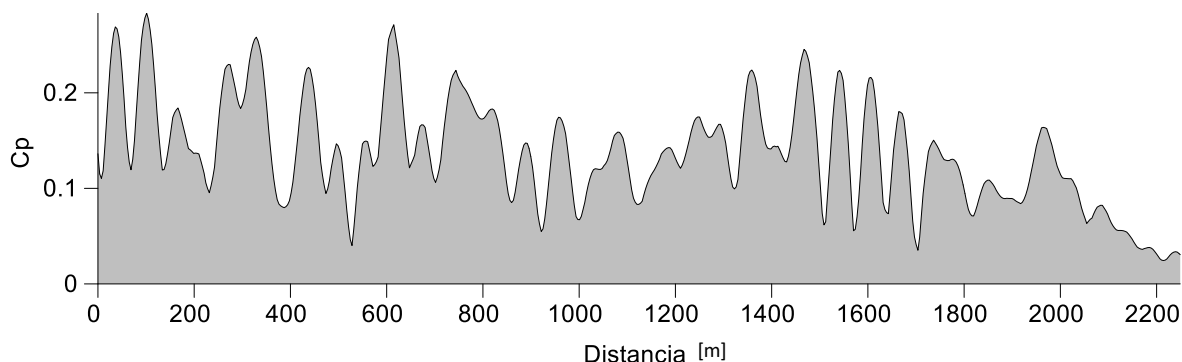


Fig. 5.3. 30 Coeficiente de Propagación en canal de aproximación

A pesar de alcanzar valores de Propagación mayores a los alcanzados en la zona turbulenta, estos valores siguen siendo menores a 1, representando por lo tanto valores atenuados del oleaje incidente. También se puede apreciar una ligera tendencia a la baja en el perfil mostrado, desde el punto de la bahía hasta la bocana del recinto Interior.

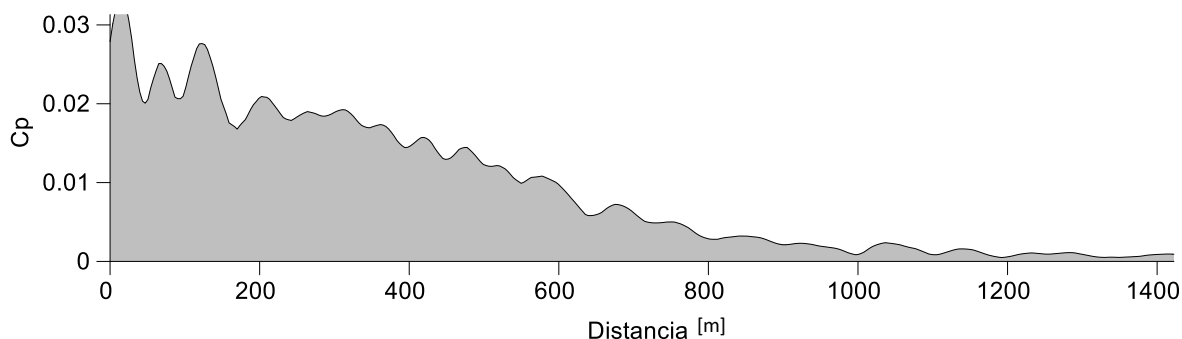


Fig. 5.3. 31 Coeficiente de Propagación en Canal de Navegación

De nuevo, el Puerto Interior se encuentra prácticamente en calma teniendo un valor máximo de 0.035 en la bocana de acceso. Este valor disminuye conforme se accede a las zonas de atraque del recinto Interior.

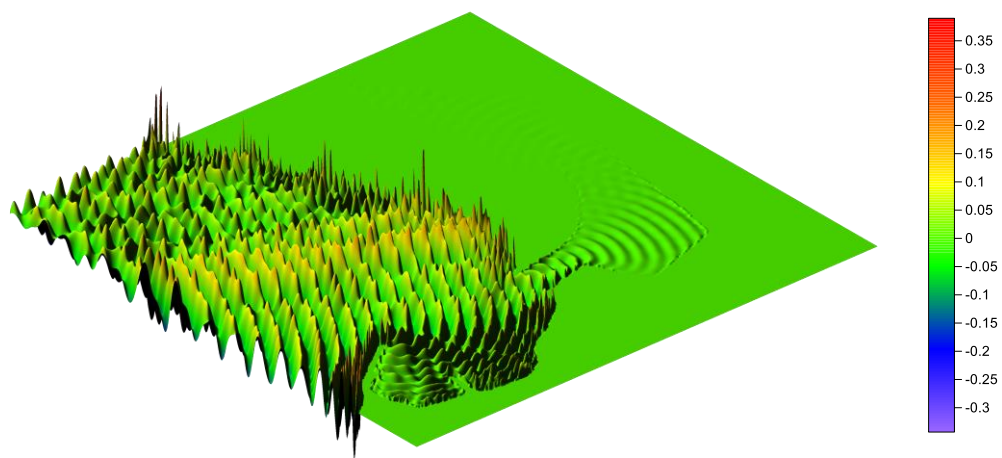


Fig. 5.3. 32 Superficie libre de la bahía para el Caso II de oleaje normal

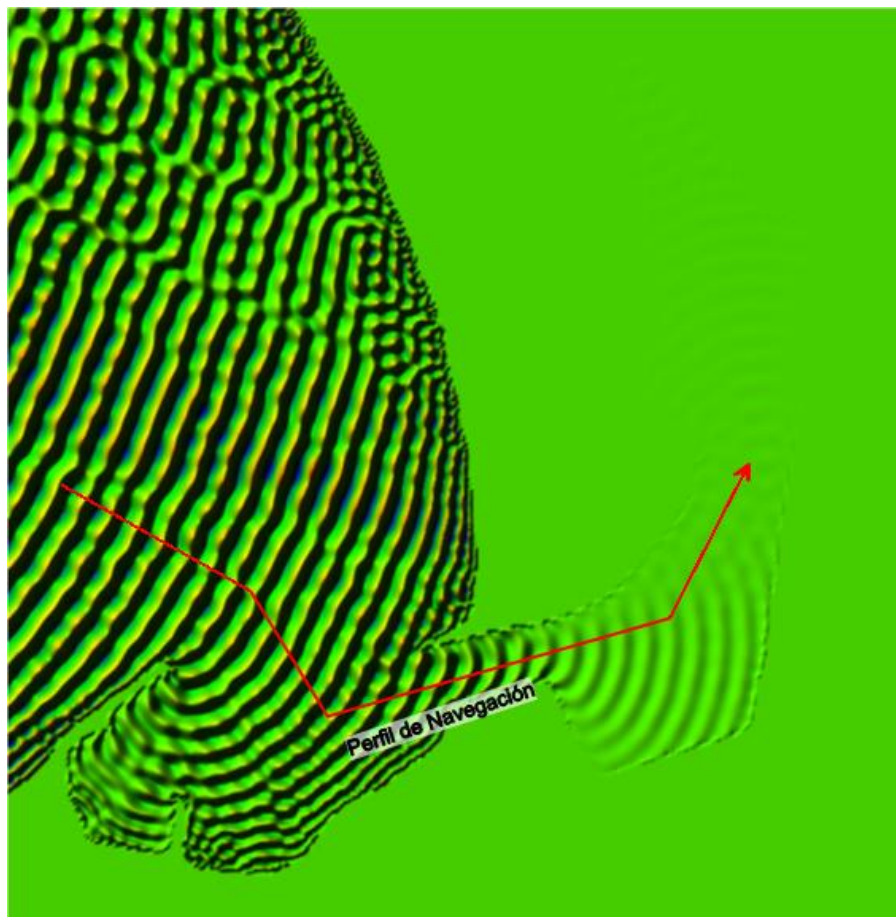


Fig. 5.3. 33 Superficie libre en el área de estudio para el Caso II de oleaje normal

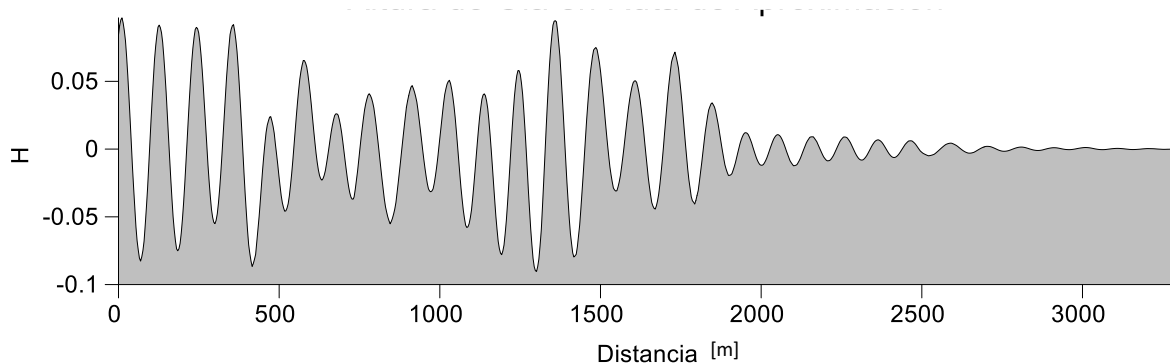


Fig. 5.3. 34 Altura de Oleaje en ruta de aproximación

Las alturas de oleaje mostradas mantienen valores menores incluso a 1 m, demostrando el nivel de abrigo que se tiene en la zona de la bahía.

El oleaje tiende abruptamente a cero en la vecindad de la bocana, como en el caso anterior.

Tabla 30 Resultados de Caso II en oleaje ordinario

Oleaje Ordinario. Caso II			
Oleaje Incidente (H0) [m]	2	T [s]	9
Región	Zona Turbulenta	Canal de aproximación	Recinto Interior
Cp (máx.)	0.2184	0.2834	0.0337
Oleaje Propagado (H1) [m]	0.4368	0.5668	0.0674

5.6.4.4 Oleaje de Tormenta

Las condiciones extremas de tormenta fueron:

Caso	Periodo [s]	Altura de Ola [m]	Dirección del Oleaje
1	11	4	W
2	13	9	SW

Estos datos fueron obtenidos también del Atlas de Clima Marítimo.

Caso I

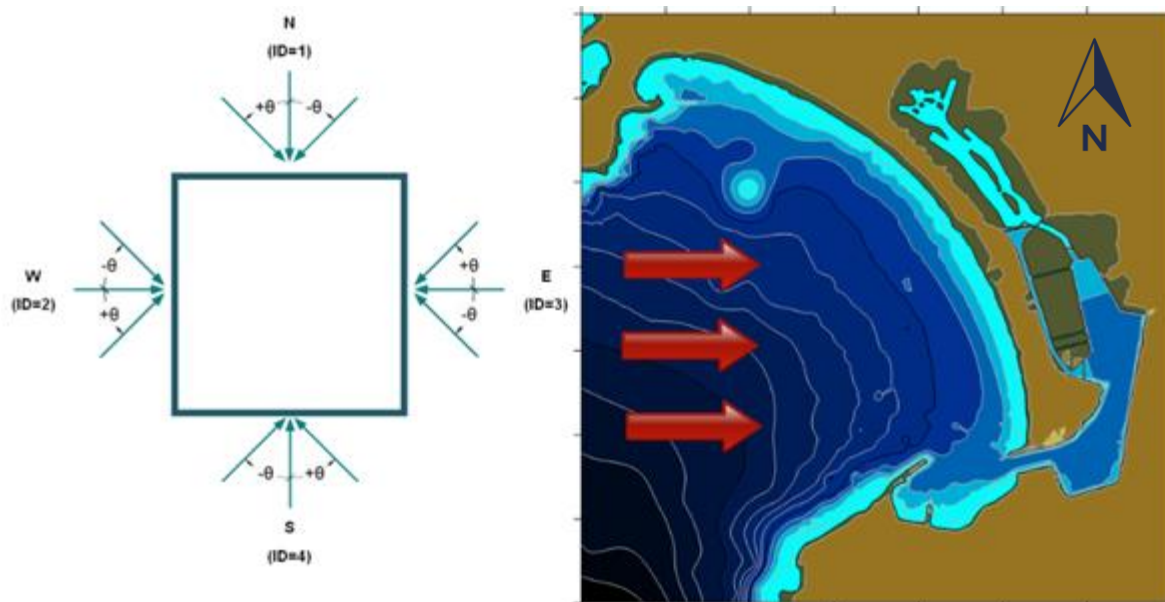


Fig. 5.3. 35 Dirección de oleaje incidente para Caso I de tormenta

De acuerdo con la información del software WAPO_V4, la frontera de propagación del oleaje **corresponde al ID 2, con un ángulo de Incidencia $\theta=0^\circ$.**

Resultados.

Este caso es muy similar al Caso 1 de oleaje normal por el ángulo de incidencia. Dado que lo único que se ve modificado en este caso es el periodo y altura de la ola, los resultados deberían de ser similares

En primera instancia, no se pueden apreciar tan fácilmente las líneas que delatan la incidencia del oleaje debido a que presenta mucho mayor turbulencia que el Caso 1 de oleaje normal. Se puede apreciar esto al observar que, dentro de la escala de color el verde indica coeficientes de propagación entre 1.3 y 1.6, y este color ocupa gran parte de la bahía.

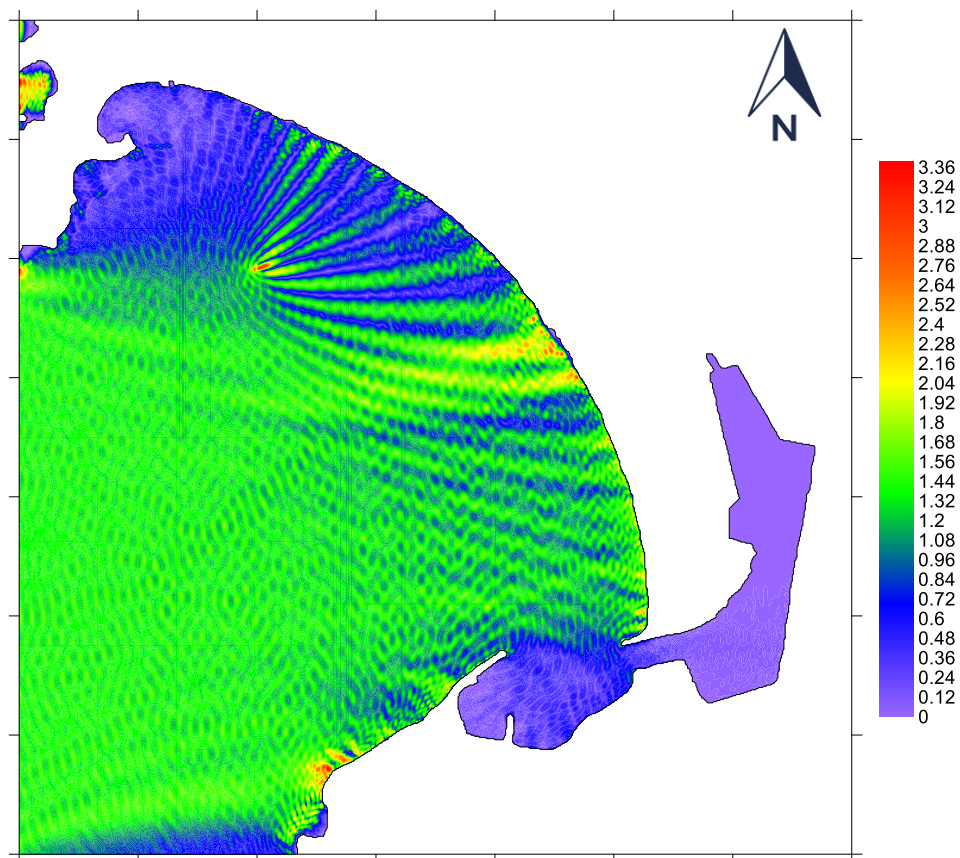


Fig. 5.3. 36 Propagación del oleaje en el caso I de oleaje en tormenta

Una vez más, se observa la importante protección que brinda el rompeolas externo, atenuando el oleaje proveniente del Este. En este caso es visualmente más claro este efecto, gracias a la escala gráfica que se puede apreciar.

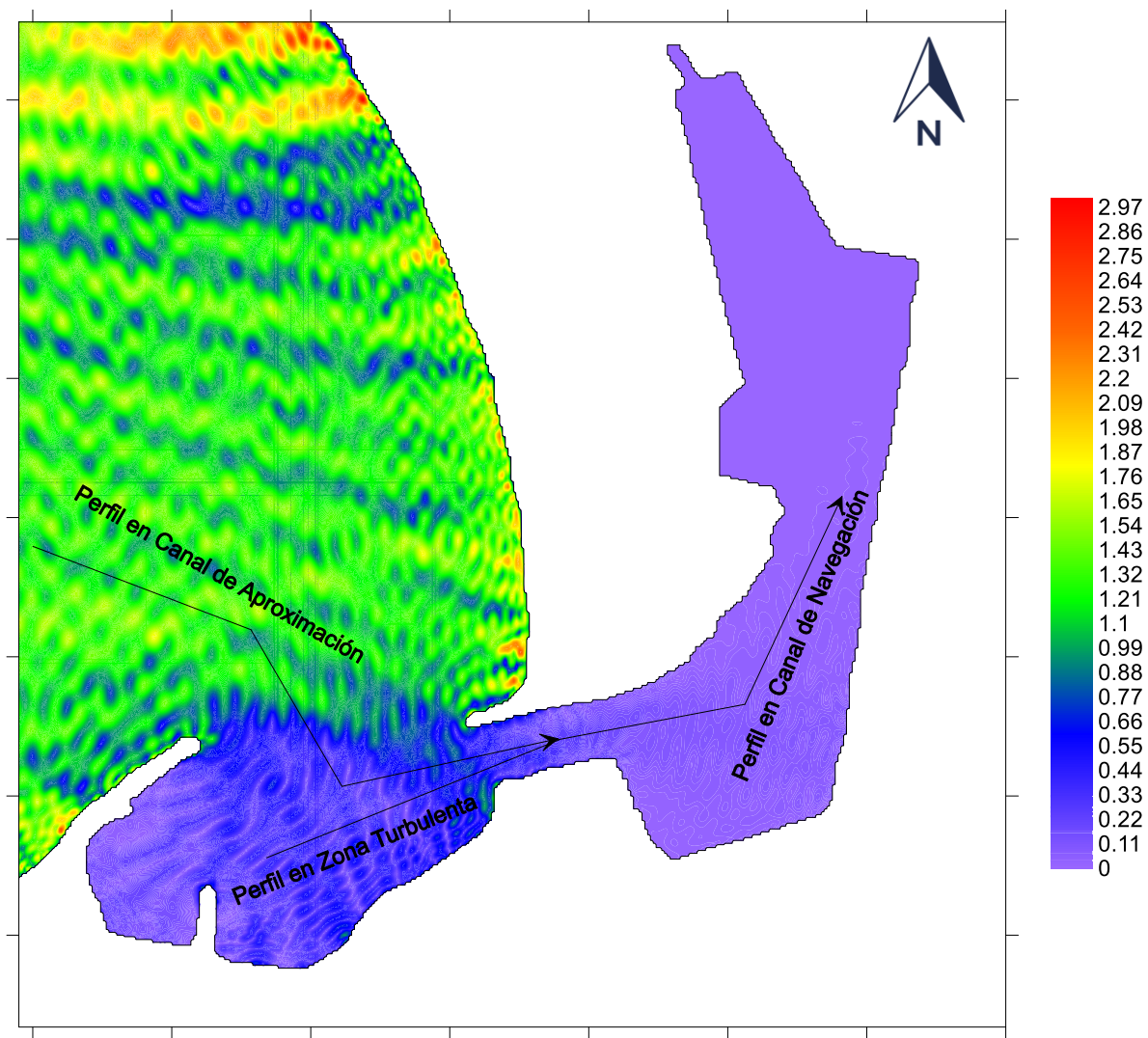


Fig. 5.3. 37 Propagación del oleaje en la zona de interés

Se observa claramente que la zona del recinto interior permanece en calma, aunque en la bocana de acceso parece concentrarse la turbulencia remanente del oleaje propagado. Los perfiles mostrados nos permiten obtener conclusiones más acertadas.

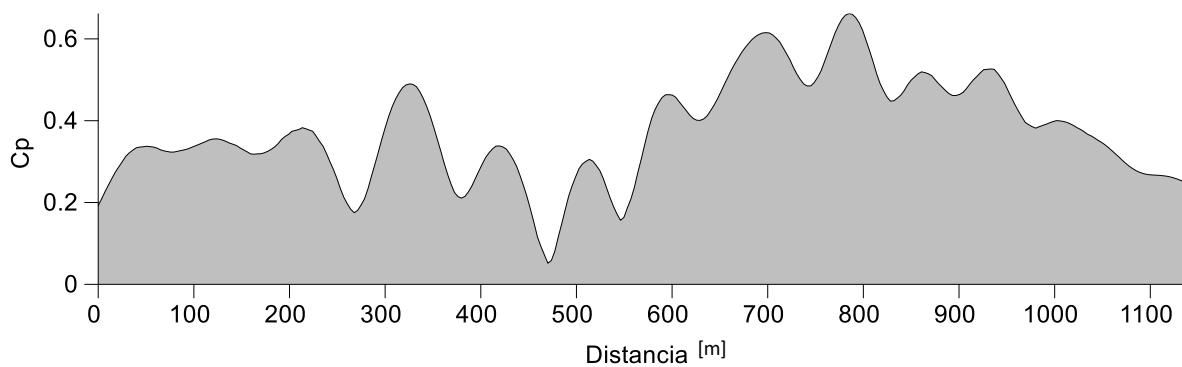


Fig. 5.3. 38 Coeficiente de Propagación en ruta de aproximación

De igual forma, aunque la zona turbulenta presenta, valga la redundancia, turbulencia, los valores encontrados del Coeficiente de Propagación son menores a 1, por lo que encontramos que, en efecto, esta zona se encuentra protegida del temporal que se estudia.

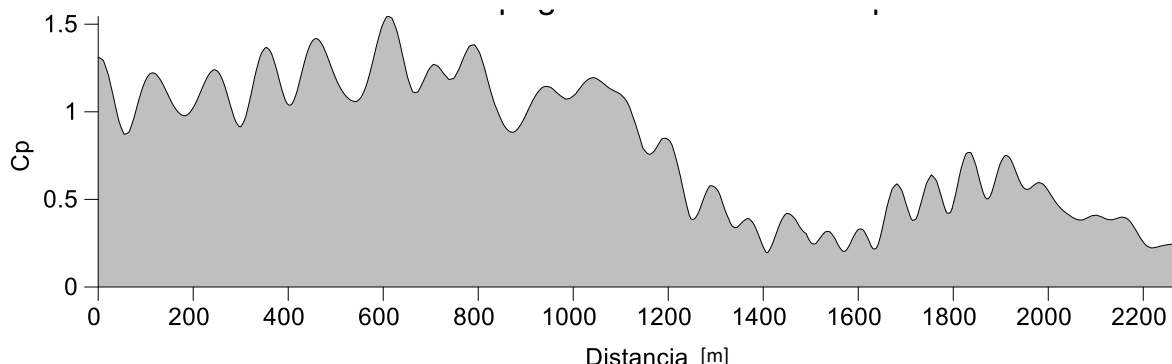


Fig. 5.3. 39 Coeficiente de Aproximación en Canal de acceso

La zona de aproximación desde la bahía, muestra una media de C_p mayor a 1, por lo que parece indicar amplificación del oleaje en esta zona. Sin embargo, se aprecia claramente el cruce de la frontera entre el área de la bahía y el área protegida por el rompeolas, alrededor de los 1000-1200 m, en donde el Coeficiente de propagación registra una caída drástica en los valores que presenta y nunca vuelve a alcanzar un valor mayor o igual a 1.

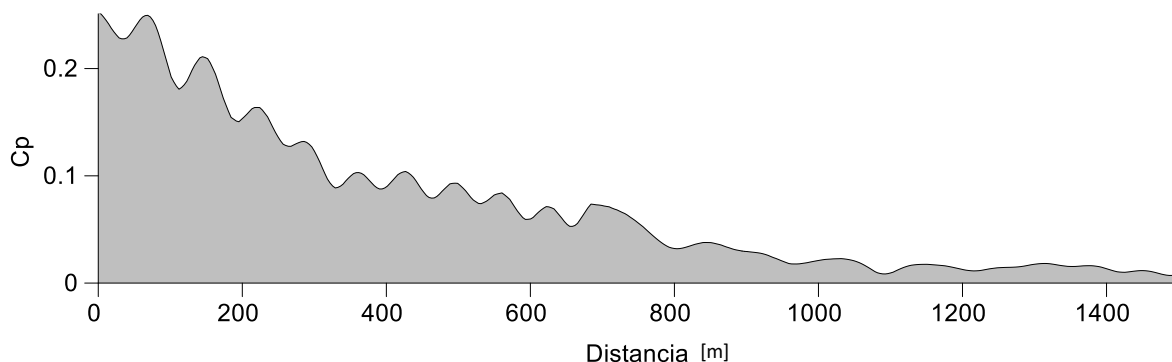


Fig. 5.3. 40 Coeficiente de Propagación en canal de navegación

Por último, una vez más se encuentra que el recinto interior mantiene niveles de oleaje cercanos a cero, brindando, en teoría, la capacidad de operar durante la tormenta. Esta capacidad de operación, es, por supuesto, considerando solamente al oleaje dentro del puerto, ya que los vientos generados por el temporal deben ser considerados.

Se puede observar en la gráfica de superficie libre del oleaje, cómo los valores máximos se encuentran fuera del área de abrigo del rompeolas externo, además de apreciar claramente la atenuación.

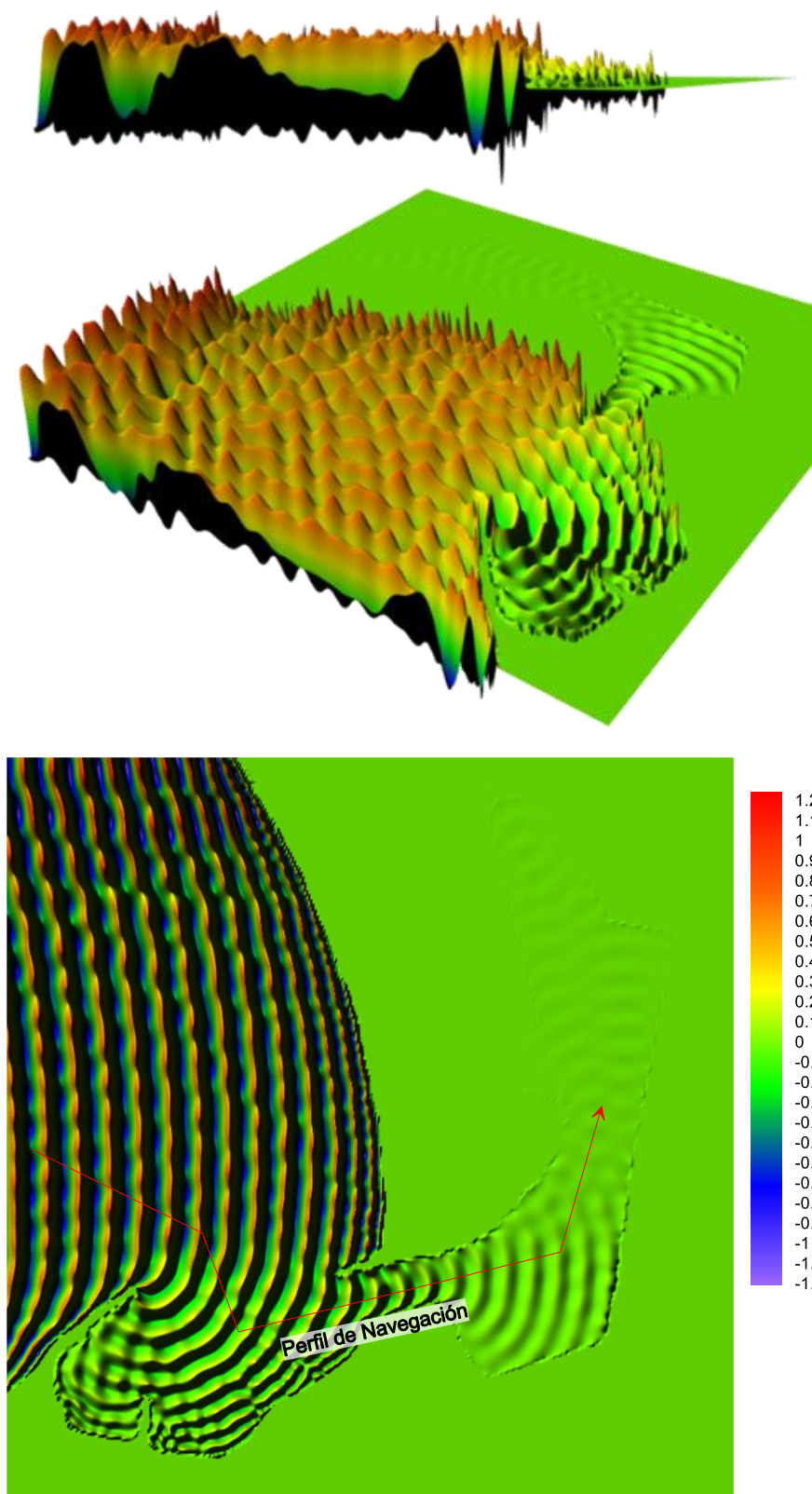


Fig. 5.3. 41 Representación de la superficie libre en esta condición del oleaje

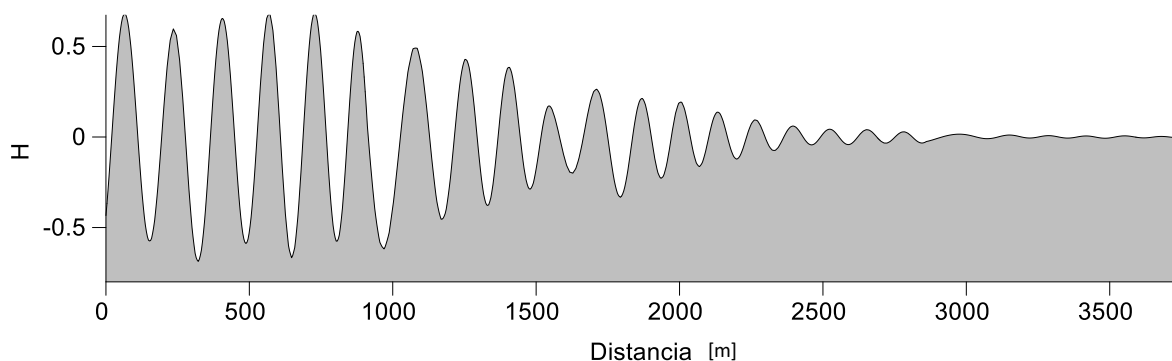


Fig. 5.3. 42 Altura de superficie libre

El perfil obtenido del archivo de superficie libre de oleaje muestra una vez más las condiciones de poca agitación que el puerto mantiene dentro de sus instalaciones. Este perfil solo es para visualizar este efecto.

Aunque solo se observan olas de máximo 0.6 m, es importante resaltar que no necesariamente es la ola máxima que se alcanzará. Es por eso que se usan los valores obtenidos de los perfiles de coeficiente de propagación, como se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 31 Resultados de oleaje para Caso I en oleaje extraordinario

Oleaje Extraordinario. Caso I			
Oleaje Incidente [m]	4	T [s]	11
Región	Zona Turbulenta	Canal de aproximación	Recinto Interior
Cp (máx.)	0.661939	1.543945	0.25278
Oleaje Propagado [m]	2.647757	6.17578	1.011121

Estos datos resaltan que, a pesar de que en las gráficas mostradas parece haber relativa calma en las zonas protegidas, hay zonas dentro de las cuales los valores del oleaje son importantes, como en la Zona Turbulenta, donde puede haber olas de hasta 2.65 m, así como la bocana de acceso al puerto interior, donde puede haber olas de hasta 1 m de altura.

Estos valores deberán usarse en conjunto con los perfiles obtenidos para determinar los puntos de mayor riesgo.

Caso II

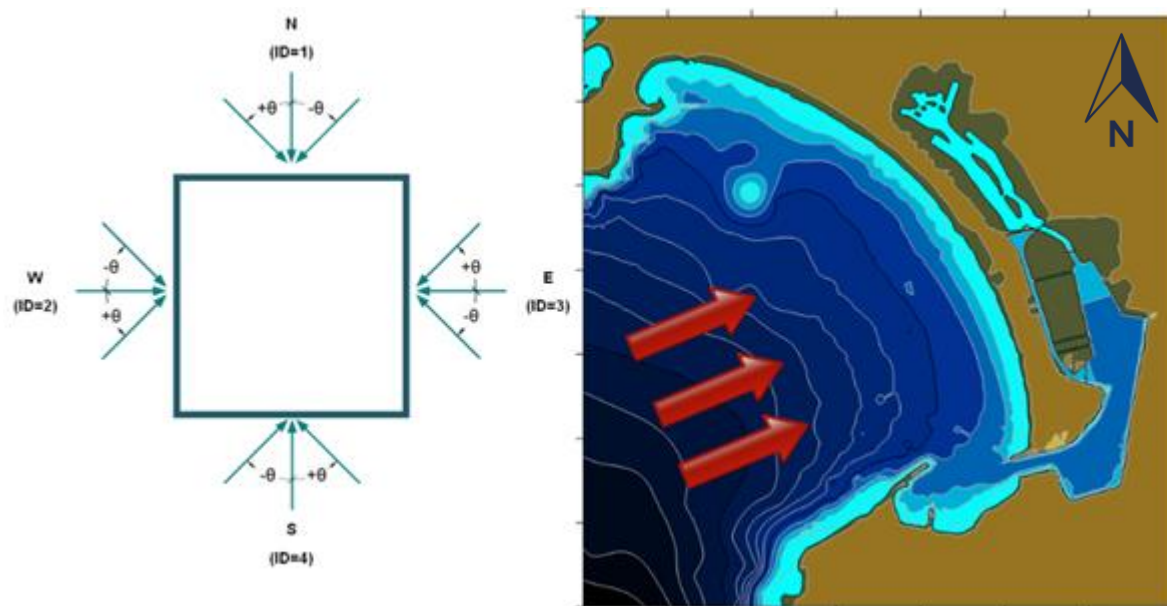


Fig. 5.3. 43 Incidencia del oleaje para el Caso II de tormenta

De acuerdo con el oleaje incidente, los datos a introducir en el software WAPO serían **Frontera de propagación ID=2**, mientras que el **Angulo de incidencia sería $\theta=22.5^\circ$** .

Resultados.

A pesar de tener las peores condiciones del oleaje, este caso resulta tener muy buenos niveles de propagación, debido en gran parte a la dirección del oleaje incidente. Al ser paralelo al eje de la bocana de acceso y casi paralelo al rompeolas exterior, es muy poco el oleaje que se propaga dentro de la zona turbulenta, como se puede observar a continuación.

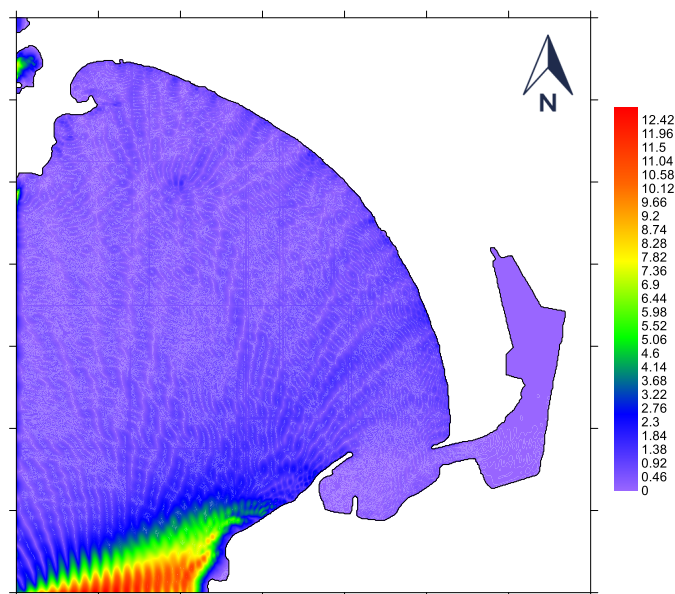


Fig. 5.3. 44 Propagación del oleaje en la bahía para este caso de estudio

Los elevados valores de propagación que se observan en la parte inferior del gráfico se deben a que en esta zona el oleaje entra sin ningún obstáculo, y al ser otra península los esfuerzos de rotura se concentran y amplifican considerablemente.

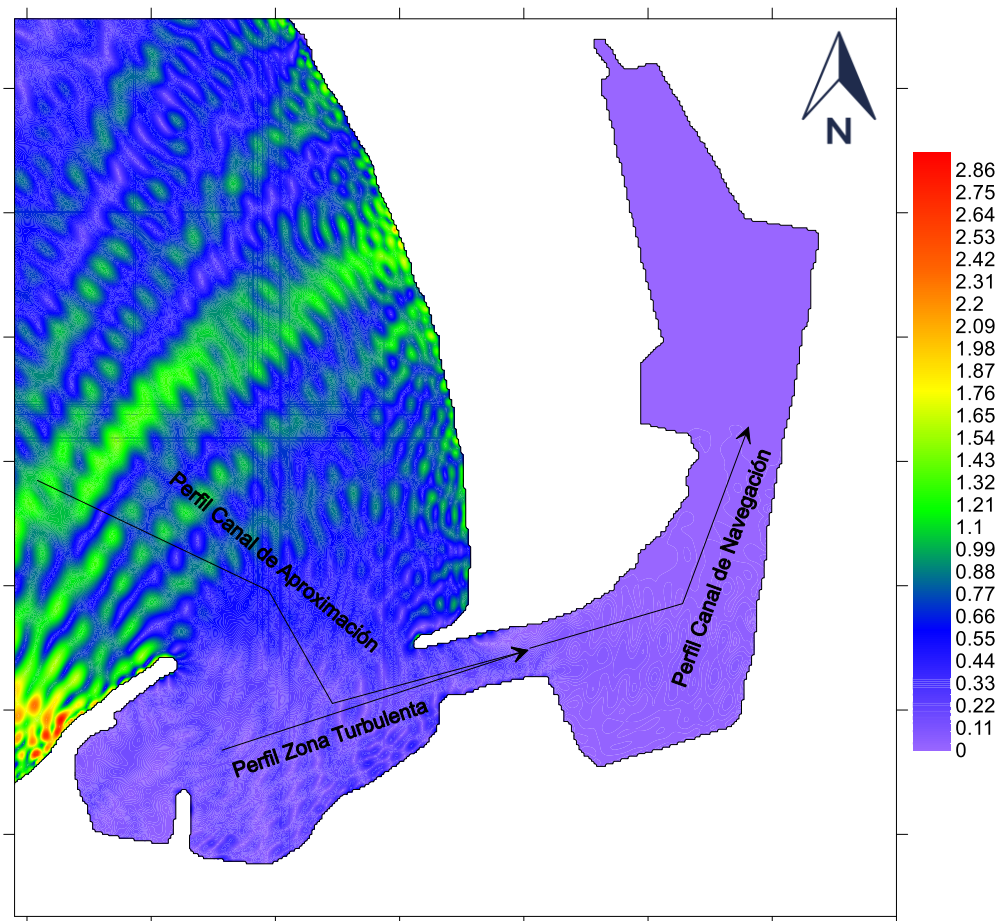


Fig. 5.3. 45 Propagación del oleaje en el área de interés

Se observa como los valores máximos del C_p se encuentran en el lado de altamar del rompeolas, lo cual confirma la protección que este brinda al resto del Puerto.

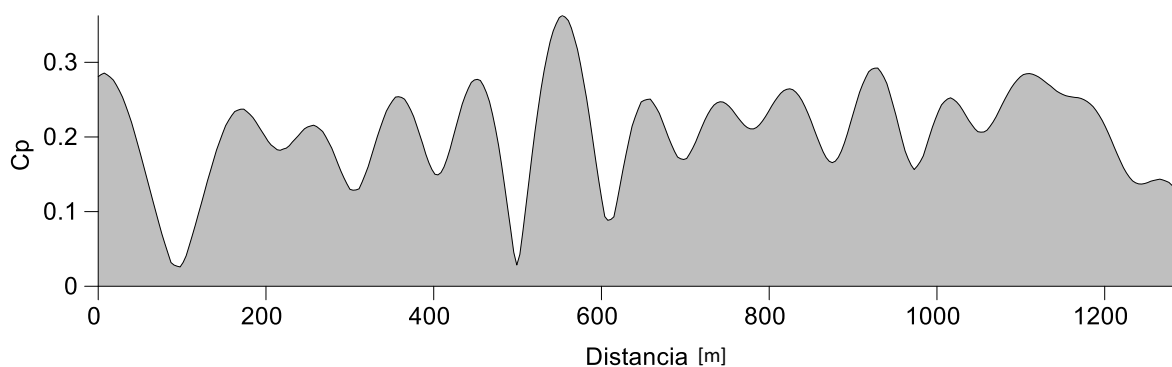


Fig. 5.3. 46 Coeficiente de Propagación en zona turbulenta

La variación del coeficiente de propagación en la zona turbulenta tiene una longitud entre máximos mayor a los casos anteriores, lo cual es congruente con el periodo de oleaje que se presenta en este

caso (13 s). Sin embargo, en comparación con los valores máximos alcanzados en el caso anterior, estos son menores a los alcanzados en casos anteriores, siendo el mayor en este perfil de 0.36.

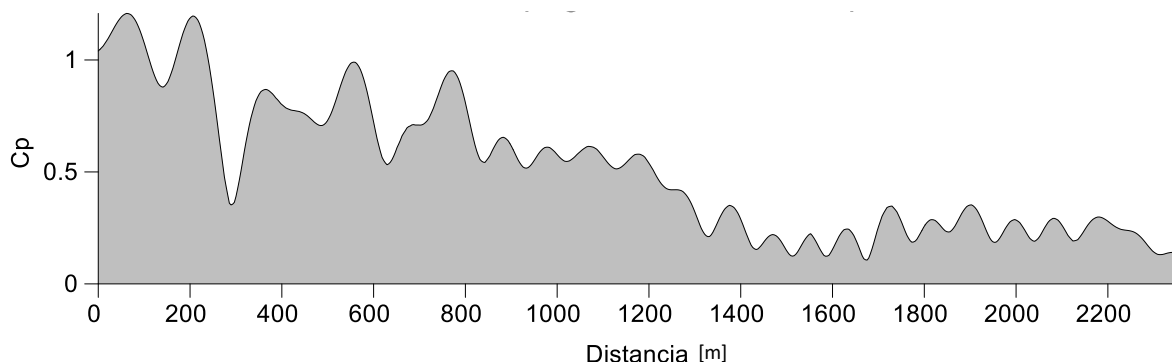


Fig. 5.3. 47 Coeficiente de Propagación en canal de acceso

Al igual que en la zona turbulenta, los valores máximos que se presentan son menores que en los casos anteriores, teniendo que el punto máximo alcanza un valor de 1.2. Aquí también es posible encontrar a simple vista, con relativo éxito, el cruce de la frontera entre las aguas protegidas del puerto y las aguas de la bahía, alrededor de 1200 m.

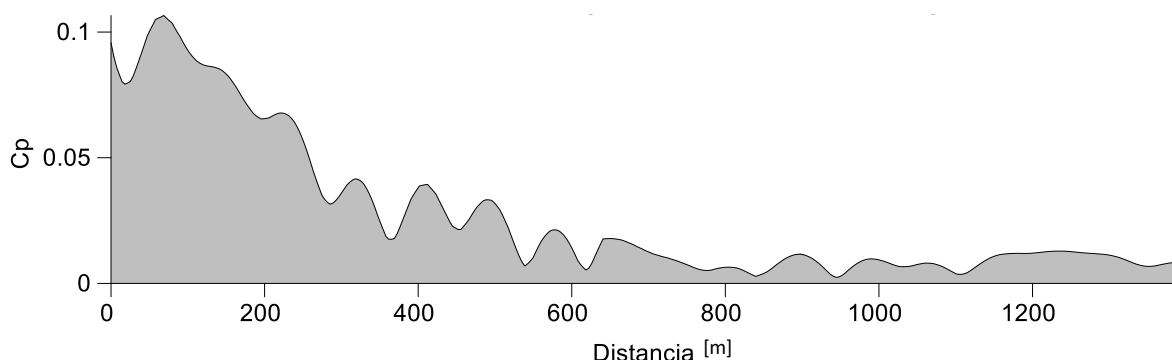


Fig. 5.3. 48 Coeficiente de Propagación en canal de navegación

En el canal de navegación y la bocana de acceso al recinto interior se mantienen las óptimas condiciones que hemos encontrado a lo largo de los 4 casos estudiados. Sin embargo, este caso es el que presenta las mayores variaciones en la propagación, ya que no tiende uniformemente a cero.

A pesar de que el ángulo de incidencia es el de menor riesgo, esta no-uniformidad probablemente sea debida a las condiciones particulares de este caso de tormenta, específicamente, al periodo y a la altura del oleaje.

Observando las gráficas de superficie libre de oleaje, podemos hacernos una mejor idea de lo sucedido.

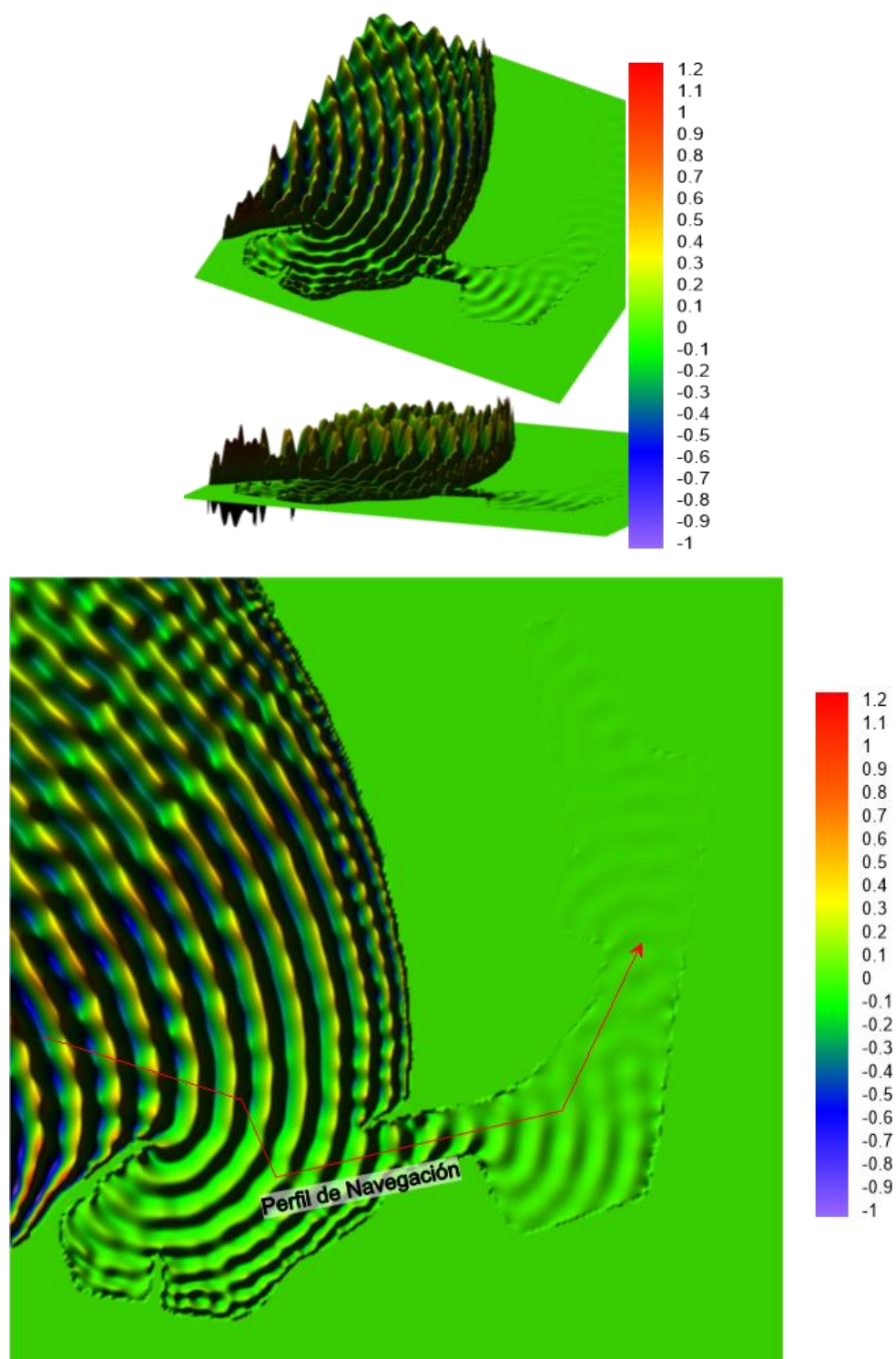


Fig. 5.3. 49 Representación de la superficie libre, generada por el programa Surfer con datos del programa WAPO

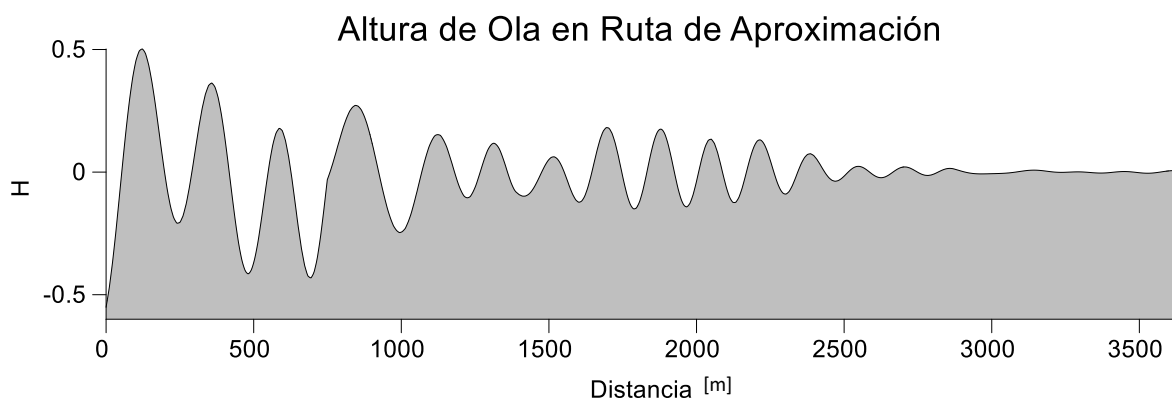


Fig. 5.3. 50 Altura de ola en ruta de aproximación

Es notable una vez más la separación entre las crestas, siendo alrededor de 250 m, y también la calma dentro de la zona protegida del recinto.

Tabla 32 Resultados de oleaje para el Caso II de oleaje extraordinario

Oleaje Extraordinario. Caso II			
Oleaje Incidente [m]	9	T [s]	13
Región	Zona Turbulenta	Canal de aproximación	Recinto Interior
Cp (máx.)	0.362746	1.207978	0.106589
Oleaje Propagado [m]	3.264713	10.8718	0.959303

A pesar de que los valores del coeficiente de propagación máxima no son los mayores de todos los casos, los valores de oleaje propagado en la Zona Turbulenta y el Canal de Aproximación sí son los valores más altos, debido principalmente a la altura del oleaje incidente.

5.6.5 Conclusiones

Se presenta una tabla resumen con los valores de oleaje y coeficiente de propagación máxima.

Tabla 33 Resultados para cada condición estudiada en el Puerto de Manzanillo

Caso	Parámetros			Zona Turbulenta	Canal de Aproximación	Canal de Navegación
Ordinario I	Periodo [s]	7	Cp	0.5271	1.038	0.0467
	Altura [m]	1	Oleaje Propagado [m]	0.5271	1.038	0.0467
	Angulo [°]	0				
Ordinario II	Periodo [s]	8	Cp	0.2184	0.2834	0.0337
	Altura [m]	2	Oleaje Propagado [m]	0.4368	0.5668	0.0674
	Angulo [°]	-22.5				
Tormenta I	Periodo [s]	11	Cp	0.661939139	1.543944901	0.252780338
	Altura [m]	4	Oleaje Propagado [m]	2.647756554	6.175779604	1.01112135
	Angulo [°]	0				
Tormenta II	Periodo [s]	13	Cp	0.362745838	1.207978108	0.106589228
	Altura [m]	9	Oleaje Propagado [m]	3.264712546	10.87180297	0.959303052
	Angulo [°]	22.5				

Los resultados obtenidos de la modelación numérica del oleaje incidente en el puerto de Manzanillo demuestran de manera contundente un hecho conocido empíricamente desde la fundación del puerto: la protección natural de la que se ve beneficiado el puerto por su localización le brinda condiciones inmejorables para su actividad, en el sentido de la agitación del oleaje.

Las condiciones de poca agitación en las aguas del interior del puerto difícilmente podrían haber sido alcanzadas en un área más expuesta, además de requerir la construcción de obras de protección de mayores dimensiones y, por ende, mucho más costosas.

Sin embargo, aunque el mínimo oleaje en el interior del puerto es un beneficio innegable, la misma ubicación geográfica que lo protege también acarrea una serie de problemas importantes:

- Gran cantidad de transporte litoral, debido al sistema lagunar existente. Esto acarrea la necesidad de realizar dragados de mantenimiento con una frecuencia muy alta, comparativamente con respecto a otros puertos de altura mexicanos.
- El impacto ambiental sobre el ecosistema lagunar es irreversible. Aunque se han tomado medidas de mitigación y se ha minimizado dentro de lo posible este impacto, el daño causado no puede ser reparado debido a la fragilidad del ecosistema.

6 CONCLUSIONES

La resonancia y agitación en los puertos es un problema geométrico, el cual tiene origen en los principios básicos de reflexión, refracción y periodos de una onda al propagarse en un medio.

Este problema es de suma importancia, ya que representa tiempo de operación para un Puerto, factor determinante en su rendimiento económico. En los casos más graves, puede incluso provocar el reacomodo de las obras de protección o la construcción de nuevas áreas, dejando sin utilizar infraestructura ya construida, algo indeseable debido a que solo la inversión inicial para construir un Puerto es considerable.

Es por esto que siempre es necesario hacer modelaciones numéricas, y de ser posible hacer modelaciones físicas a escala de las aéreas portuarias a construir, usando toda la información disponible del proyecto. Las primeras modelaciones corresponden a geometrías de Puerto más generales y conocidas, como lo son de ampliación interior (forma "P"), de dos secciones interiores (forma "Y") y de sección interior sencilla (forma "U"), esta última siendo la más común. Se agregaron obras de abrigo en diferentes posiciones como son paralelas a la costa, perpendiculares a la costa, brazo de abrigo a 45° y -45° , combinando las modelaciones con diferentes ángulos de incidencia de oleaje y con ello generando casos a modelar.

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar la información determinando bajo qué condiciones de oleaje son más vulnerables las geometrías, con qué tipo de estructuras de protección son más eficientes, así como las más desfavorables. Uno de los principales aprendizajes obtenidos a partir de este trabajo, es la confirmación de que ningún caso o situación es igual a otro. Si bien, es cierto que en ciertas ocasiones existen similitudes, siempre será necesario llevar a cabo estudios específicos que determinen los riesgos reales de ocurrencia de agitación y resonancia en un nuevo desarrollo portuario.

Gracias a los resultados encontrados en este trabajo de tesis, un futuro proyectista puede comenzar sus diseños tomando en cuenta el periodo del oleaje en el sitio de proyecto, y proponiendo una geometría adecuada siguiendo las gráficas de propagación que aquí se han presentado.

Observar los valores de los coeficientes de propagación, comparado con las condiciones de oleaje que el proyectista tenga, puede darle una idea sobre la geometría más adecuada que disminuya los riesgos de agitación y resonancia.

La propuesta de utilizar los datos presentados como guía pueden ayudar a reducir los tiempos necesarios para encontrar las mejores condiciones geométricas con respecto a la agitación portuaria, debido a que los valores presentados permiten tomar una línea de aproximación en donde el diseñador puede escoger la geometría más adecuada para un periodo similar al que tiene, realizando los cálculos pertinentes para determinar si, efectivamente, la geometría seleccionada no presenta una elevada vulnerabilidad ante la resonancia

De los casos tipo analizados, se observa que la mejor protección encontrada es aquella con brazos a 45° . Para los casos de geometría P y U, con esta protección se registraron los Coeficientes de Propagación más bajos, además de que, para estas geometrías, en ambos periodos se registran 4 casos con C.P. menor a 1, y el único desfavorable es en promedio menor a 1.5.

Esto indica una excelente protección contra la propagación del oleaje en el interior del recinto, además de que brinda una inmejorable base para optimizar las protecciones y áreas interiores.

También, un diseñador puede observar que la protección lateral es poco recomendable en general, por lo menos para las condiciones geométricas que se tienen, ya que en todos sus casos presenta CP mayores a 1, por lo cual no se recomienda construir una configuración de este tipo bajo dichas

condiciones. Existe la posibilidad de que esto cambie si se modifican las dimensiones interiores, exteriores, o ambas.

Por último, tenemos el puerto en forma “Y”, de nueva cuenta se presenta en forma general las mismas condiciones desfavorables para la protección perpendicular a la costa y paralela, sólo que en esta condición el coeficiente de propagación más alto se presenta cuando tenemos la protección de brazo con un ángulo de incidencia de 45° . Para esta geometría la protección de brazo no es tan eficiente cuando tenemos oleaje de periodo de 5 [s], en general su comportamiento no es tan eficiente como en los casos anteriores, lo que nos indica que esta geometría es de mayor vulnerabilidad a este fenómeno.

Estas observaciones permiten reducir horas de trabajo en busca de opciones geométricas para nuevos desarrollos portuarios. La utilización de herramientas para el procesamiento de los datos permite dar confiabilidad a los resultados, ya que con una simple limpieza de los datos al programa permite su análisis y obtener datos de las condiciones reales que pueden llegar a presentarse.

BIBLIOGRAFÍA

- *“Manual de Dimensionamiento Portuario”*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2001.
- *“Manual de Apuntes de la Experiencia Educativa de Puertos y Obras Marítimas”*, Jiménez Terán, José Manuel; Cedano Ortiz, Arturo; Castillo González, Eduardo; Méndez Ramírez, Tochtli Ce; Nolasco Trujillo, Juan Gabriel; Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, México, 2010.
- *“Technical Standards and commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan”*, Ports and Harbours Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, National Institute for Land and Infrastructure Management, Port and Airport Research Institute, Japón, 2009.
- *“Port Designer’s Handbook”*, 3ra Ed, Thoresen, Carl A, Reino Unido, 2014.
- *“Port Engineering”*, Liu, Zhou; Burcharth, Hans Falk, Universidad de Aalborg, 1999.
- *“Manual del usuario y documento de referencia del programa MWAPO4”*, Silva Casarín, Rodolfo; Instituto de Ingeniería UNAM, 2010.
- *“Análisis y descripción estadística del oleaje”*, Silva Casarín, Rodolfo; Serie de Docencia Instituto de Ingeniería UNAM; 2005.
- *“Manual de Diseño de Obras Civiles, Obras Marítimas”*, Comisión Federal de Electricidad, México, 2014.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Movimiento de carga en puertos, 1994-2006	13
Tabla 2. Escala de Beaufort	25
Tabla 3. Recomendaciones de ancho de bocana, MDP de SCT 2001	28
Tabla 4. Comparativa de manuales de diseño de diferentes países.....	35
Tabla 5. Casos a modelar con geometría, periodo, ángulo de incidencia de oleaje y altura de ola. 65	
Tabla 6. Valores de Coeficientes de Propagación para casos modelados.....	69
Tabla 7. Valores máximos del coeficiente de propagación.	73
Tabla 8. Valores máximos del Coeficiente de Propagación.....	78
Tabla 9. Valores máximos del Coeficiente de Propagación.....	87
Tabla 10. Valores máximos del coeficiente de propagación	90
Tabla 11. Valores máximos del Coeficiente de Propagación.....	96
Tabla 12. Valores máximos del Coeficiente de Propagación.....	101
Tabla 13. Coeficientes de propagación máximos obtenidos de los casos modelados	107
Tabla 14. Coeficientes de propagación máximos obtenidos para los casos modelados	114
Tabla 15. Coeficientes de Propagación máximos obtenidos para los casos modelados	122
Tabla 16. Coeficientes de Propagación máximos obtenidos para los casos modelados	128
Tabla 17. Tabla de muelles, antiguo Puerto de Veracruz.....	144
Tabla 18. Destinos principales de mercancía de importación.	145
Tabla 19. Porcentajes de demanda de movimiento de carga	146
Tabla 20. Crecimiento de carga respecto a la demanda estimada.	146
Tabla 21. Dimensiones de las generaciones de barcos existentes	148
Tabla 22. Inversión para la construcción y empleos generados	151
Tabla 23. Datos generales entre el puerto existente, ampliación y totales	151
Tabla 24. Tabla de datos con los casos para condiciones normales de oleaje.....	154
Tabla 25. Tabla de datos con los casos para condiciones de oleaje de tormenta	154
Tabla 26. Infraestructura del Puerto de Manzanillo	168
Tabla 27. Concesionarios en el Puerto de Manzanillo	169
Tabla 28 Casos modelados en condiciones de Oleaje normal.....	179
Tabla 29 Tabla de resultados, Caso I.....	184
Tabla 30 Resultados de Caso II en oleaje ordinario	190
Tabla 31 Resultados de oleaje para Caso I en oleaje extraordinario	196
Tabla 32 Resultados de oleaje para el Caso II de oleaje extraordinario	201
Tabla 33 Resultados para cada condición estudiada en el Puerto de Manzanillo.....	201

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Puerto moderno (izq); restos de antiguo puerto (der)	11
Figura 1. 2 Alejandría en la antigüedad.....	11
Figura 1. 3 Alejandría moderna	12
Figura 1. 4 Escudo de la Coordinación de Puertos y Marina Mercante	13
Figura 1. 5 Puerto de Miami	15
Figura 1. 6 Portaaviones de puerto militar.....	15
Figura 1. 7 Puerto industrial	16
Figura 1. 8 Portada del Manual de Dimensionamiento Portuario de SCT	18
Figura 1. 9 Esquema general de las áreas de agua según el MDPSCCT	20
Figura 2. 1. Organizaciones e instituciones con manuales y guías de diseño portuario.....	23
Figura 2. 2. Rosa de vientos, con escala de beaufort [port's Designer Handbook Thoresen. 3ed] ..	25
Figura 2. 3. Escala de Beaufort y su relación con la intensidad de viento y la intensidad media.....	26
Figura 2. 4. Aspectos que influyen en el diseño de obras de abrigo y orientación de bocana, SCT 2001	27
Figura 2. 5. Factores que influyen en la orientación de la bocana	28
Figura 2. 6. Formas de dragado para canales de acceso (Thorensen, 2014)	29
Figura 2. 7. Squat de un barco, SCT 2001.....	30
Figura 2. 8. Estructura del Manual de Diseño Japonés	31
Figura 3. 1. Representación diversas formas de onda	41
Figura 3. 2. Partes que conforman una onda	42
Figura 3. 3. Clasificación de ondas por periodo (Kinsman 1965).....	44
Figura 3. 4. Efecto de refracción en una bahía	45
Figura 3. 5. Refracción de oleaje en costa.....	46
Figura 3. 6. Difracción de oleaje en una estructura de abrigo	47
Figura 3. 7. Puerto Chile destruido por efectos de resonancia.....	49
Figura 3. 8. Barcos dañados a causa de resonancia	49
Figura 3. 9. Modelo a escala, Laboratorio del Instituto Mexicano del Transporte.....	52
Figura 3. 10. Construcción de coraza de rompeolas con Core-Loc.....	52
Figura 4. 1. Perfil idealizado de la zona rompiente, para el modelo de disipación de rotura, (Dally, Dean et all. 1985).....	57
Figura 4. 2. Documento de ingreso de datos para el programa	59
Figura 4. 3. Archivo de casos	60
Figura 5. 1. Puerto de Brownsville	63
Figura 5. 2. Puerto de Manzanillo	63
Figura 5. 3. Puerto Chiapas.....	64
Figura 5. 4. Geometrías básicas a modelar, en función de la longitud de onda.....	64
Figura 5. 5. Geometría del caso de estudio.....	69
Figura 5. 6. Grafica CP vs Ángulo de incidencia de oleaje	70
Figura 5. 7. Resultados AMP graficado en surfer.....	71
Figura 5. 8. Perfil de los CP por el canal de acceso	71
Figura 5. 9. Resultados SUP graficado en surfer	71
Figura 5. 10. Resultados AMP graficado en surfer.....	72

Figura 5. 11. Resultados SUP graficado en surfer	72
Figura 5. 12. Perfil del Coeficiente de Propagación	72
Figura 5. 13. Modelo GRID del caso teórico	73
Figura 5. 14. Comparación de C.P. vs Angulo de Incidencia para ambos periodos	74
Figura 5. 15. Perfil del CP	75
Figura 5. 16. Resultados AMP graficado en surfer.....	75
Figura 5. 17. Resultados SUP graficado en surfer	75
Figura 5. 18. Resultados AMP graficado en surfer.....	76
Figura 5. 19. Resultados SUP graficado en surfer	76
Figura 5. 20. Perfil del CP	76
Figura 5. 21. Resultados AMP graficado en surfer.....	77
Figura 5. 22. Perfil del CP	77
Figura 5. 23. Resultados SUP graficado en surfer	77
Figura 5. 24. Representación en GRID del modelo teórico	78
Figura 5. 25. Gráfica de C.P. vs Angulo de incidencia para ambos periodos.....	79
Figura 5. 26. Resultados AMP graficado en surfer.....	80
Figura 5. 27. Perfil del CP	80
Figura 5. 28. Resultados SUP graficado en surfer	80
Figura 5. 29. Resultados AMP graficado en surfer.....	81
Figura 5. 30. Resultados SUP graficado en surfer	81
Figura 5. 31. Perfil del CP	81
Figura 5. 32. Representación en GRID del modelo teórico	82
Figura 5. 33. Gráfica del CP vs Angulo de incidencia para ambos periodos.....	82
Figura 5. 34. Amplitud (izq) y superficie libre (der)	84
Figura 5. 35. Perfil del CP	84
Figura 5. 36. Amplitud (izq) y superficie libre (der)	85
Figura 5. 37. Perfil del CP	85
Figura 5. 38. Amplitud (izq) y superficie libre (der)	86
Figura 5. 39. Perfil del CP	86
Figura 5. 40. Representación en GRID del modelo teórico	87
Figura 5. 41. Gráfica CP vs Angulo de incidencia para ambos periodos	88
Figura 5. 42. Resultados AMP graficado en surfer.....	89
Figura 5. 43. Resultados SUP graficado en surfer	89
Figura 5. 44. Perfil del CP	89
Figura 5. 45. Representación GRID del modelo teórico	90
Figura 5. 46. Gráfica CP vs Amplitud de oleaje para ambos periodos	91
Figura 5. 47. Resultados AMP graficado en surfer.....	92
Figura 5. 48. Resultados SUP graficado en surfer	92
Figura 5. 49. Perfil del CP	92
Figura 5. 50. Resultados AMP graficado en surfer.....	93
Figura 5. 51. Resultados SUP graficado en surfer	93
Figura 5. 52. Perfil del CP	93
Figura 5. 53. Perfil del CP	94
Figura 5. 54. Resultados AMP graficado en surfer.....	94

Figura 5. 55. Resultados SUP graficado en surfer	94
Figura 5. 56. Perfil del CP	95
Figura 5. 57. Resultados AMP graficado en surfer	95
Figura 5. 58. Resultados SUP graficado en surfer	95
Figura 5. 59. Representación GRID del modelo teórico	96
Figura 5. 60. Gráfica CP vs Angulo de incidencia para ambos periodos	97
Figura 5. 61. Resultados AMP graficado en surfer	98
Figura 5. 62. Perfil del CP	98
Figura 5. 63. Resultados SUP graficado en surfer	98
Figura 5. 64. Resultados SUP graficado en surfer	99
Figura 5. 65. Resultados AMP graficado en surfer	99
Figura 5. 66. Perfil del CP	99
Figura 5. 67. Resultados SUP graficado en surfer	100
Figura 5. 68. Resultados AMP graficado en surfer	100
Figura 5. 69. Perfil del CP	100
Figura 5. 70. Representación GRID del modelo teórico	101
Figura 5. 71. Gráfica CP vs Amplitud de oleaje para ambos periodos	102
Figura 5. 72. Amplitud (izq) y superficie libre (der)	103
Figura 5. 73. Perfil del CP	103
Figura 5. 74. Amplitud (izq) y superficie libre (der)	104
Figura 5. 75. Perfil del CP	104
Figura 5. 76. Amplitud (izq) y superficie libre (der)	105
Figura 5. 77. Perfil del CP	105
Figura 5. 78. Geometría Puerto tipo "Y"	106
Figura 5. 79. Gráfica CP vs Ángulo incidente de oleaje	107
Figura 5. 80. Resultados AMP graficados en surfer	111
Figura 5. 81. Perfil de CP por el canal de acceso	111
Figura 5. 82. Resultados SUP graficados en surfer	111
Figura 5. 83. Resultados SUP graficados en surfer	112
Figura 5. 84. Resultados AMP graficados en surfer	112
Figura 5. 85. Perfil de CP por el canal de acceso	112
Figura 5. 86. Resultados AMP graficados en surfer	113
Figura 5. 87. Perfil de Cp en el canal de acceso	113
Figura 5. 88. Resultados SUP graficados en surfer	113
Figura 5. 89. Resultados AMP graficados en surfer	108
Figura 5. 90. Perfil de CP para el canal de acceso	108
Figura 5. 91. Resultados SUP graficados en surfer	108
Figura 5. 92. Resultados AMP graficados en surfer	109
Figura 5. 93. Perfil de CP del canal de acceso	109
Figura 5. 94. Resultados SUP graficados en surfer	109
Figura 5. 95. Resultados AMP graficados en surfer	110
Figura 5. 96. Perfil de CP del canal de acceso	110
Figura 5. 97. Resultados SUP graficados en surfer	110
Figura 5. 98. Vista en planta rompeolas laterales	114

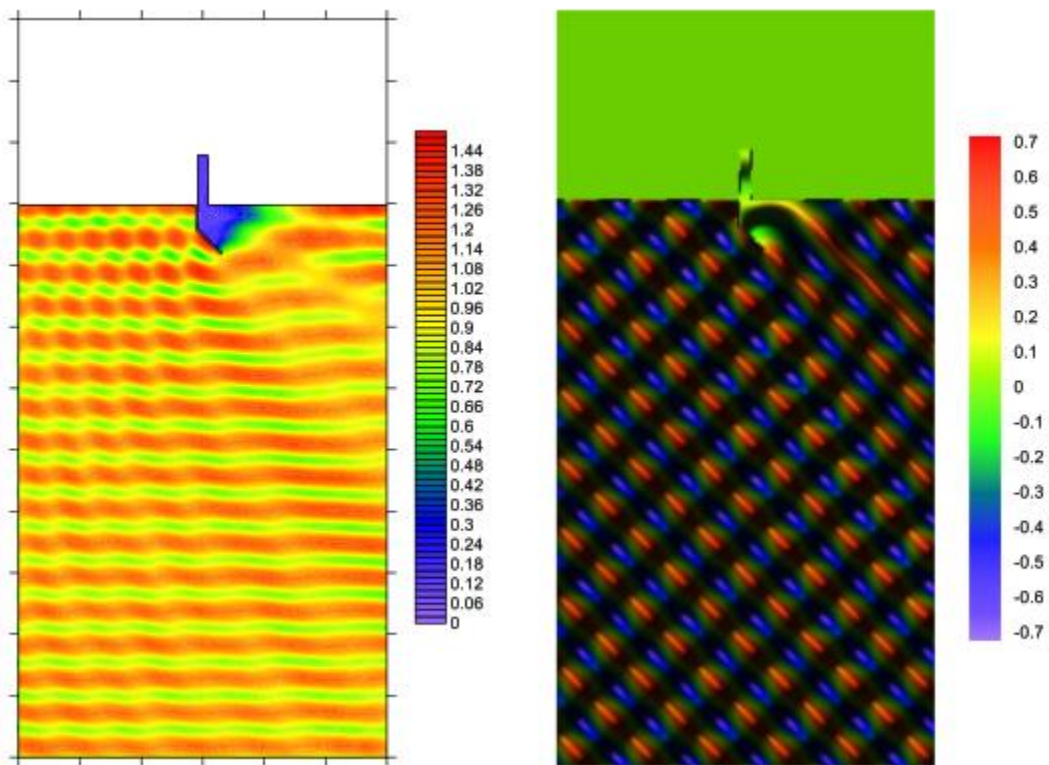
Figura 5. 99. Gráfica Cp vs Ángulo incidente de oleaje	115
Figura 5. 100. Resultados AMP graficados en surfer	116
Figura 5. 101. Perfil de CP del canal de acceso	116
Figura 5. 102. Resultados SUP graficados en surfer	116
Figura 5. 103. Resultados AMP graficados en surfer	117
Figura 5. 104. Perfil de CP del canal de acceso	117
Figura 5. 105. Resultados SUP graficados en surfer	117
Figura 5. 106. Resultados AMP graficados en surfer	118
Figura 5. 107. Perfil de CP del canal de acceso	118
Figura 5. 108. Resultados SUP graficados en surfer	118
Figura 5. 109. Resultados AMP graficados en surfer	119
Figura 5. 110. Perfil de CP del canal de acceso	119
Figura 5. 111. Resultados SUP graficados en surfer	119
Figura 5. 112. Resultados AMP graficados en surfer	120
Figura 5. 113. Resultados SUP graficados en surfer	120
Figura 5. 114. Perfil de CP del canal de acceso	120
Figura 5. 115. Resultados AMP graficados en surfer	121
Figura 5. 116. Resultados SUP graficados en surfer	121
Figura 5. 117. Perfil de CP del canal de acceso	121
Figura 5. 118. Vista en planta rompeolas paralelo a la costa	122
Figura 5. 119. Gráfica CP vs Ángulo incidente de oleaje	123
Figura 5. 120. Resultados AMP graficados en surfer	124
Figura 5. 121. Perfil de CP del canal de acceso	124
Figura 5. 122. Resultados SUP graficados en surfer	124
Figura 5. 123. Resultados AMP graficados en surfer	125
Figura 5. 124. Perfil de CP del canal de acceso	125
Figura 5. 125. Resultados SUP graficados en surfer	125
Figura 5. 126. Resultados AMP graficados en surfer	126
Figura 5. 127. Resultados SUP graficados en surfer	126
Figura 5. 128. Perfil de CP del canal de acceso	126
Figura 5. 129. Resultados AMP graficados en surfer	127
Figura 5. 130. Perfil de CP del canal de acceso	127
Figura 5. 131. Resultados SUP graficados en surfer	127
Figura 5. 132. Vista en planta, Puerto sin protección	128
Figura 5. 133. Gráfica CP vs Ángulo incidente de oleaje	129
Figura 5. 134. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos	130
Figura 5. 135. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos	130
Figura 5. 136. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos	131
Figura 5. 137. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos	131
Figura 5. 138. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos	132
Figura 5. 139. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos	132
Figura 5. 140. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos	133
Figura 5. 141. Modelado de Coef. de Propagación obtenidos	133
Fig. 5.3. 1 Ubicación del Puerto de Manzanillo	163

Fig. 5.3. 2 Escudo de la ciudad	164
Fig. 5.3. 3 Evolución del movimiento de carga contenerizada en México	165
Fig. 5.3. 4 Escudos de la SCT y la API Manzanillo	165
Fig. 5.3. 5 Evolución del manejo de carga a nivel nacional y en el Puerto de Manzanillo	166
Fig. 5.3. 6 Reconocimiento del buque Cezanne.....	166
Fig. 5.3. 7 Buque portacontenedores.....	166
Fig. 5.3. 8 Promocional del Puerto de Manzanillo, API MAN, 2017	167
Fig. 5.3. 9 Plano del Puerto de Manzanillo, API MAN	168
Fig. 5.3. 10 Áreas en desarrollo y crecimiento	172
Fig. 5.3. 11 Etapas de la TEC II	173
Fig. 5.3. 12 TUM manejando carga a granel.....	174
Fig. 5.3. 13 Propuesta de expansión en Laguna de Cuyutlán	175
Fig. 5.3. 14 Puerto actual y futura ampliación de Cuyutlán	176
Fig. 5.3. 15 Direcciones de oleaje con mayor influencia anual.....	178
Fig. 5.3. 16 Batimetría representada por curvas de nivel y superficie 3D	179
Fig. 5.3. 17 Incidencia de oleaje para Caso I de oleaje normal.....	180
Fig. 5.3. 18 Superficie Libre, Caso I	181
Fig. 5.3. 19 Agitación en la zona de interés, Caso I	181
Fig. 5.3. 20 Perfil de CP en zona turbulenta	182
Fig. 5.3. 21 Perfil de CP en Canal de aproximación.....	182
Fig. 5.3. 22 Perfil de CP en Canal de navegación	182
Fig. 5.3. 23 Modelación de la Superficie Libre del agua, Caso I.....	183
Fig. 5.3. 24 Superficie Libre en área de interés	183
Fig. 5.3. 25 Perfil SL en ruta de aproximación	184
Fig. 5.3. 26 Incidencia de Oleaje para Caso II de oleaje normal	185
Fig. 5.3. 27 Agitación intensa fuera de la bahía. Se puede observar que la zona encerrada presenta altos valores de agitación.....	186
Fig. 5.3. 28 Agitación en el área de interés para el Caso II de oleaje normal.....	187
Fig. 5.3. 29 Coeficiente de Propagación en la zona turbulenta	187
Fig. 5.3. 30 Coeficiente de Propagación en canal de aproximación	188
Fig. 5.3. 31 Coeficiente de Propagación en Canal de Navegación	188
Fig. 5.3. 32 Superficie libre de la bahía para el Caso II de oleaje normal.....	189
Fig. 5.3. 33 Superficie libre en el área de estudio para el Caso II de oleaje normal	189
Fig. 5.3. 34 Altura de Oleaje en ruta de aproximación	190
Fig. 5.3. 35 Dirección de oleaje incidente para Caso I de tormenta	191
Fig. 5.3. 36 Propagación del oleaje en el caso I de oleaje en tormenta.....	192
Fig. 5.3. 37 Propagación del oleaje en la zona de interés	193
Fig. 5.3. 38 Coeficiente de Propagación en ruta de aproximación	193
Fig. 5.3. 39 Coeficiente de Aproximación en Canal de acceso	194
Fig. 5.3. 40 Coeficiente de Propagación en canal de navegación.....	194
Fig. 5.3. 41 Representación de la superficie libre en esta condición del oleaje	195
Fig. 5.3. 42 Altura de superficie libre	196
Fig. 5.3. 43 Incidencia del oleaje para el Caso II de tormenta	197
Fig. 5.3. 44 Propagación del oleaje en la bahía para este caso de estudio	197

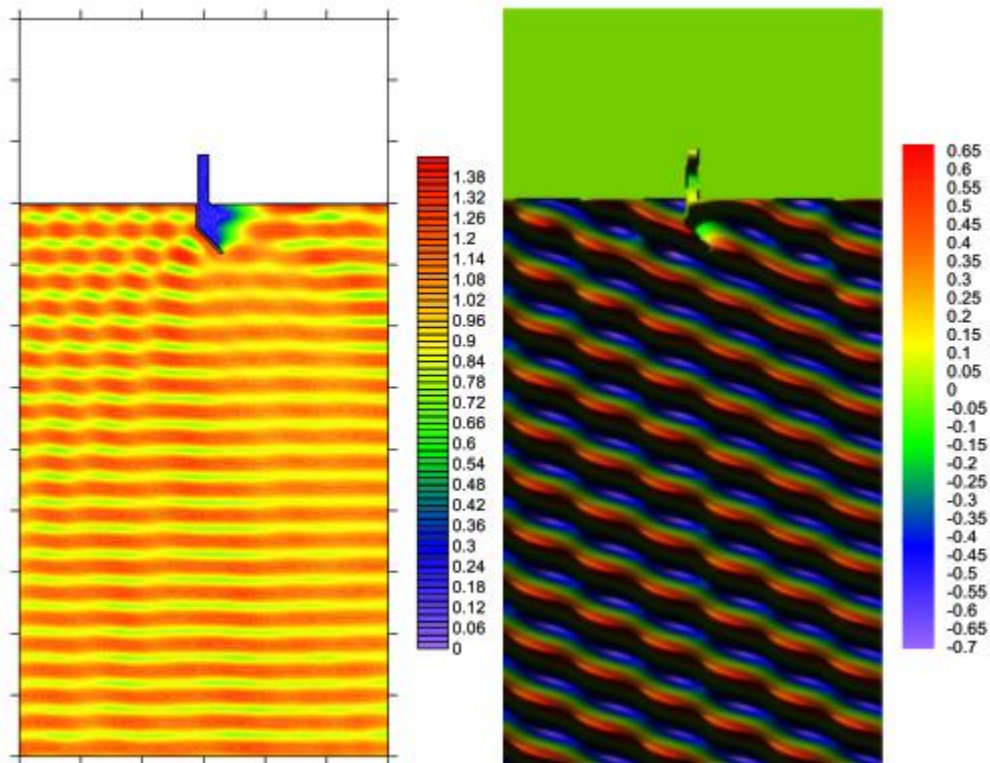
Fig. 5.3. 45 Propagación del oleaje en el área de interés.....	198
Fig. 5.3. 46 Coeficiente de Propagación en zona turbulenta.....	198
Fig. 5.3. 47 Coeficiente de Propagación en canal de acceso	199
Fig. 5.3. 48 Coeficiente de Propagación en canal de navegación	199
Fig. 5.3. 49 Representación de la superficie libre, generada por el programa Surfer con datos del programa WAPO.....	200
Fig. 5.3. 50 Altura de ola en ruta de aproximación.....	201

ANEXO. ARCHIVOS DE GENERACIÓN DE SURFER®

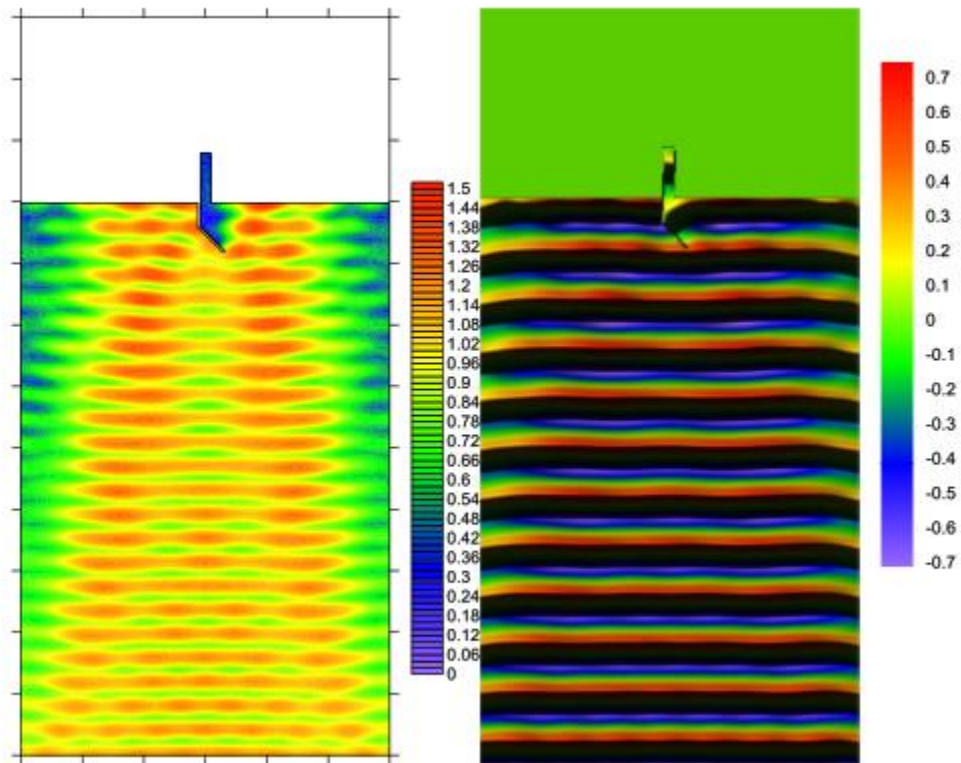
Caso 1



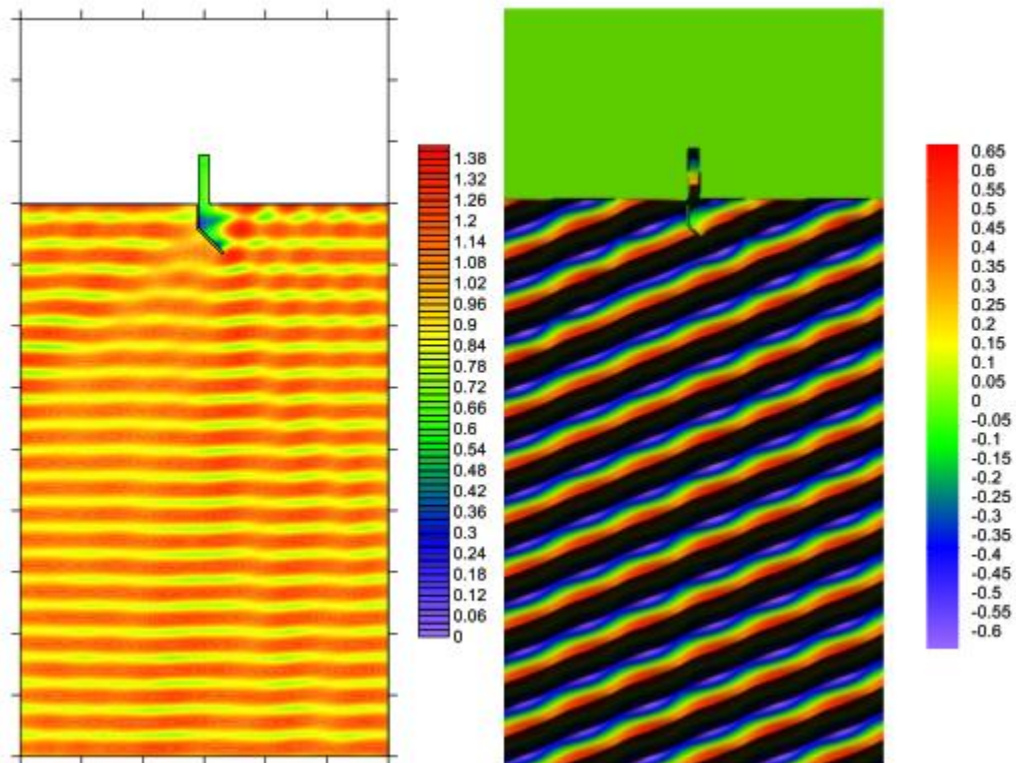
Caso 2



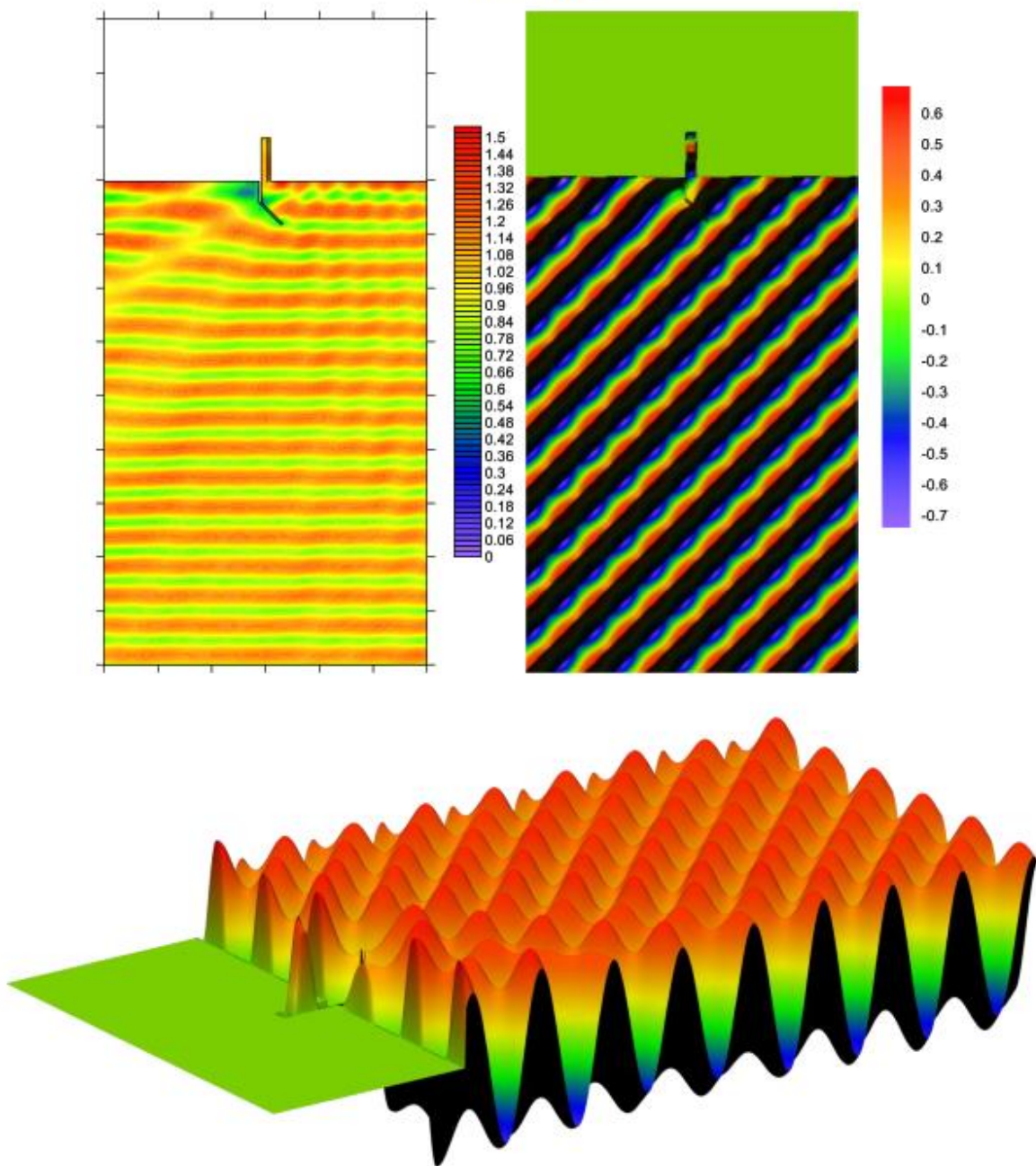
Caso3



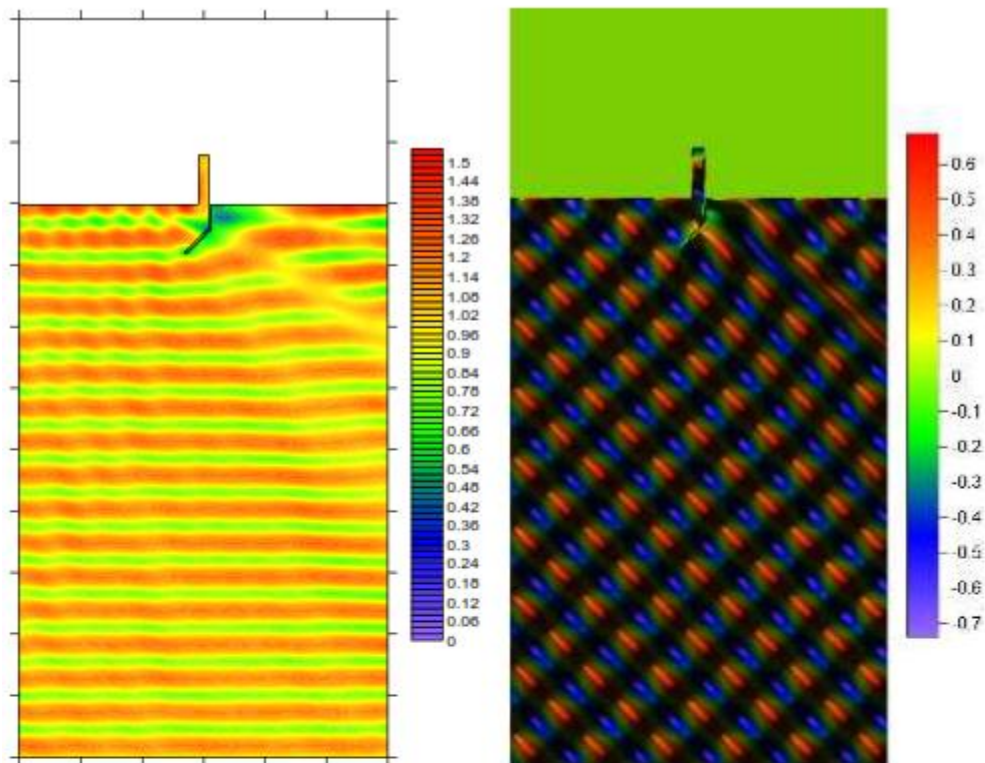
Caso 4



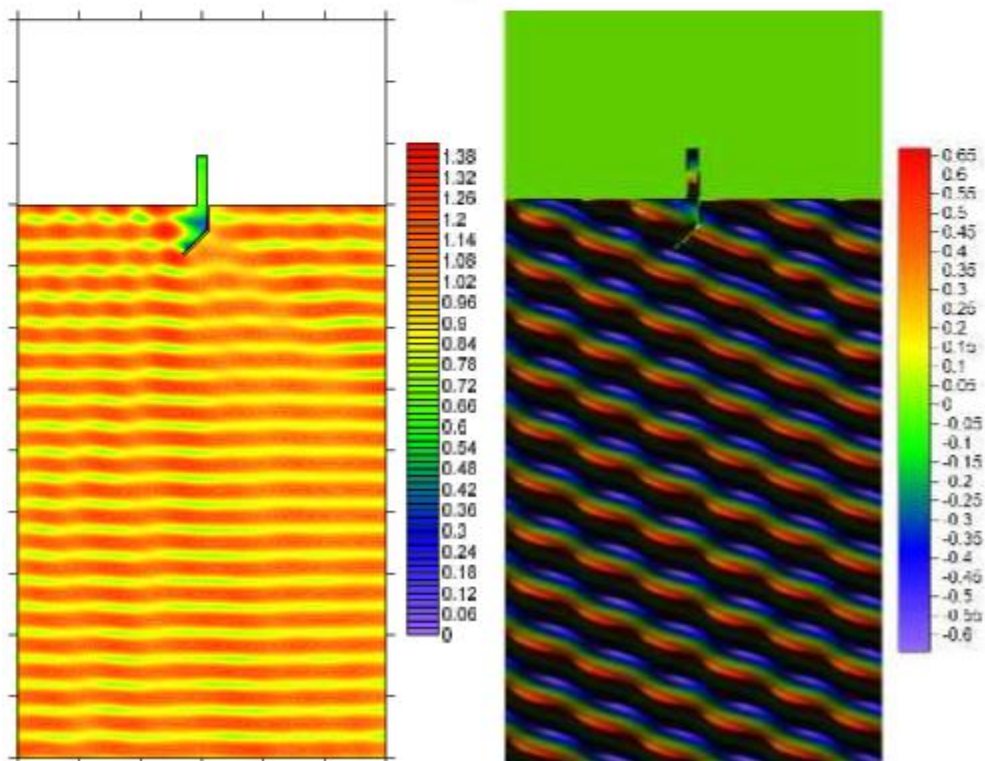
Caso 5 (R)



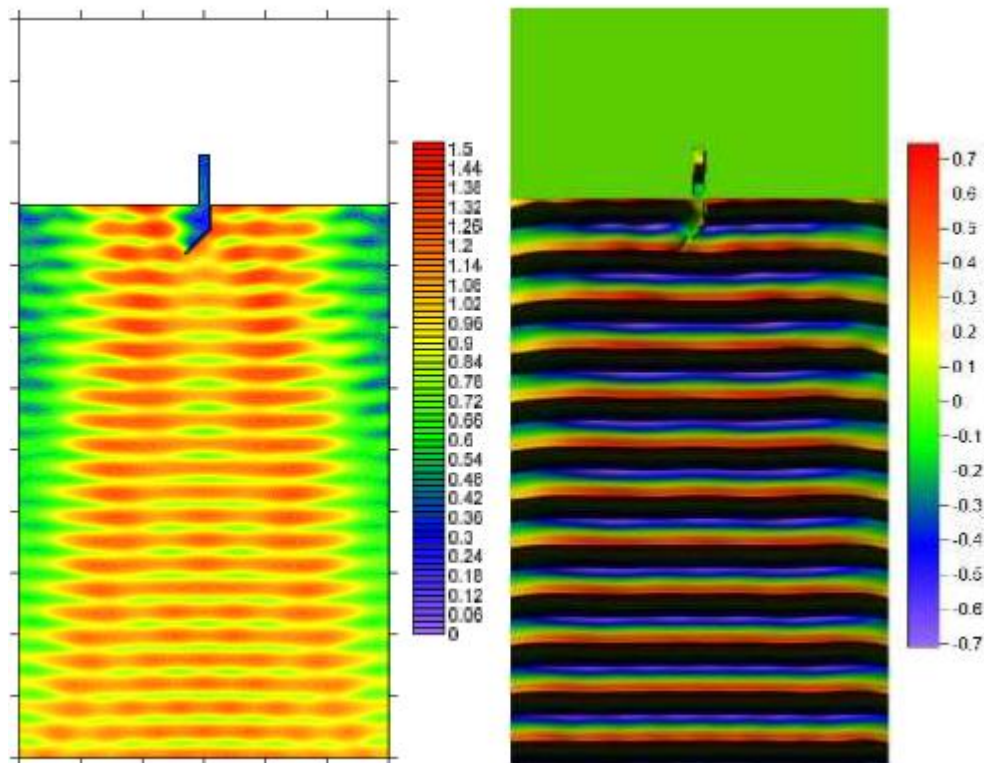
Caso 1 (R) (6)



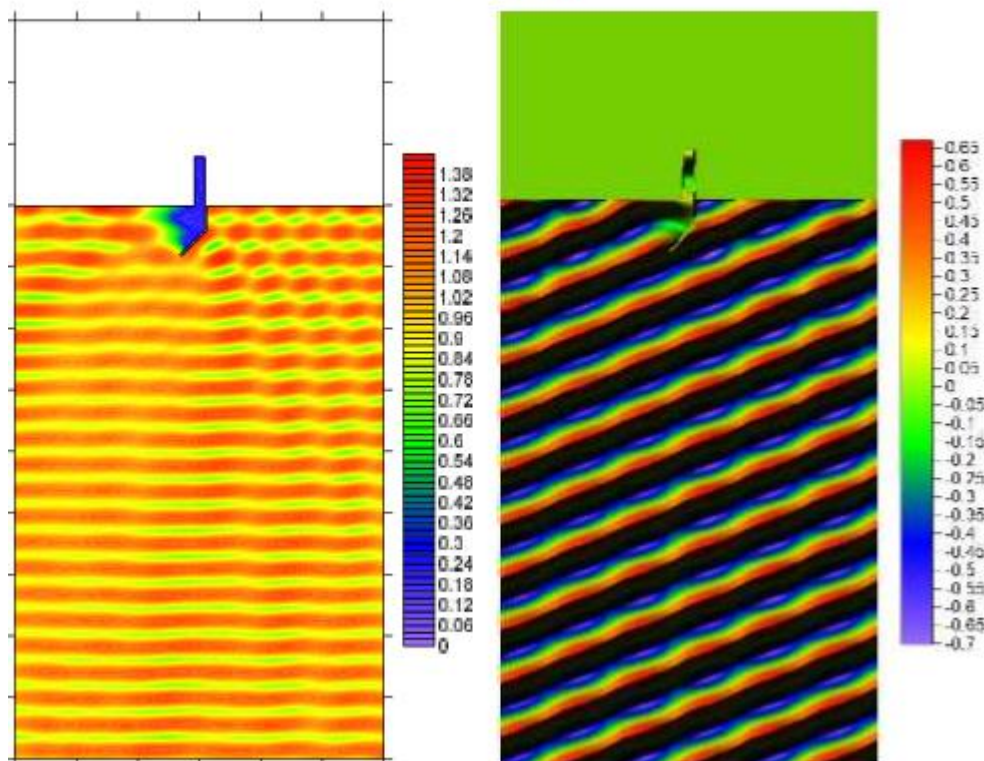
Caso 2 (7)



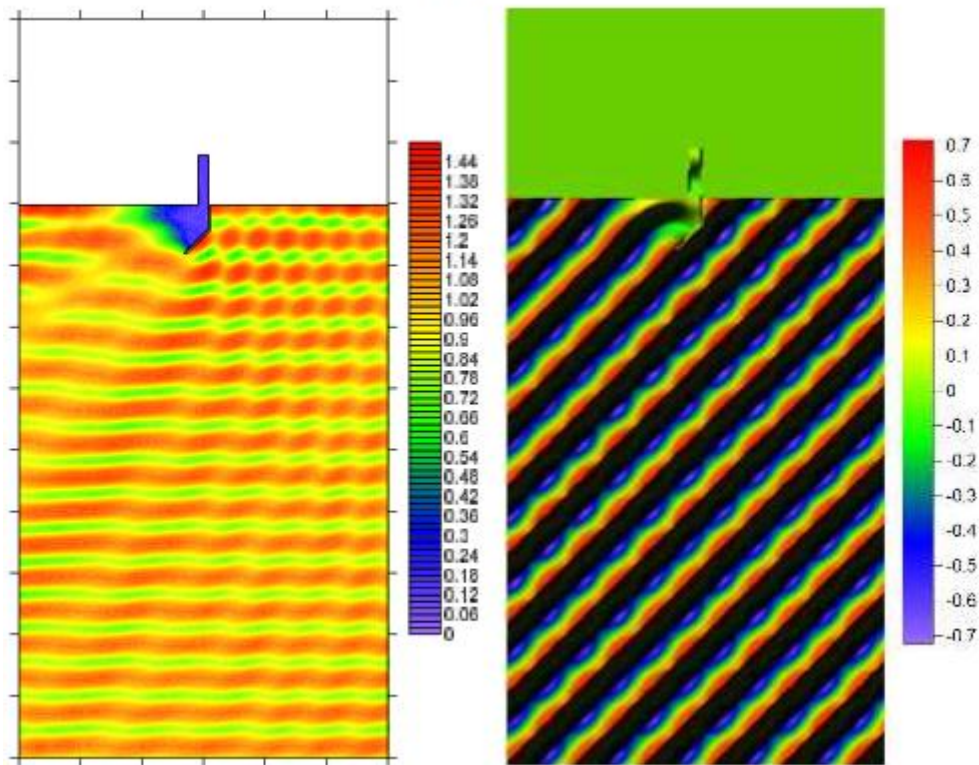
Caso 3 (8)



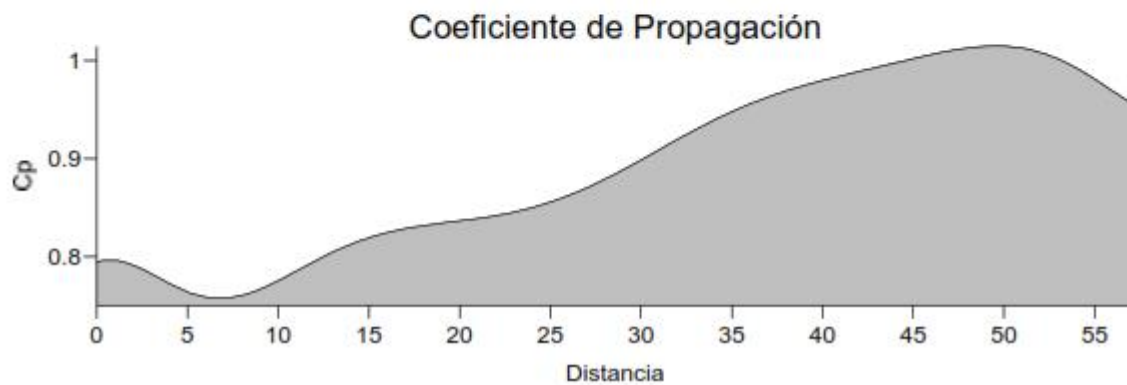
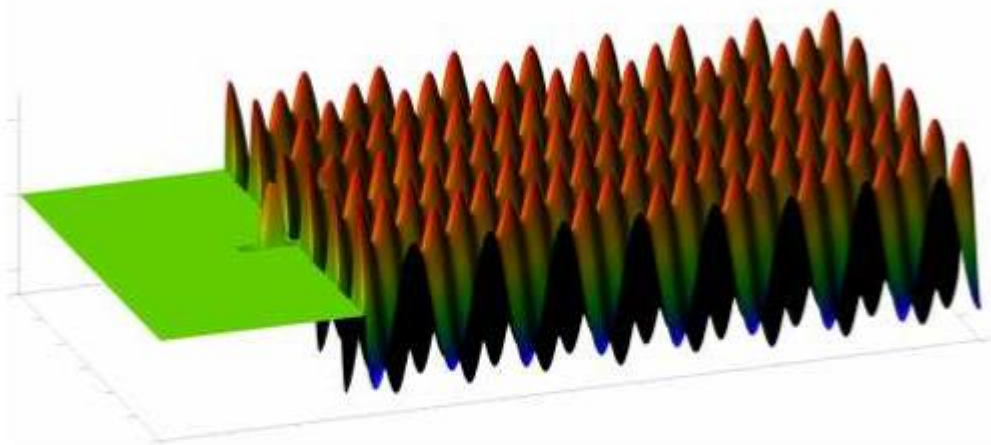
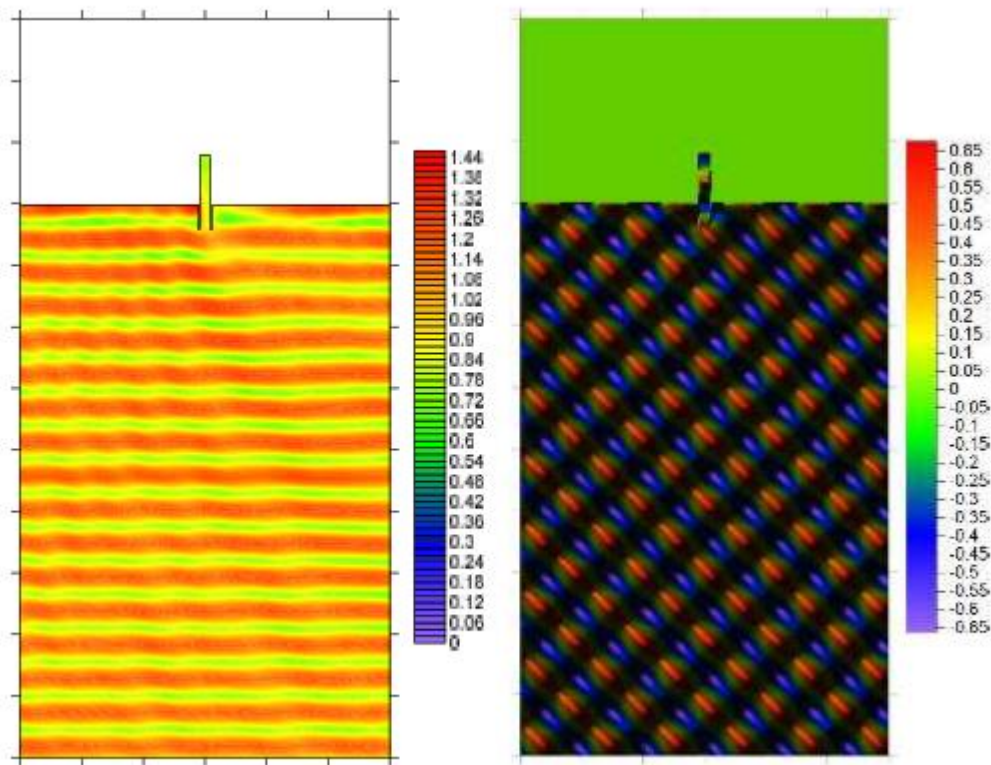
Caso 4 (9)



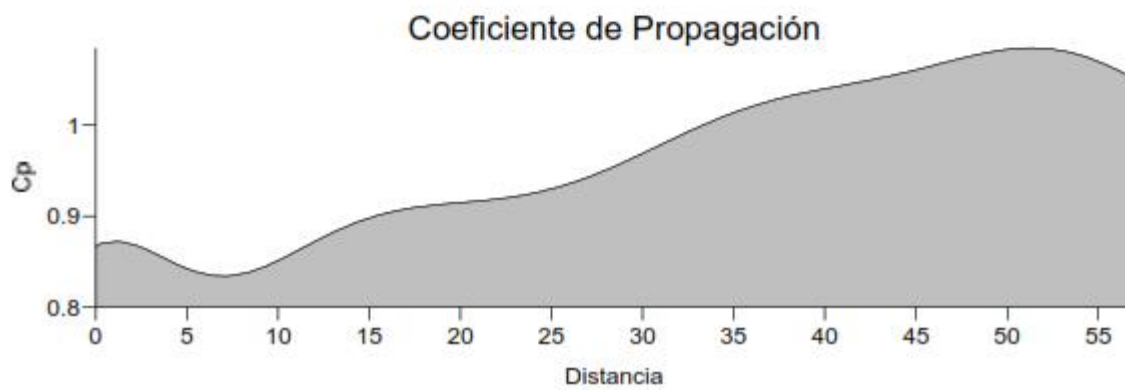
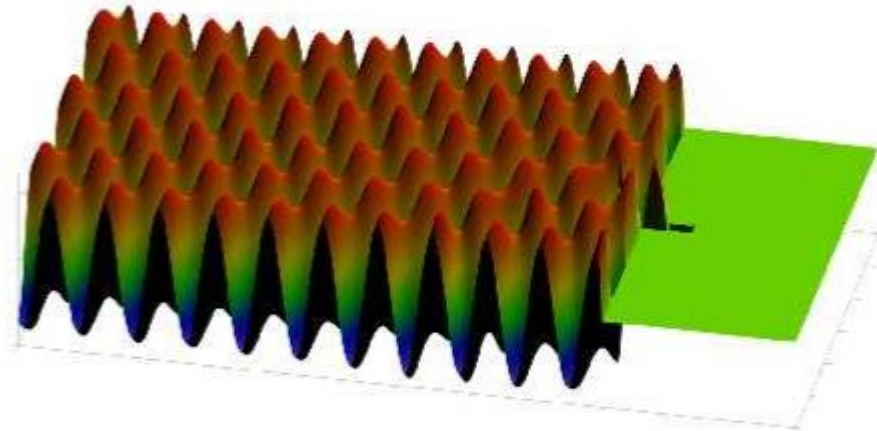
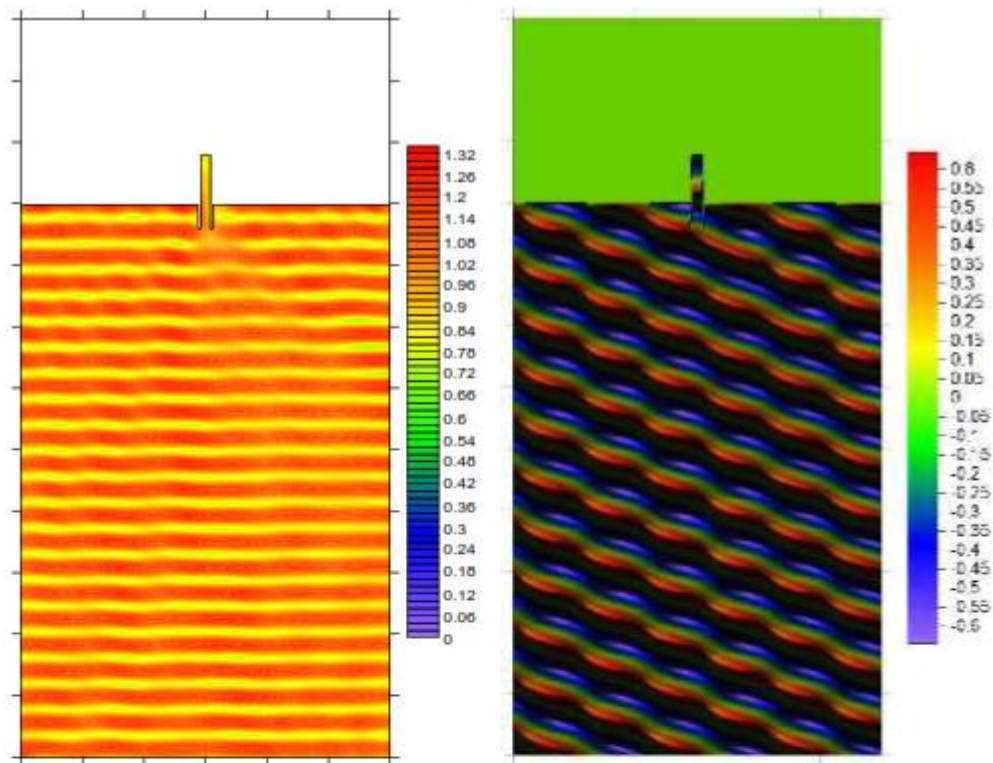
Caso 5 (10)



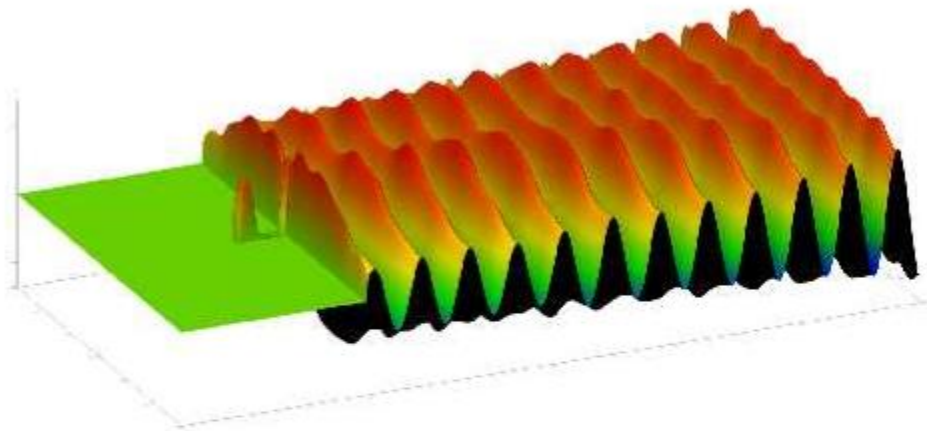
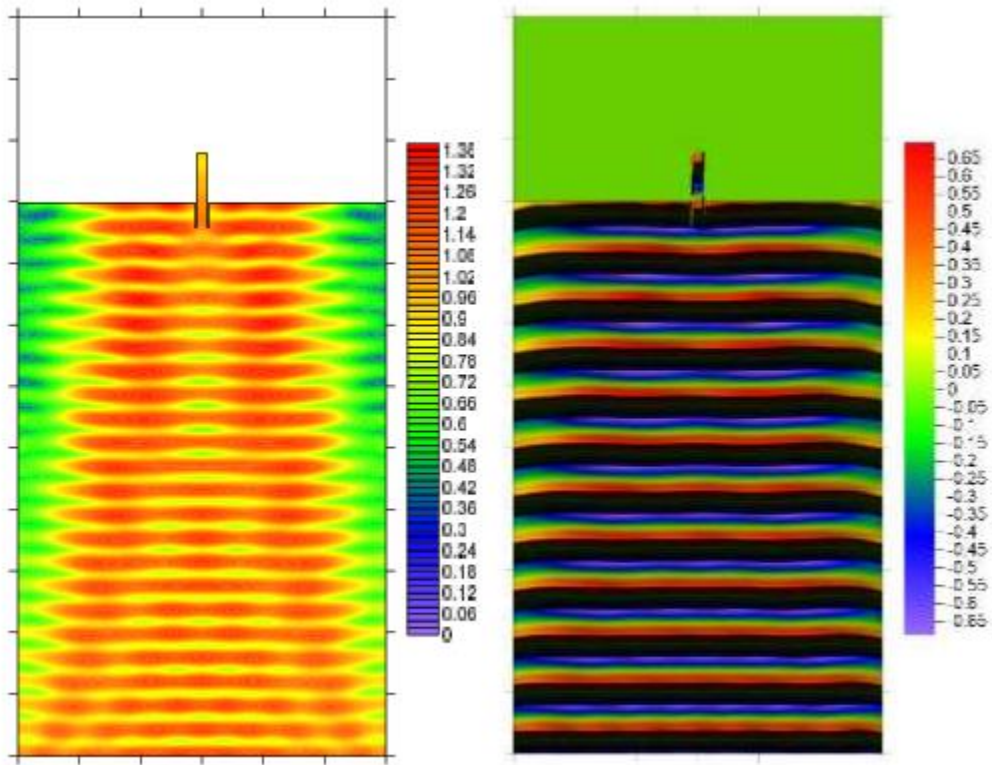
Caso 1 (11)



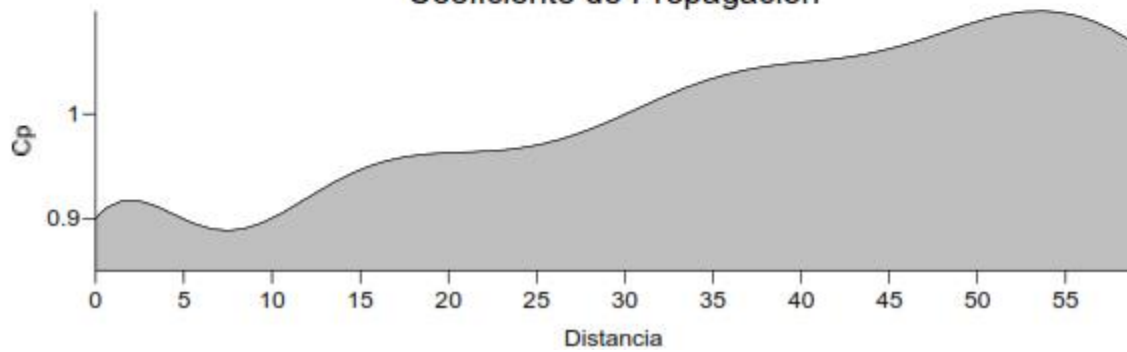
Caso 2 (12) (R)



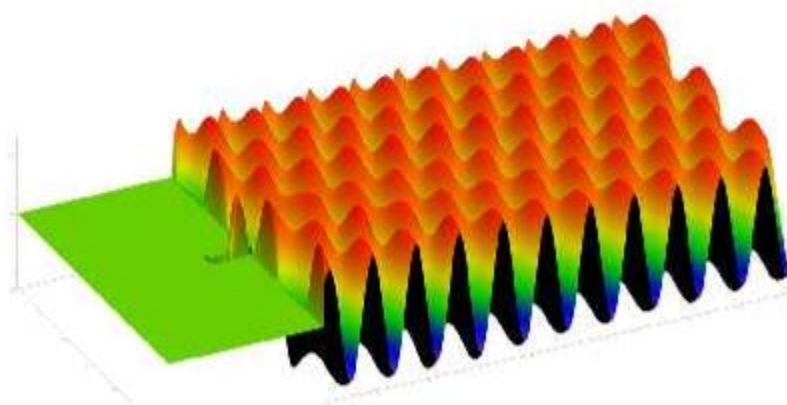
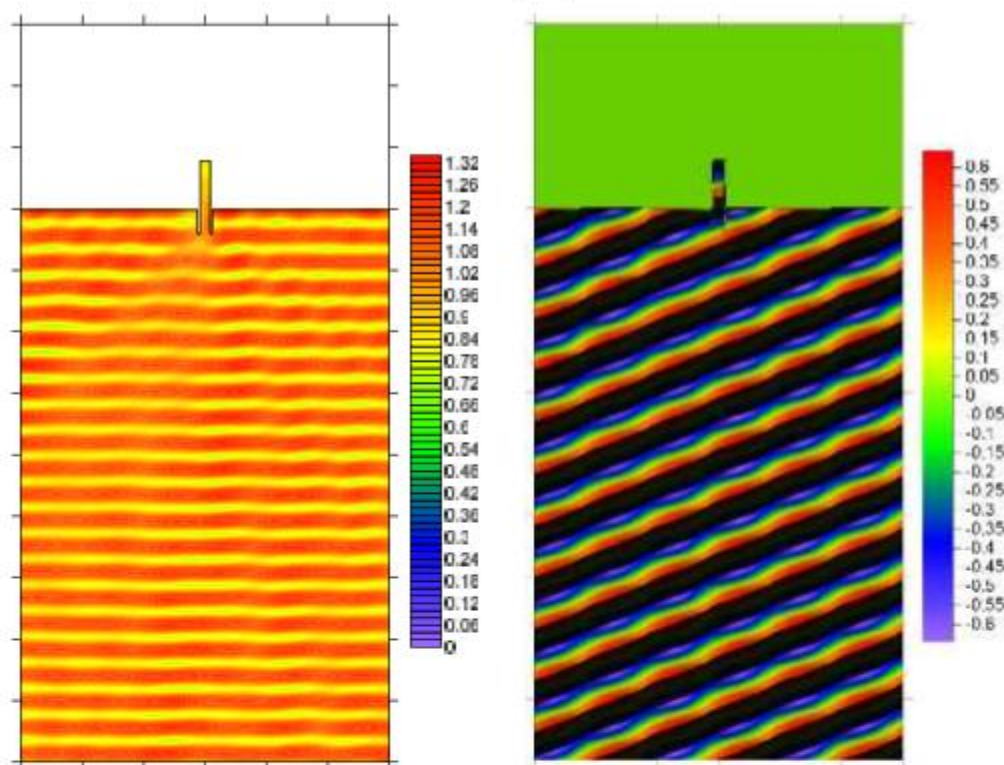
Caso 3 (13) R



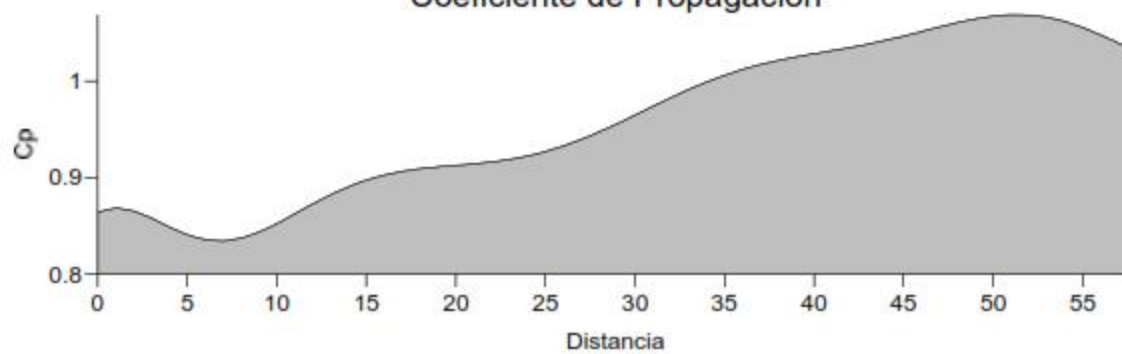
Coeficiente de Propagación



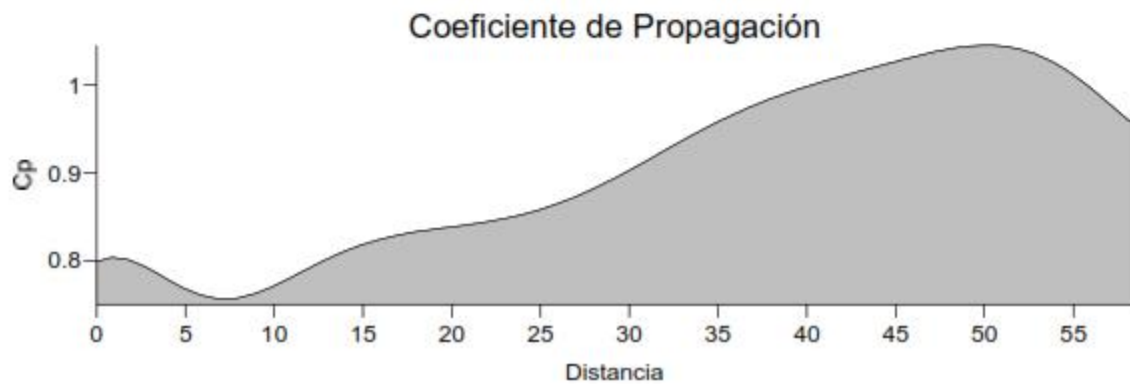
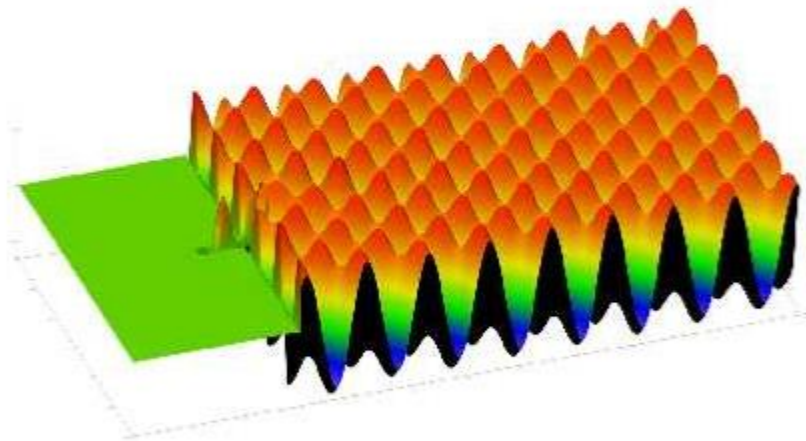
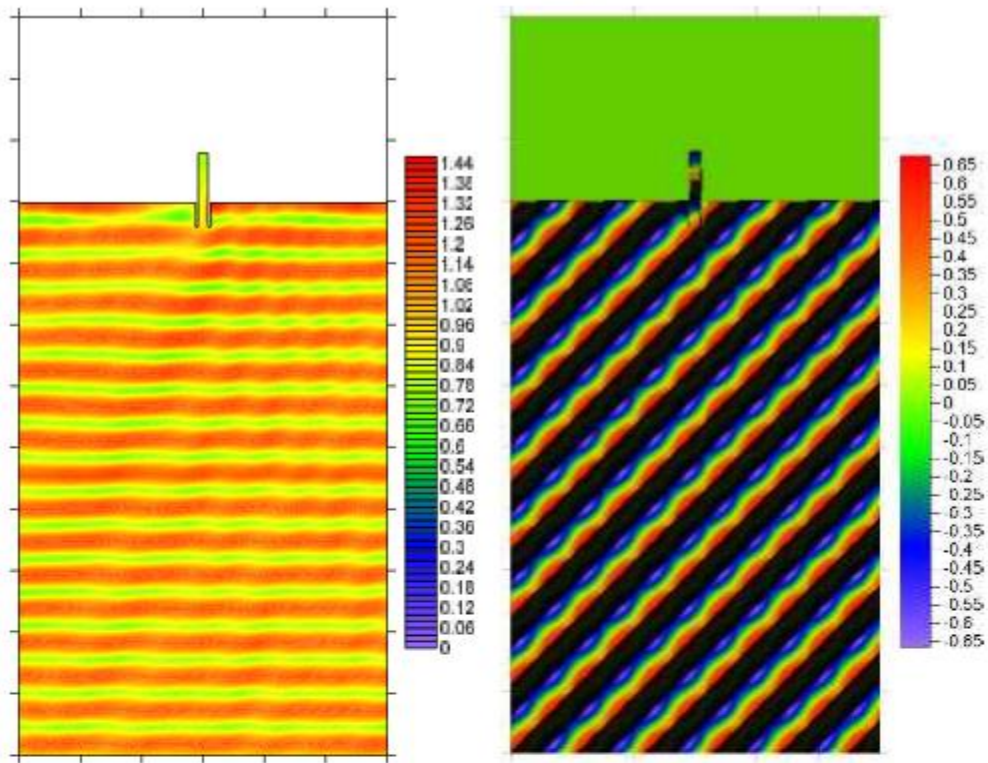
Caso 4 (14) R



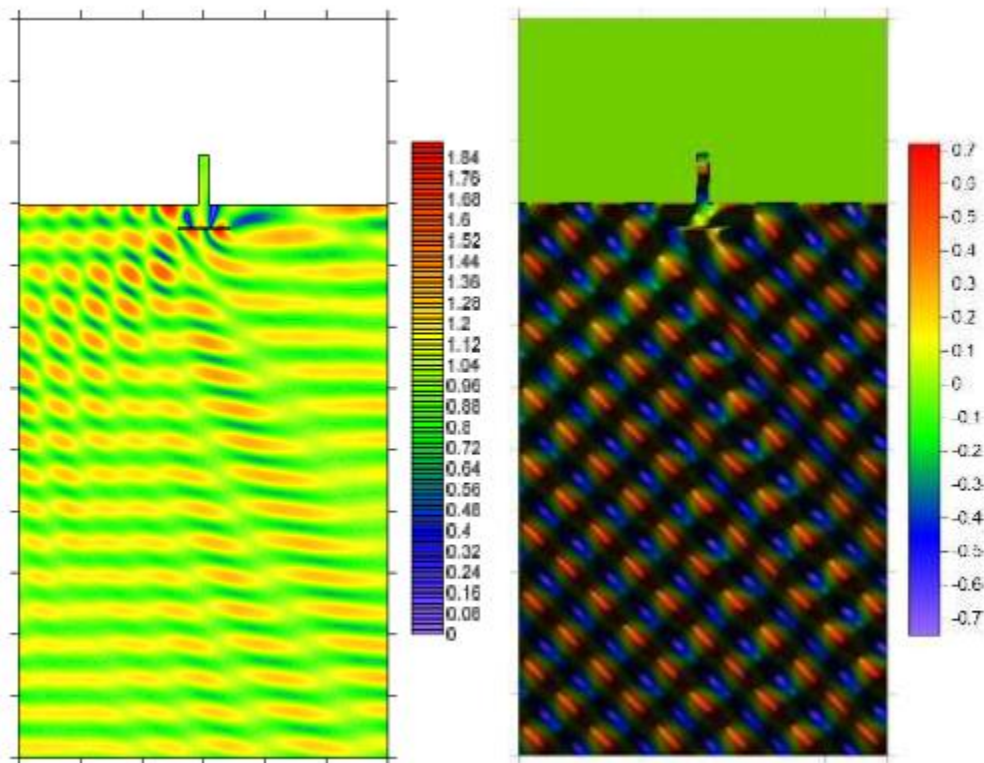
Coefficiente de Propagación



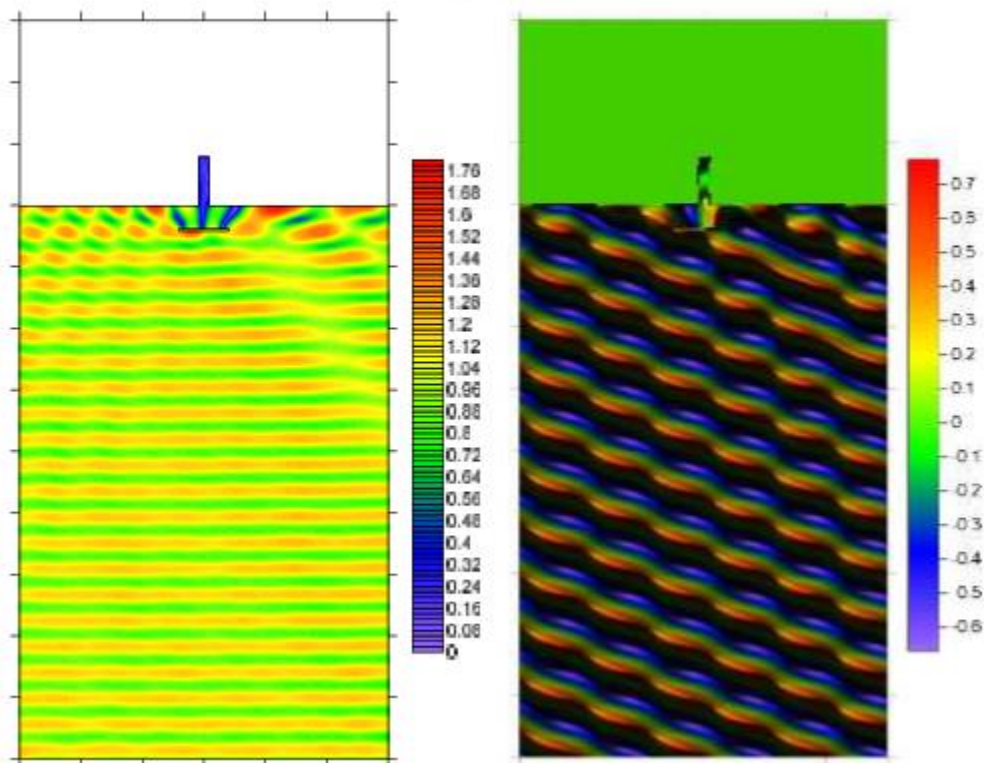
Caso 5 (15)



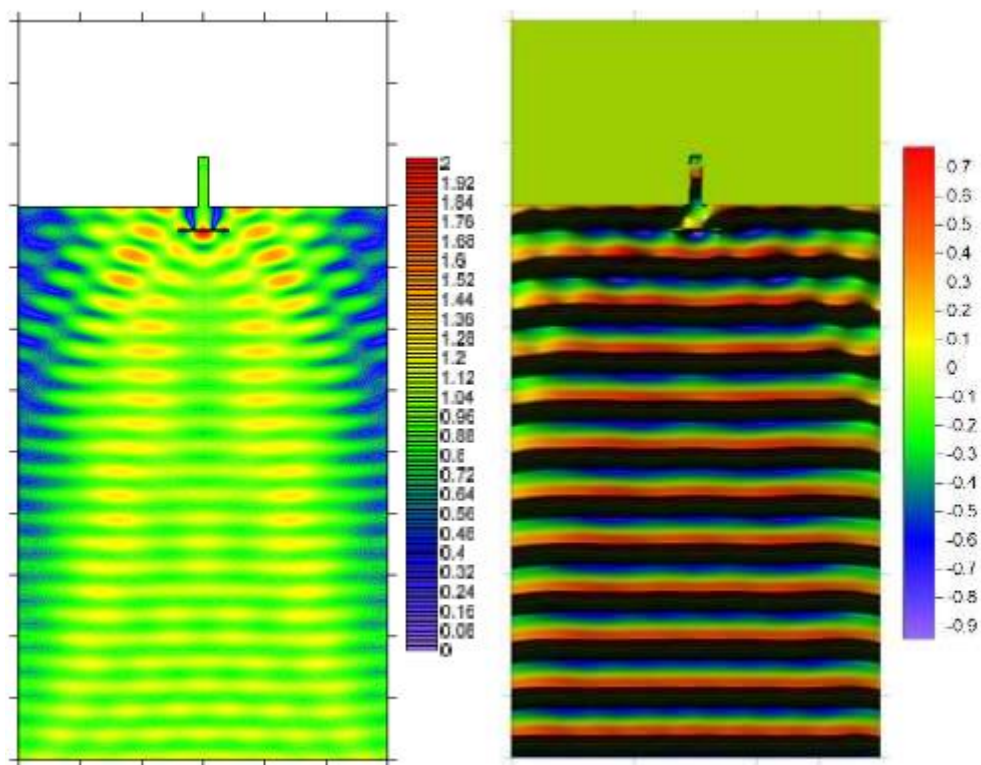
Caso 1 (16)



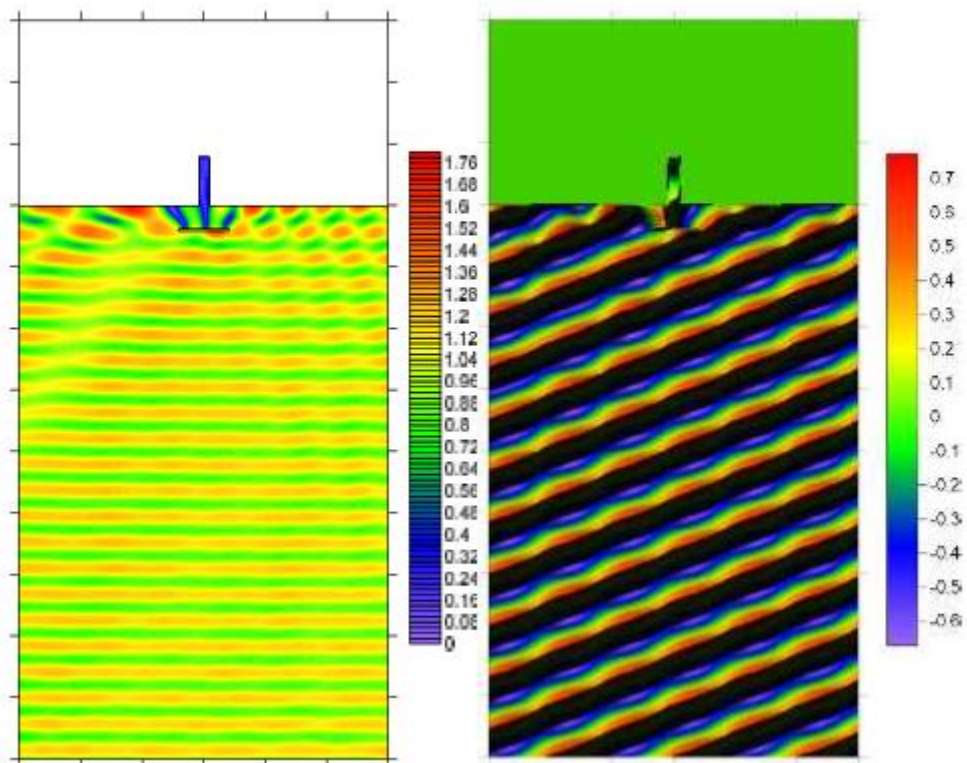
Caso 2 (17)



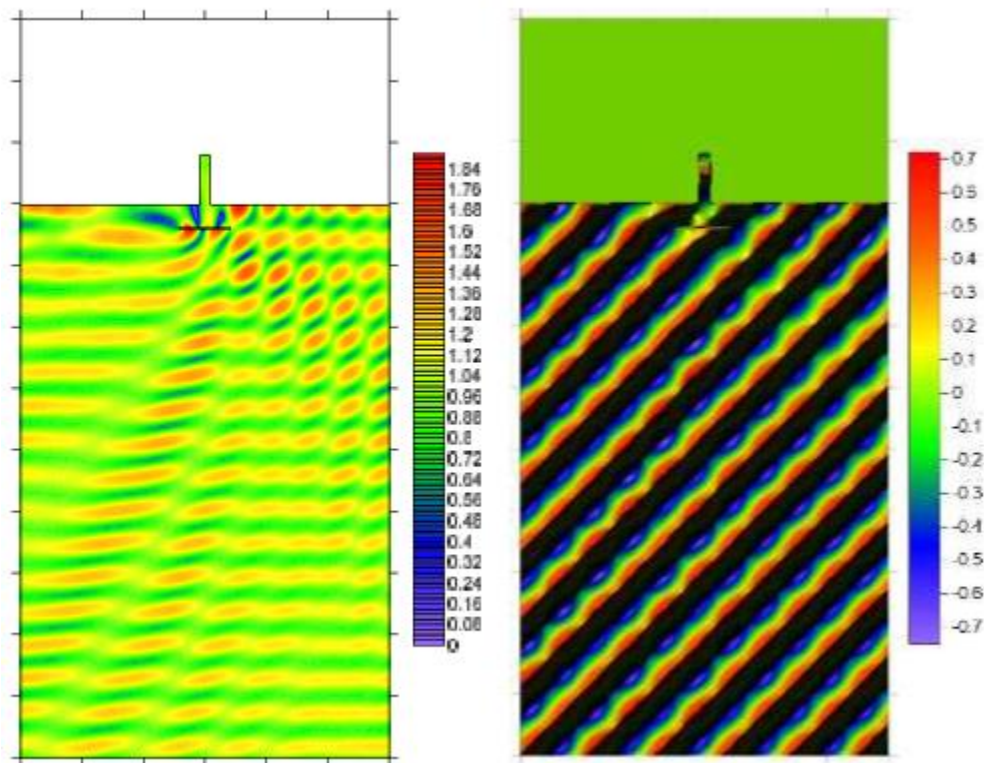
Caso 3 (18)



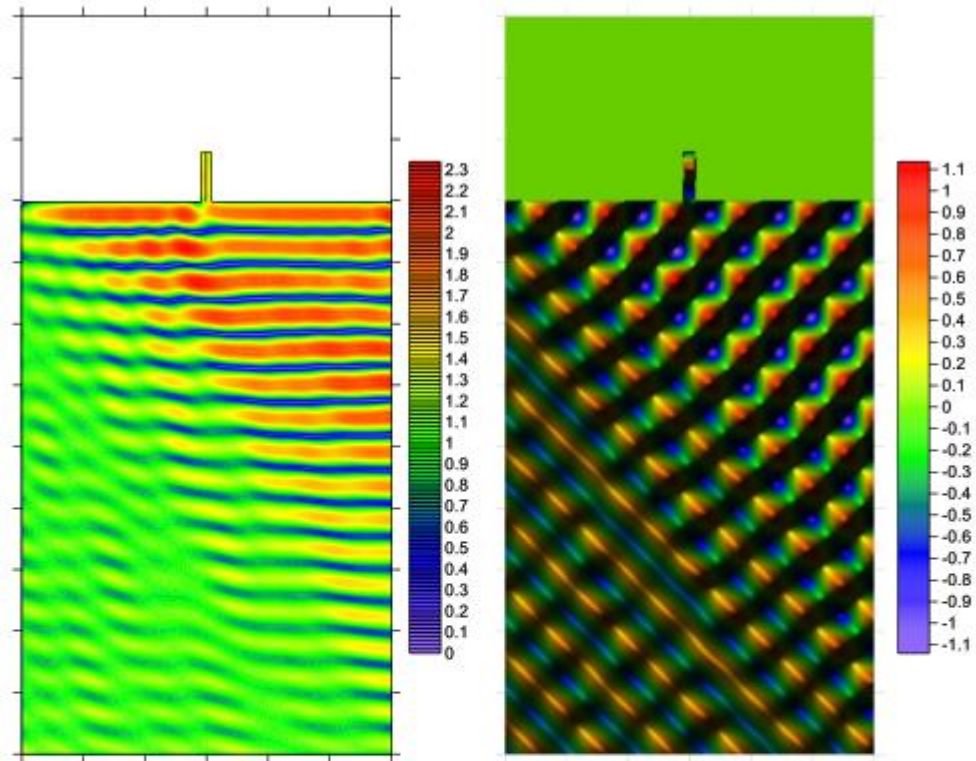
Caso 4 (19)



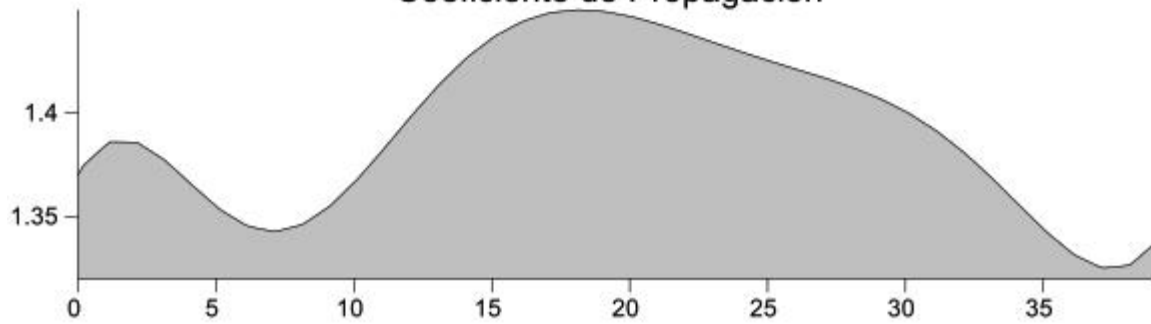
Caso 5 (20)



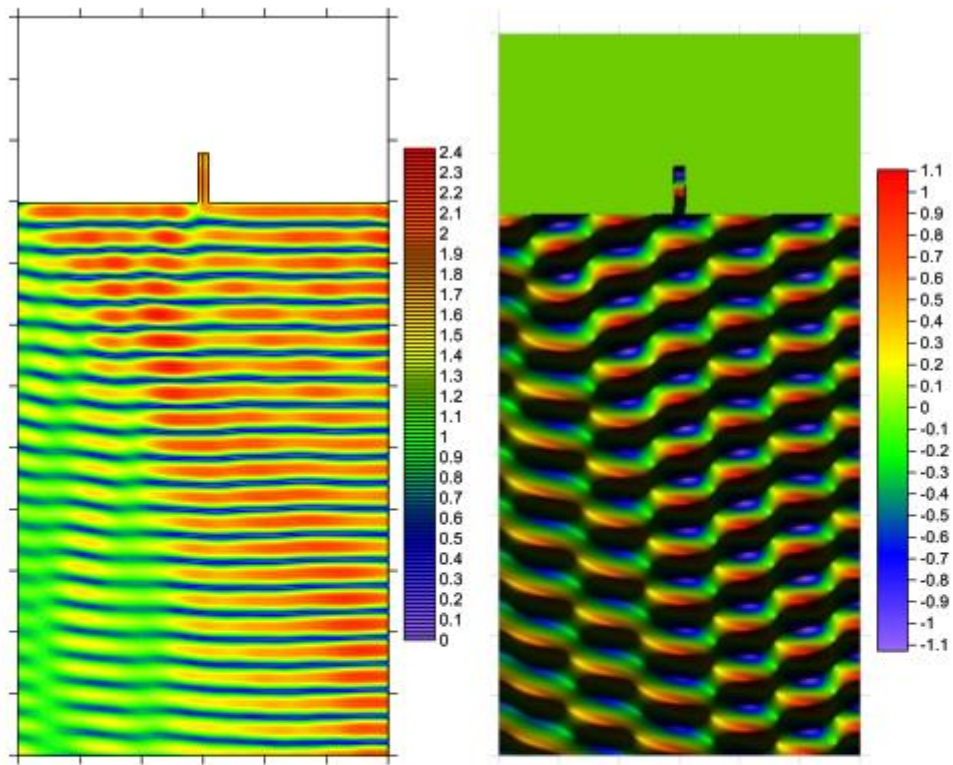
Caso 1 (21) R



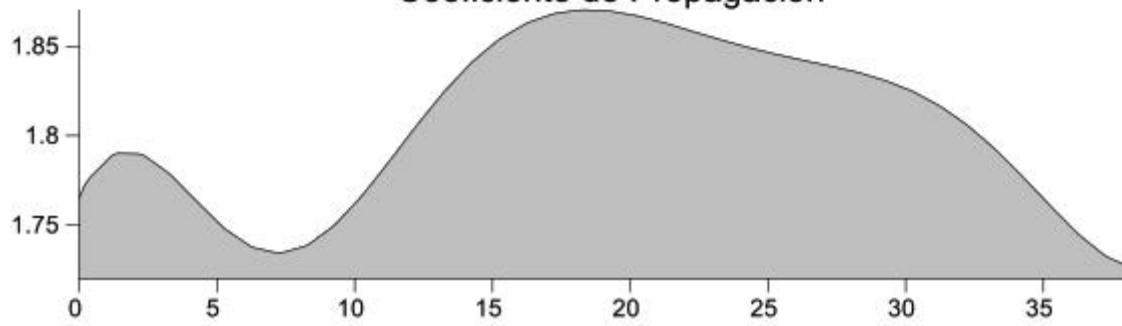
Coeficiente de Propagación



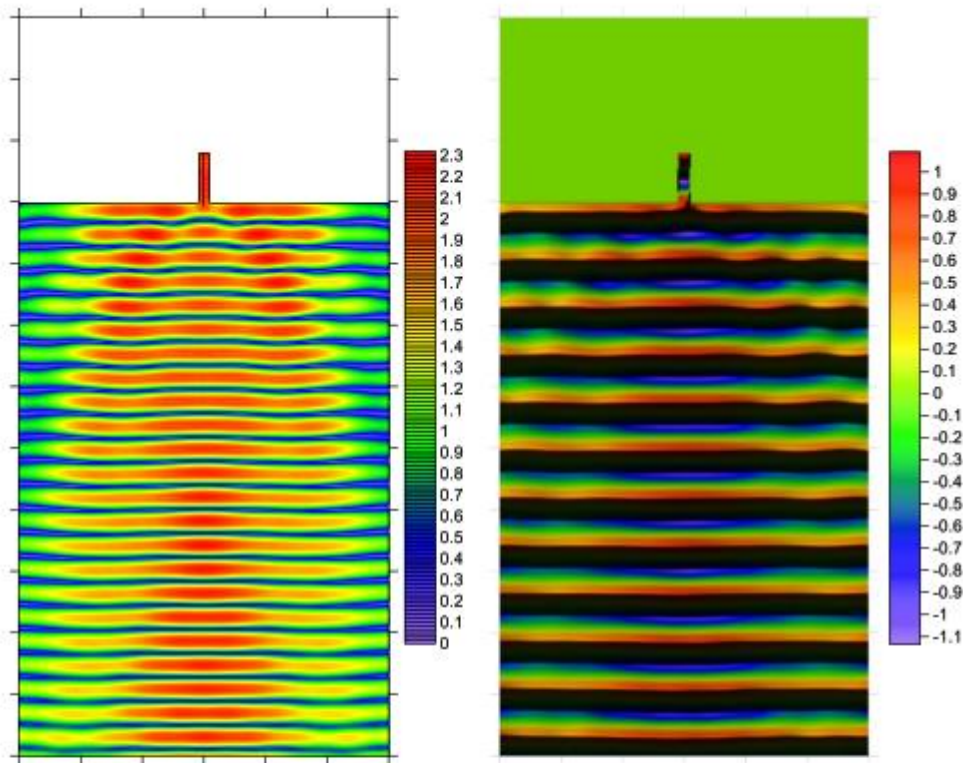
Caso 2 (22) R



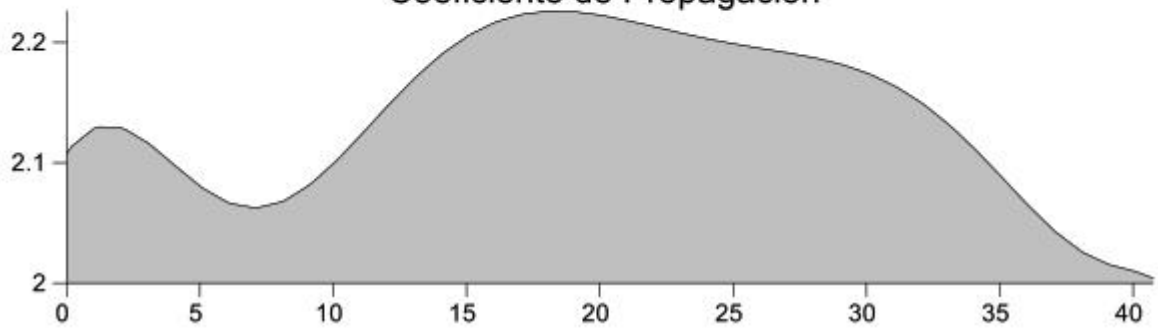
Coefficiente de Propagación



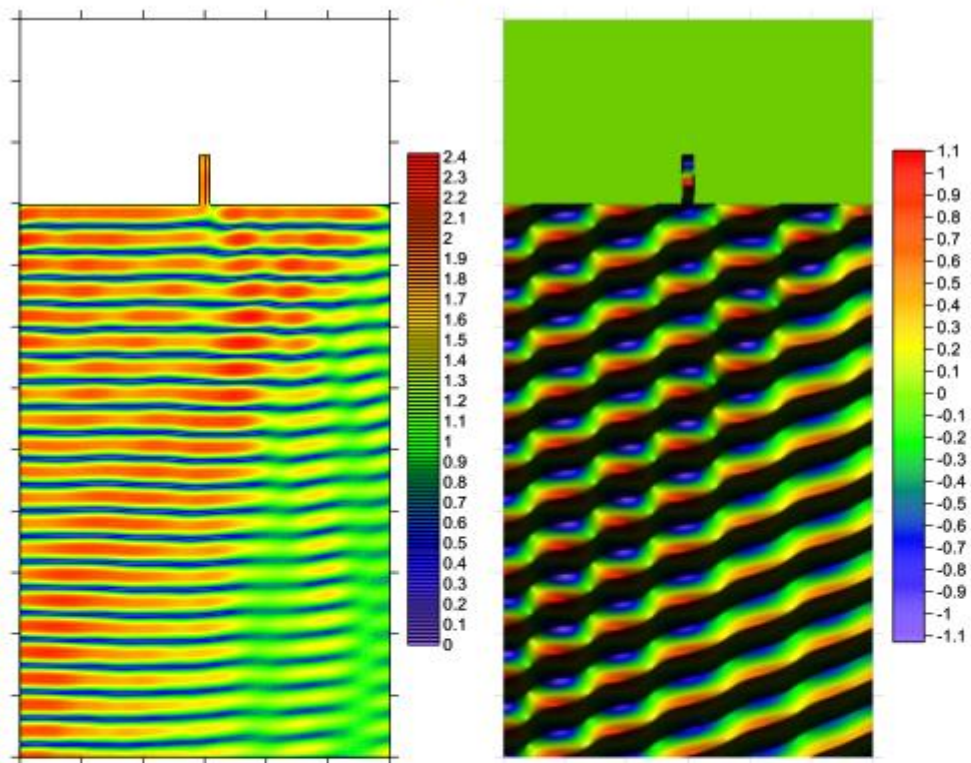
Caso 3 (23) R



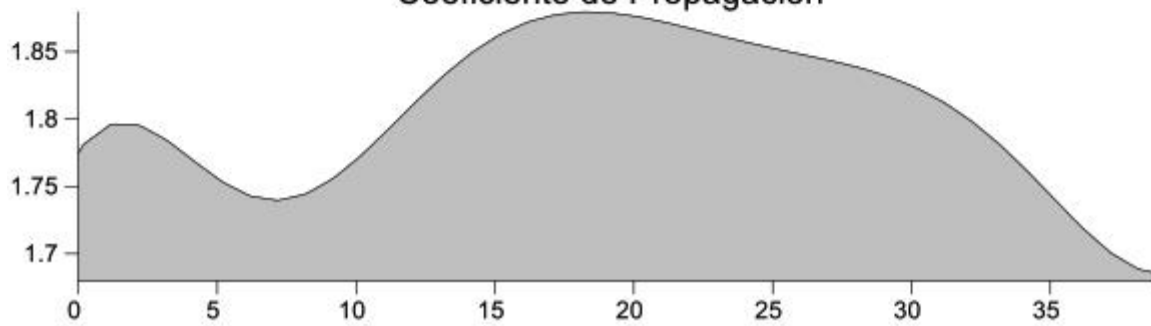
Coeficiente de Propagación



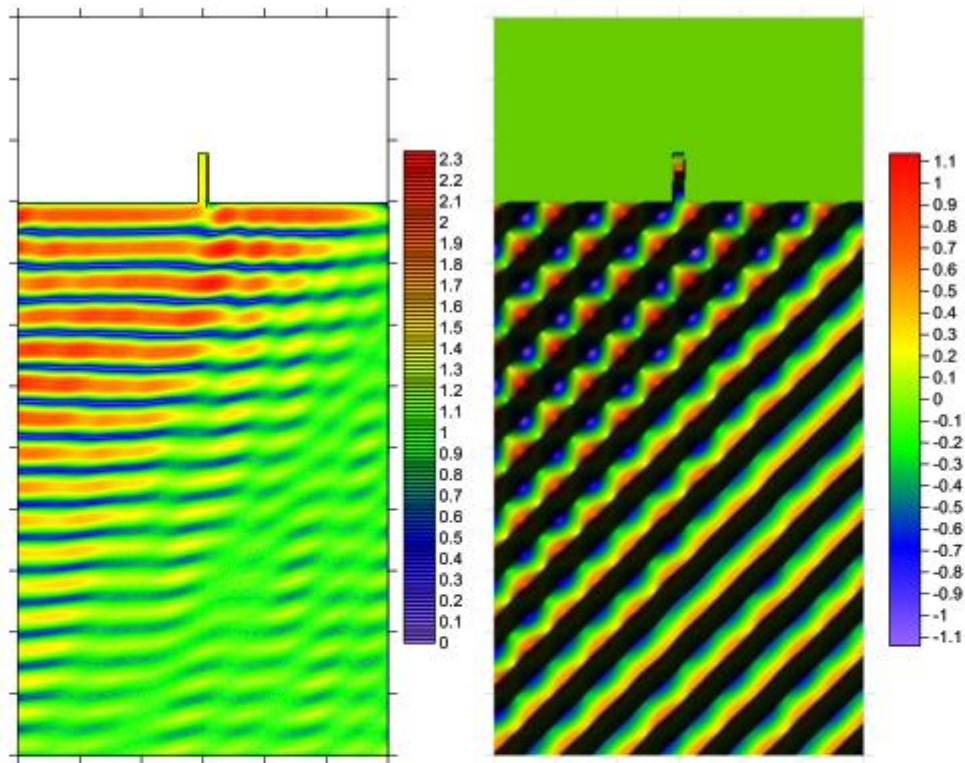
Caso 4 (24) R



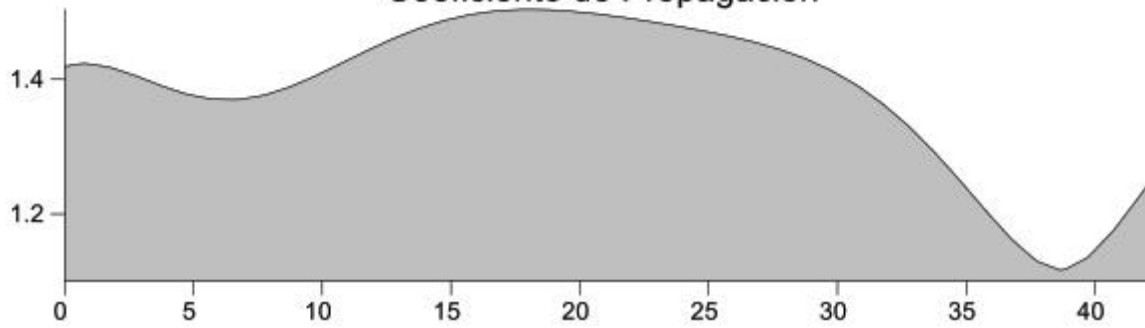
Coeficiente de Propagación



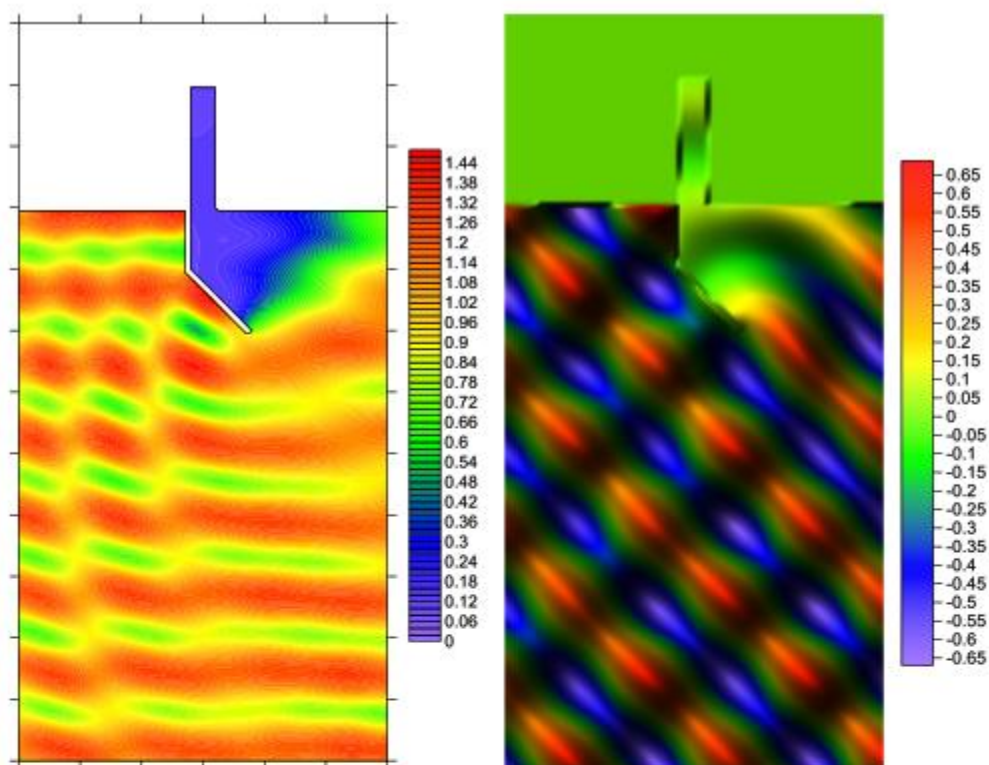
Caso 5 (25) R



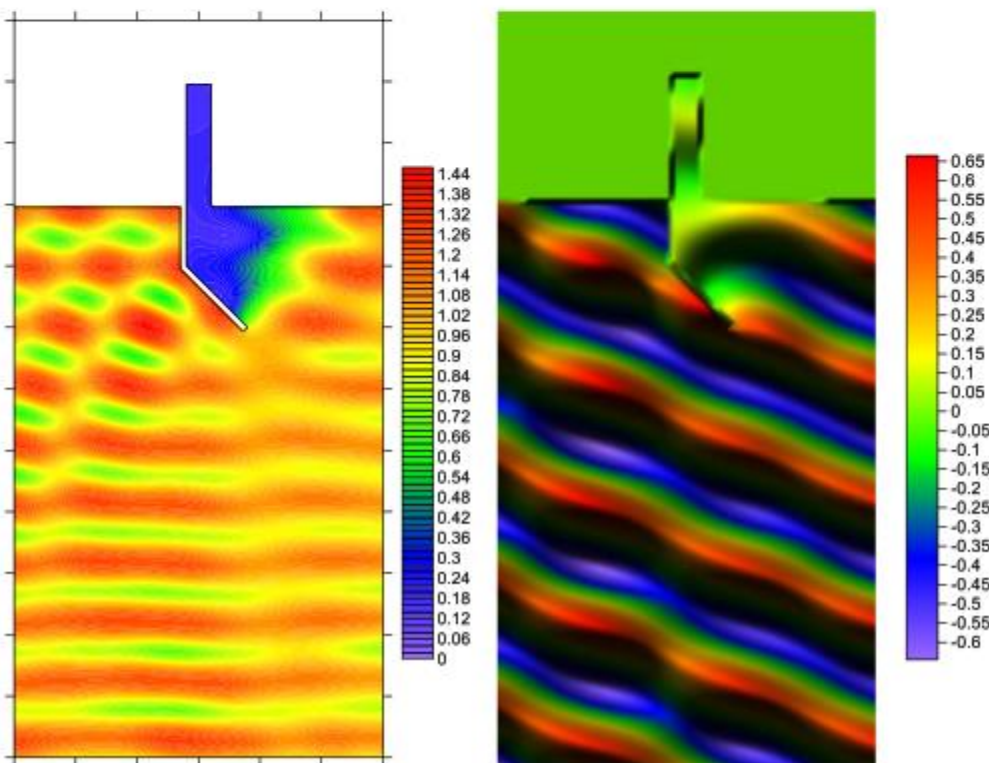
Coefficiente de Propagación



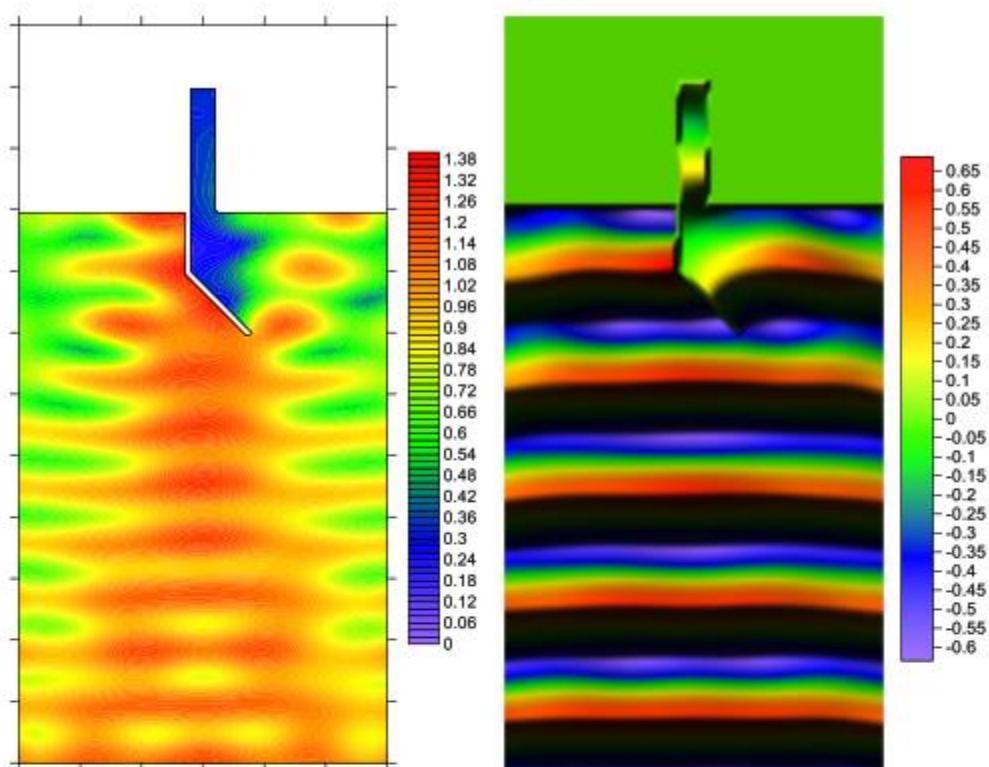
Caso 1 (26)



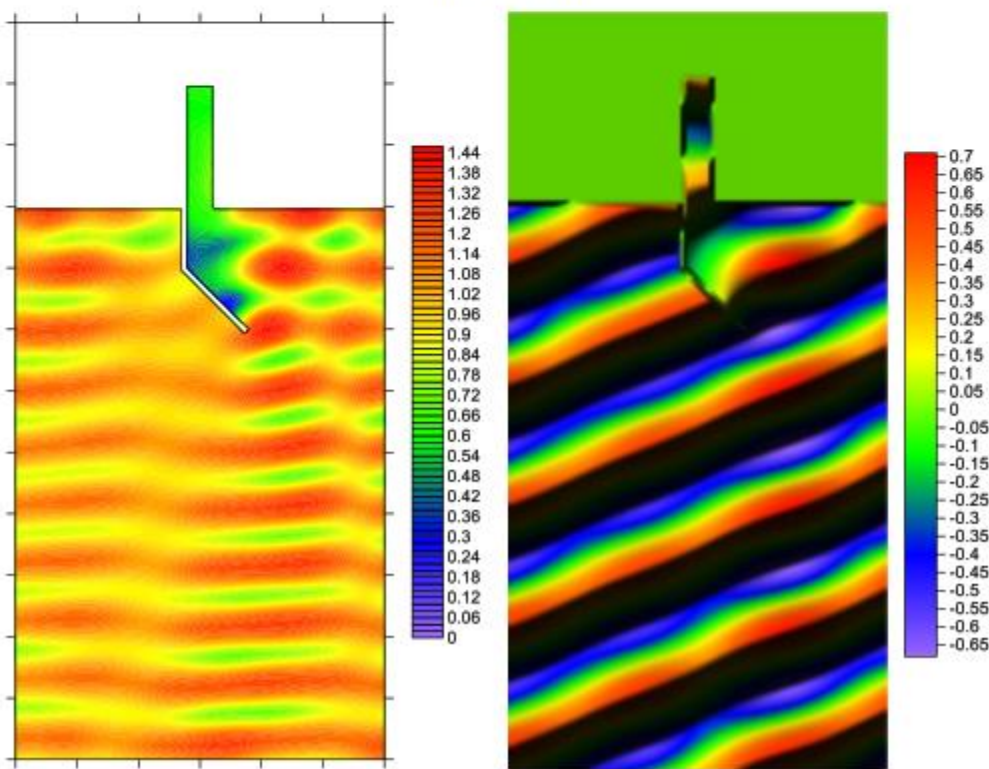
Caso 2 (27)



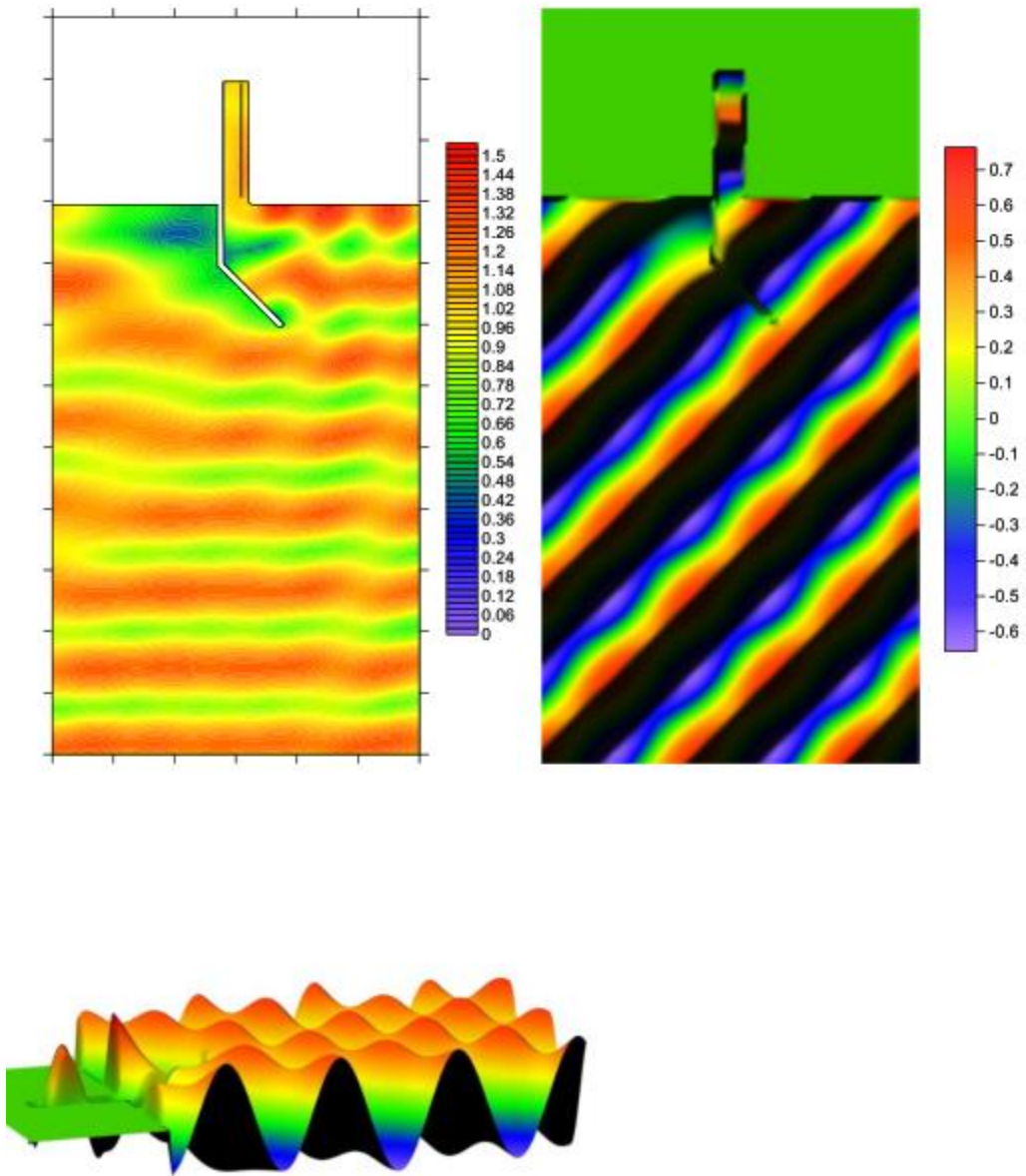
Caso 3 (28)



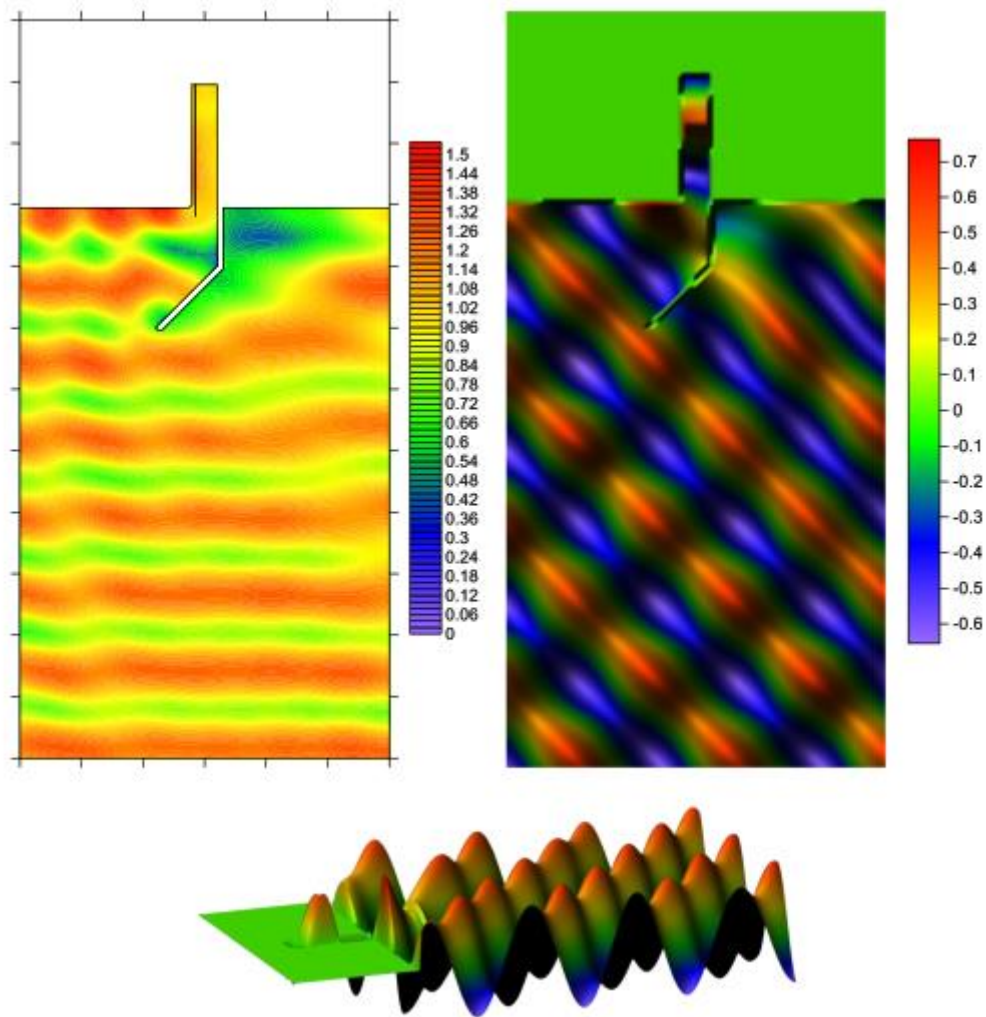
Caso 4 (29)



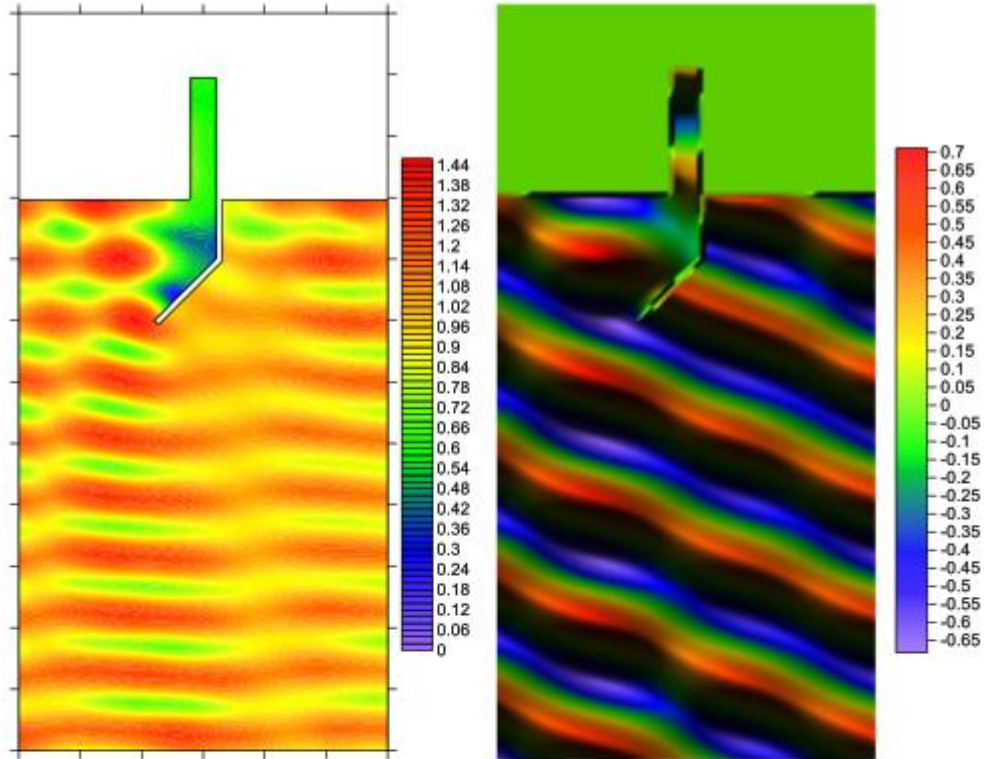
Caso 5 (30) R



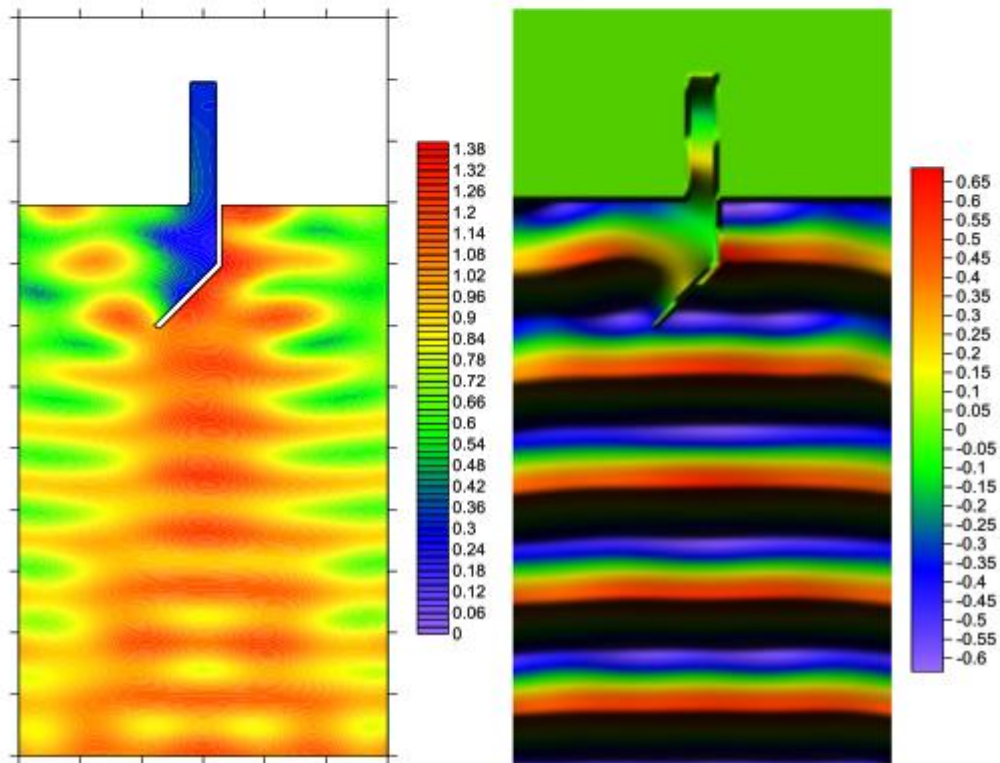
Caso 1 (31) R



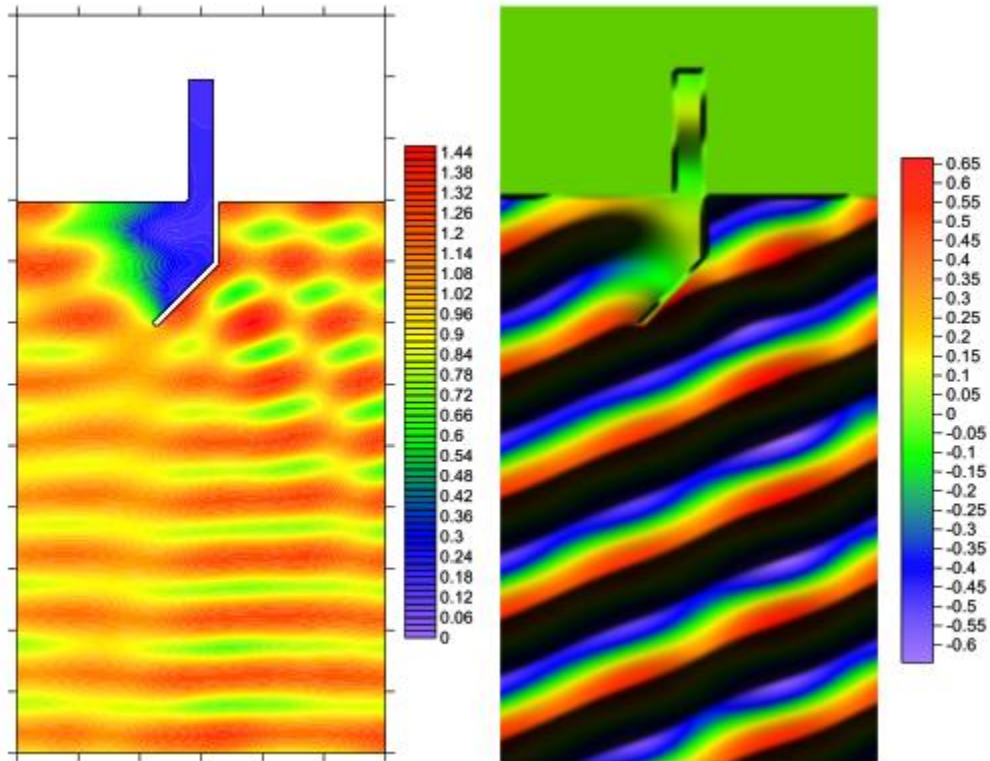
Caso 2 (32)



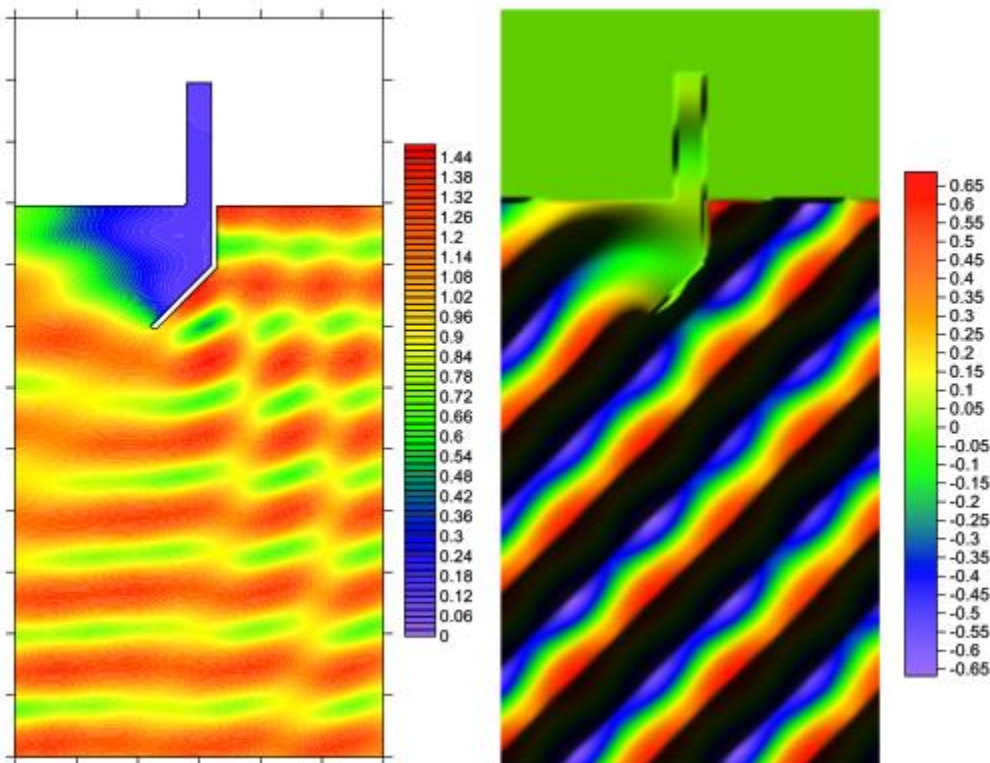
Caso 3 (33)



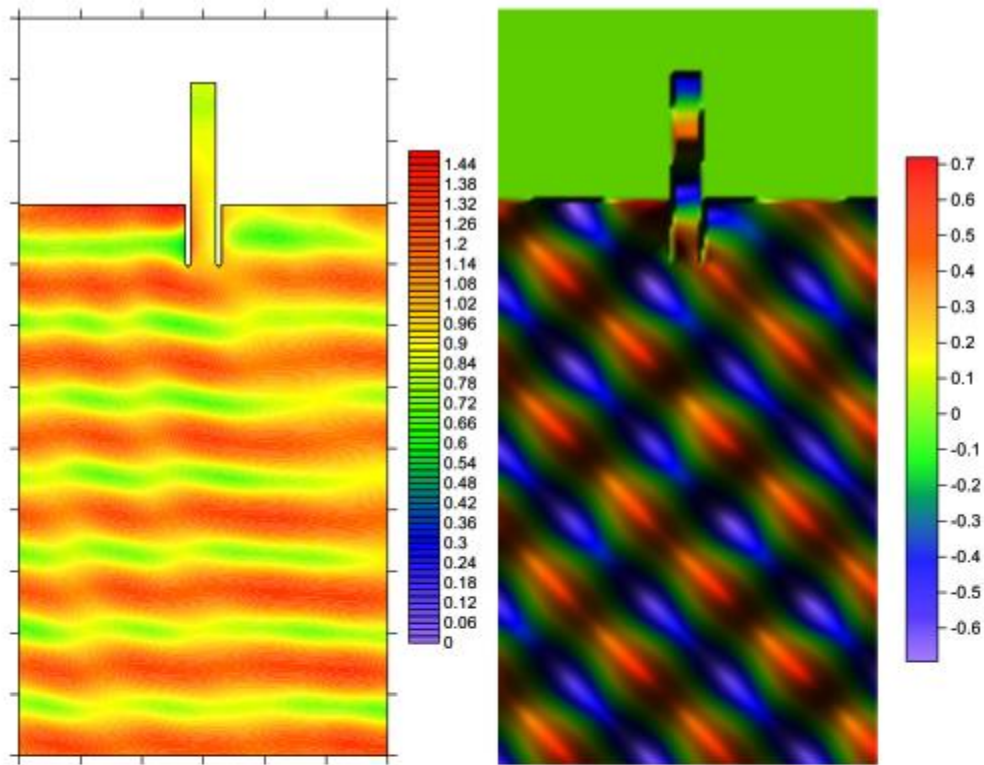
Caso 4 (34)



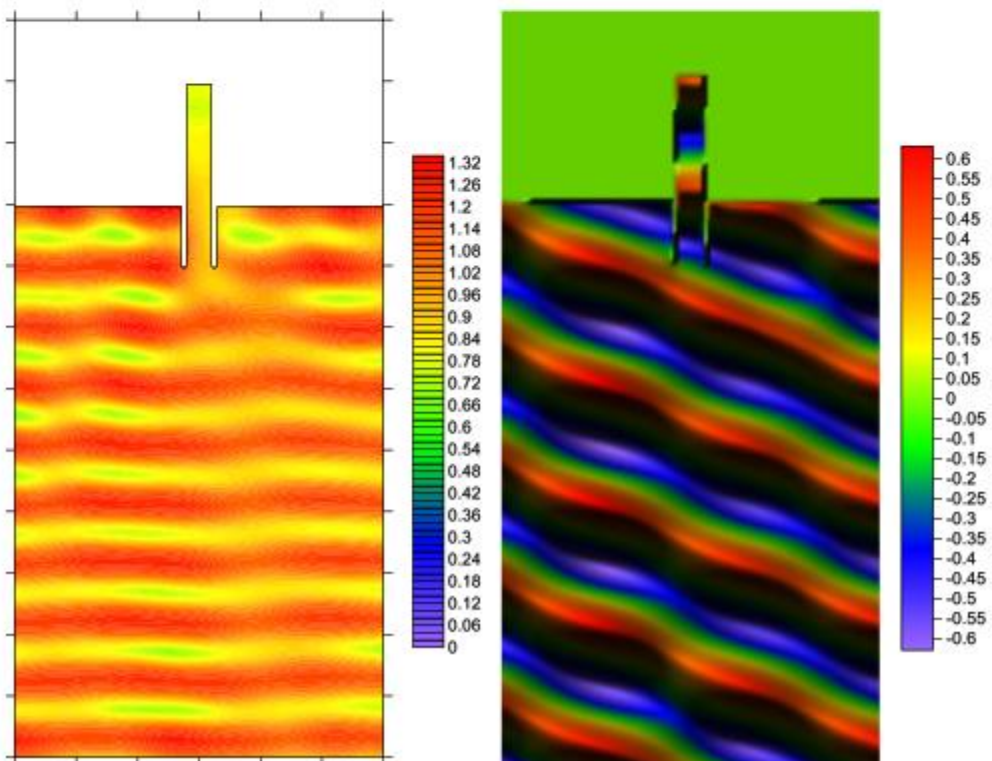
Caso 5 (35)



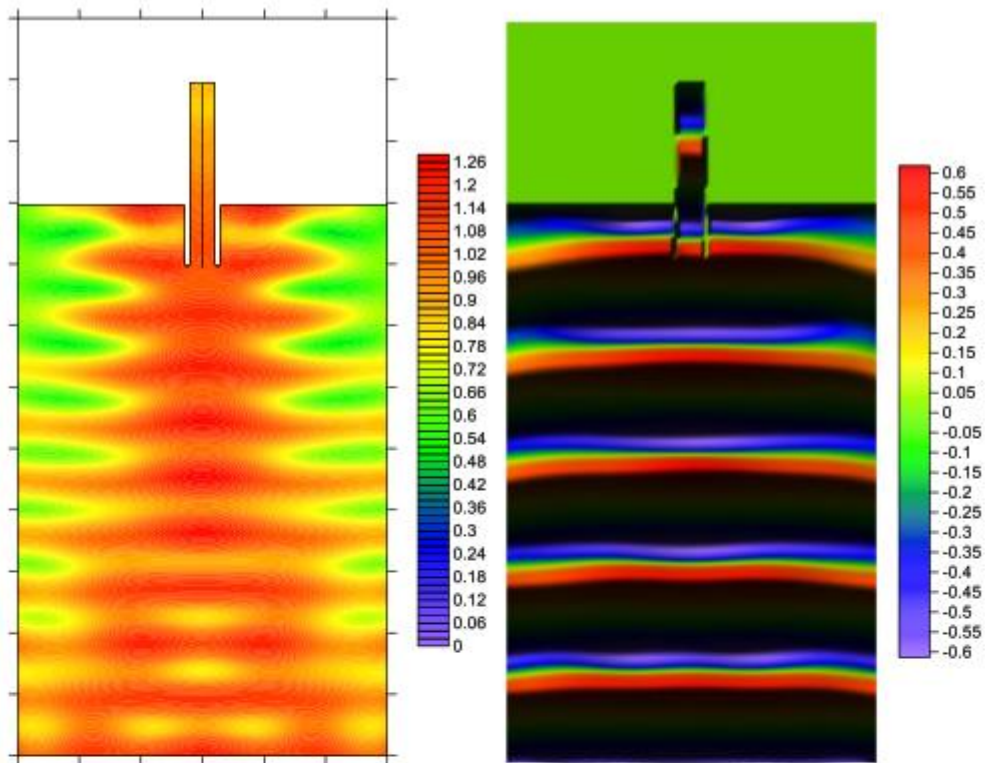
Caso 1 (36) R



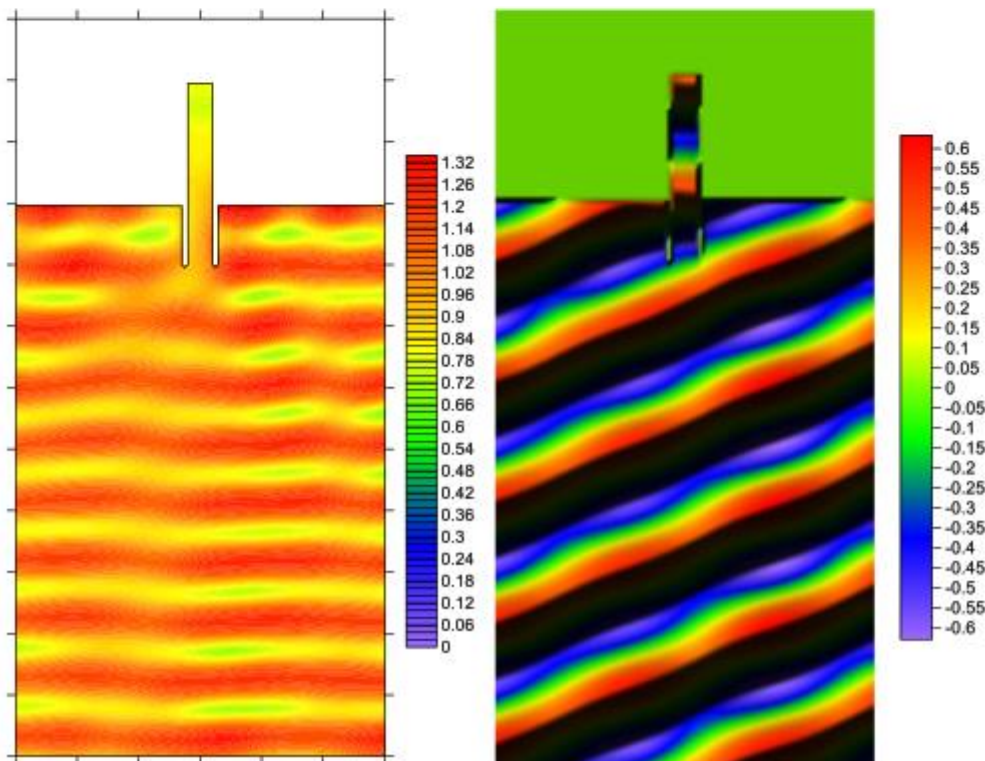
Caso 2 (37) R



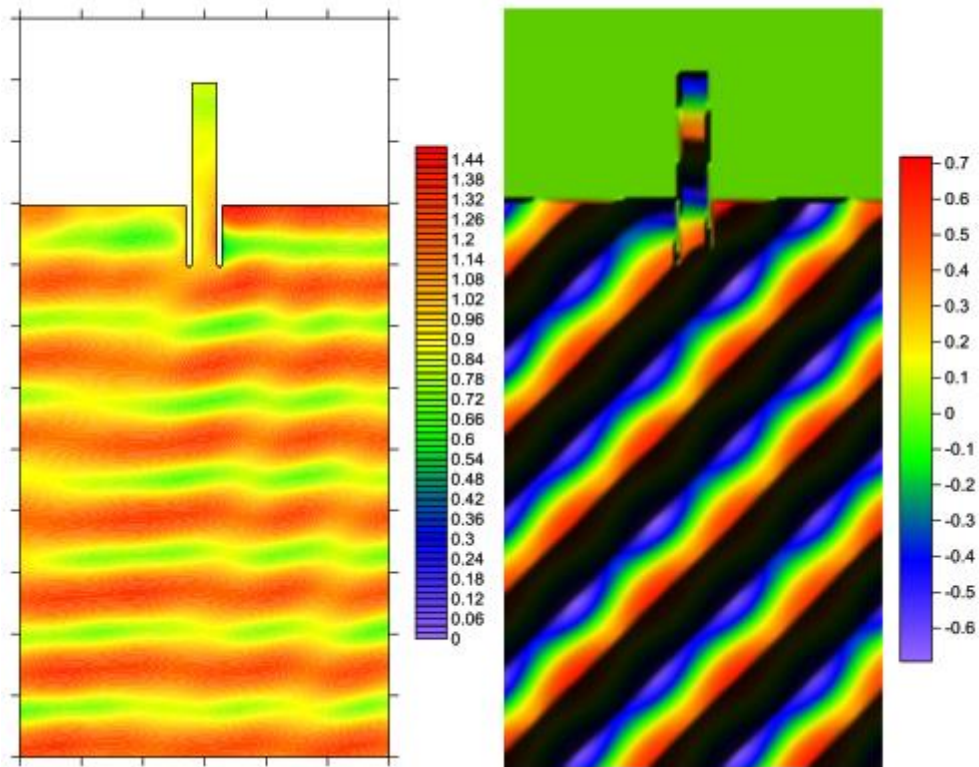
Caso 3 (38) R



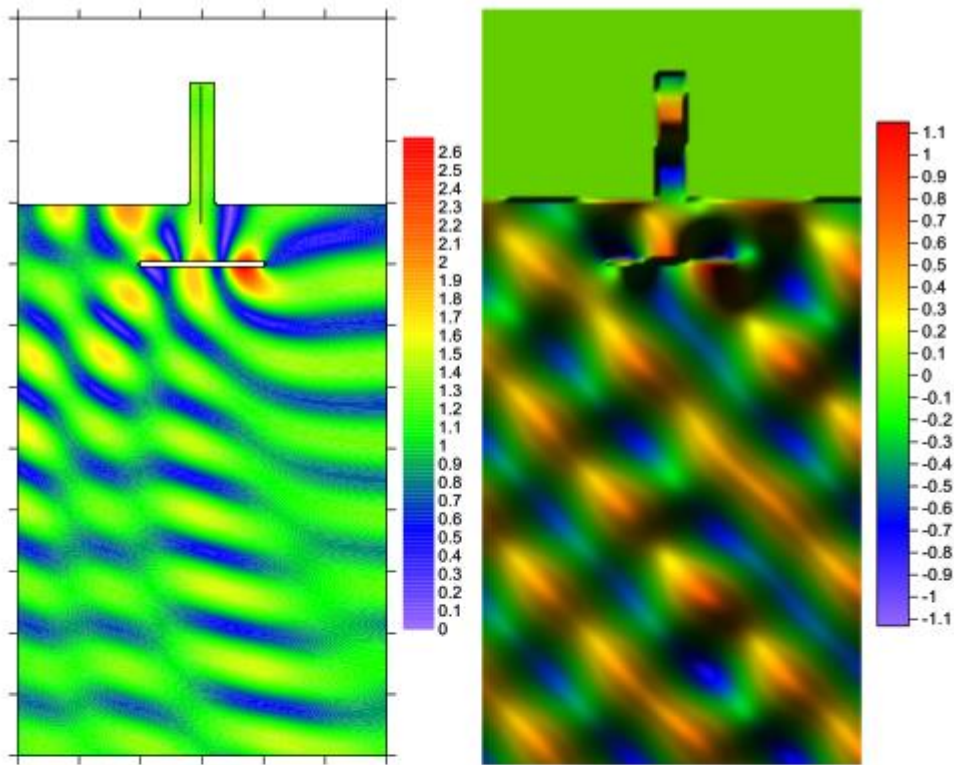
Caso 4 (39) R



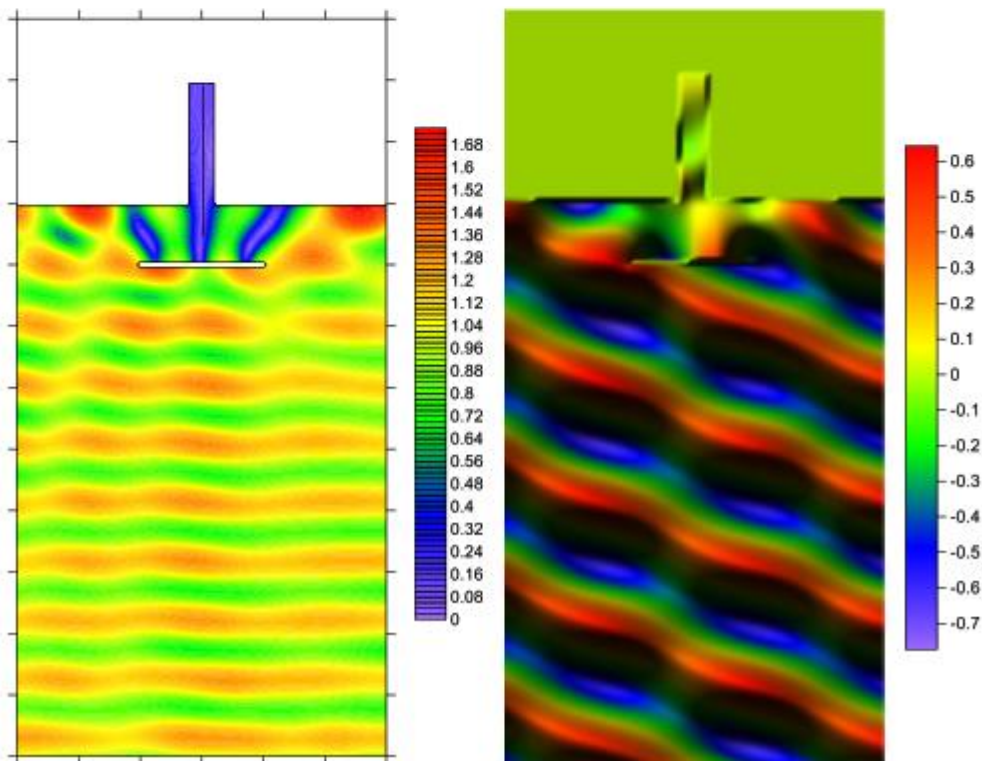
Caso 5 (40) R



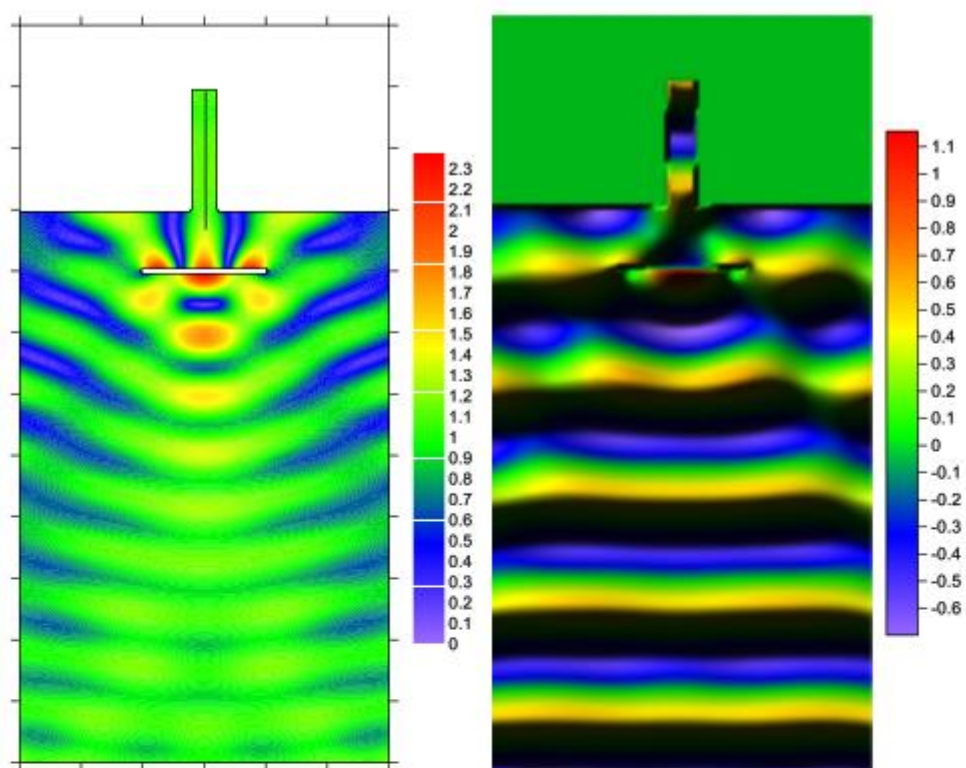
Caso 1 (41)



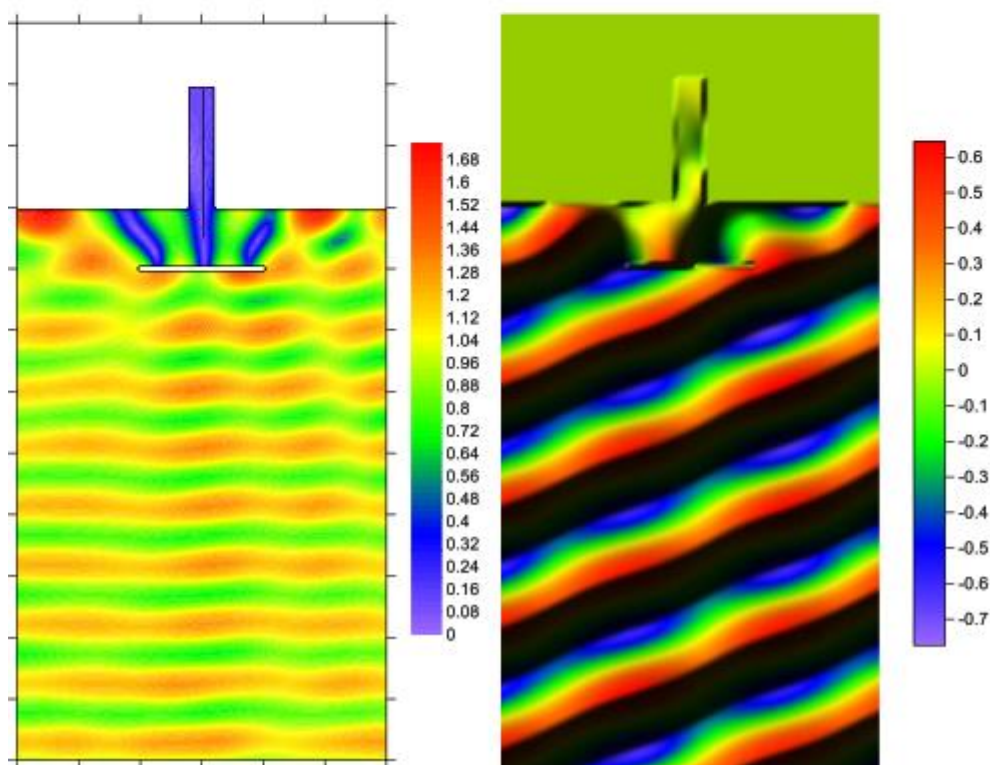
Caso 2 (42)



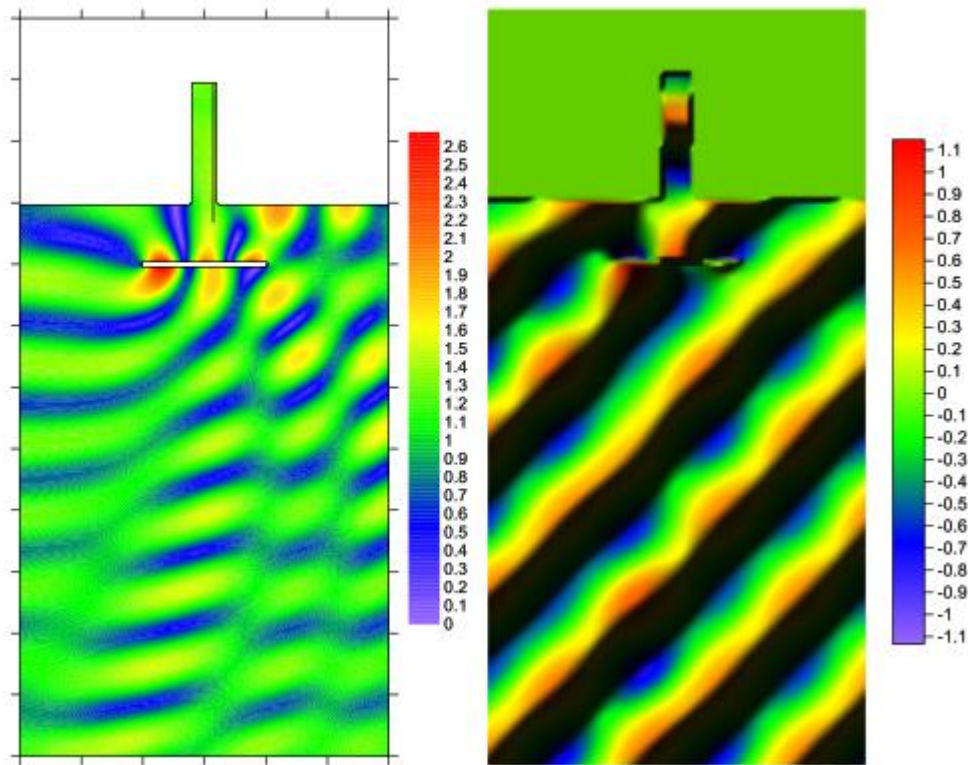
Caso 3 (43)



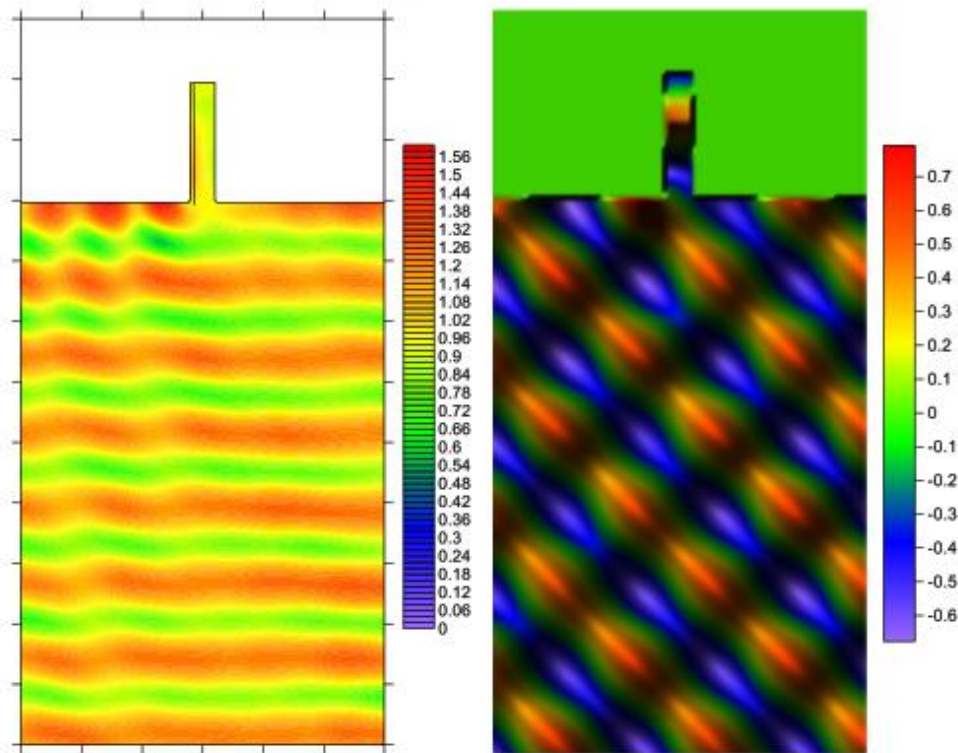
Caso 4 (44)



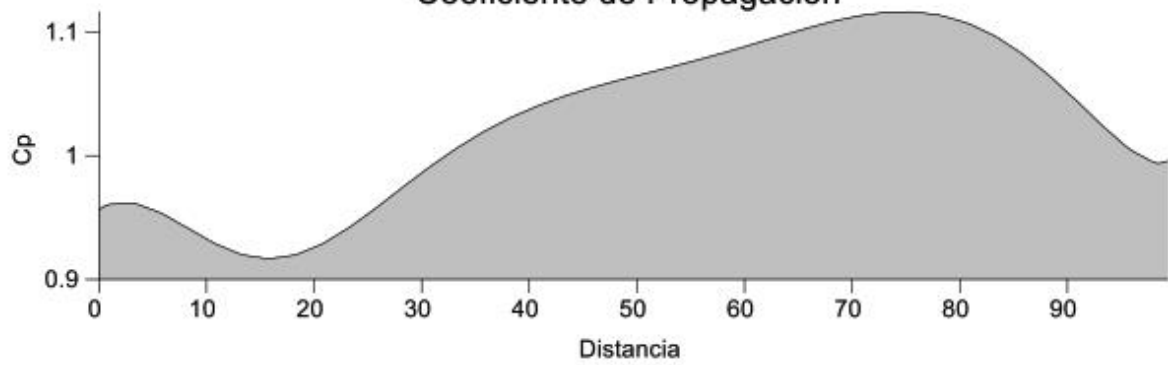
Caso 5 (45)



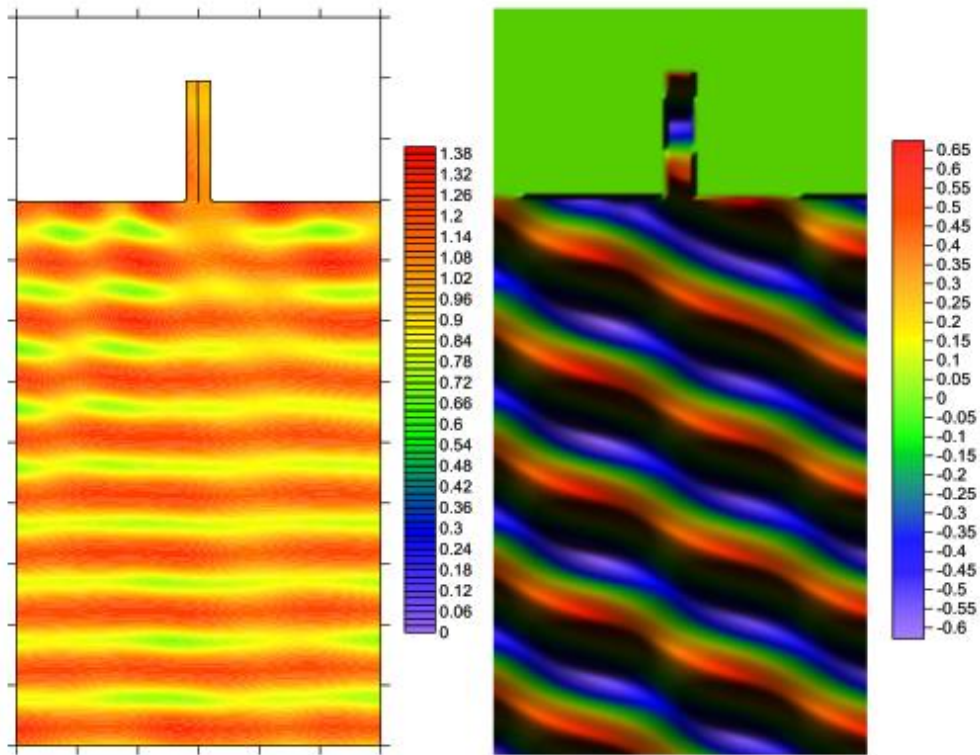
Caso 1 (46) R



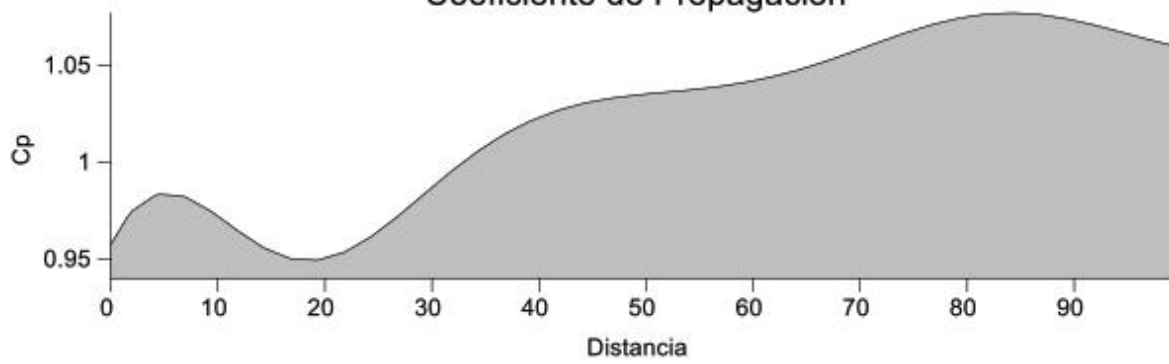
Coeficiente de Propagación



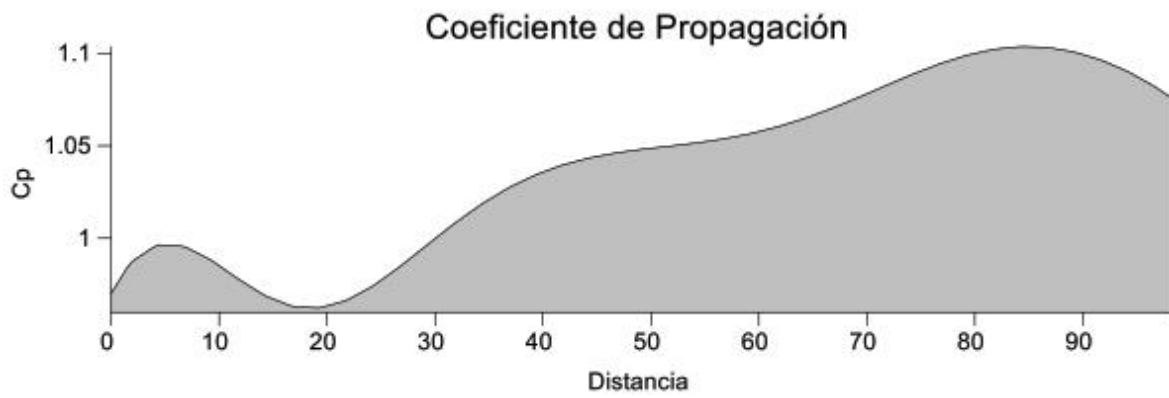
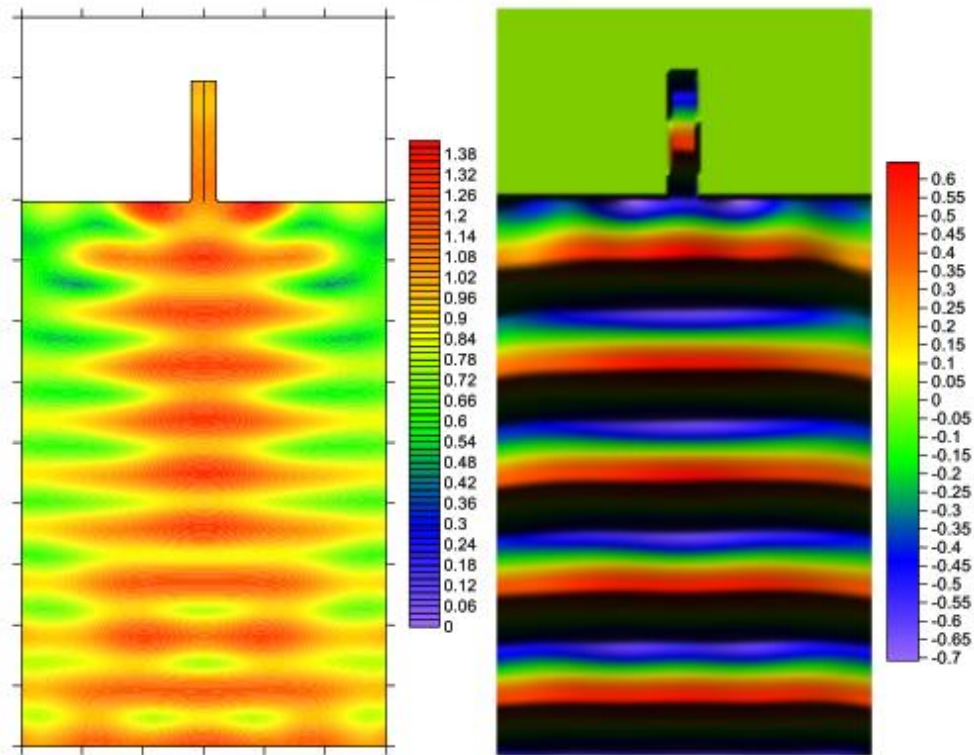
Caso 2 (47) R



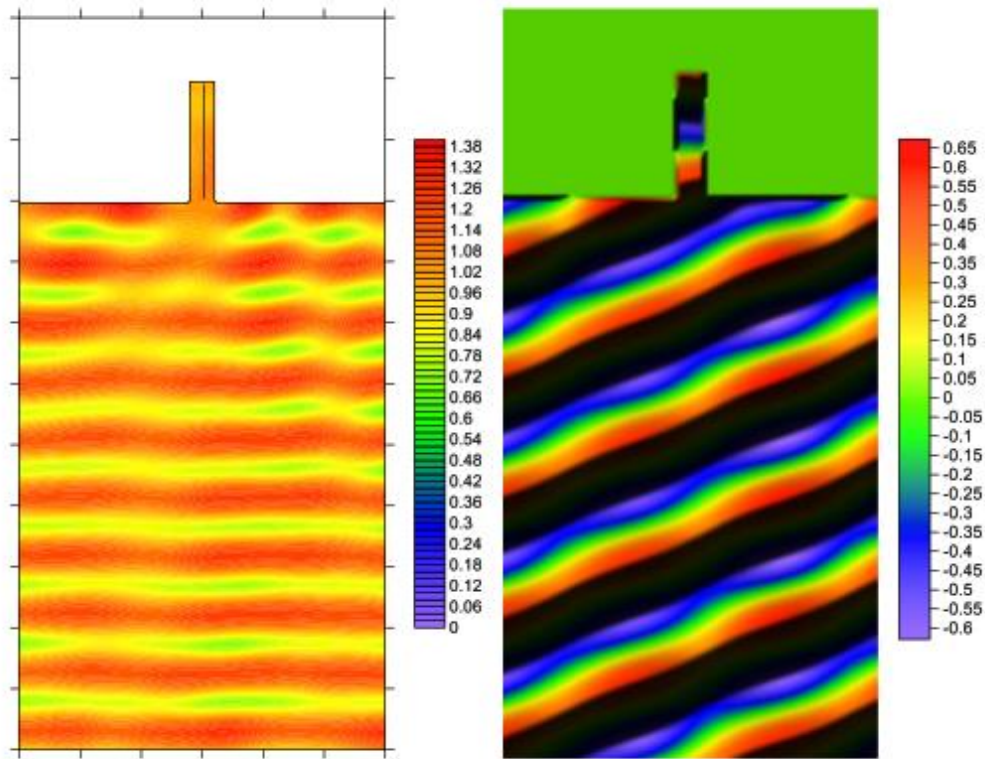
Coeficiente de Propagación



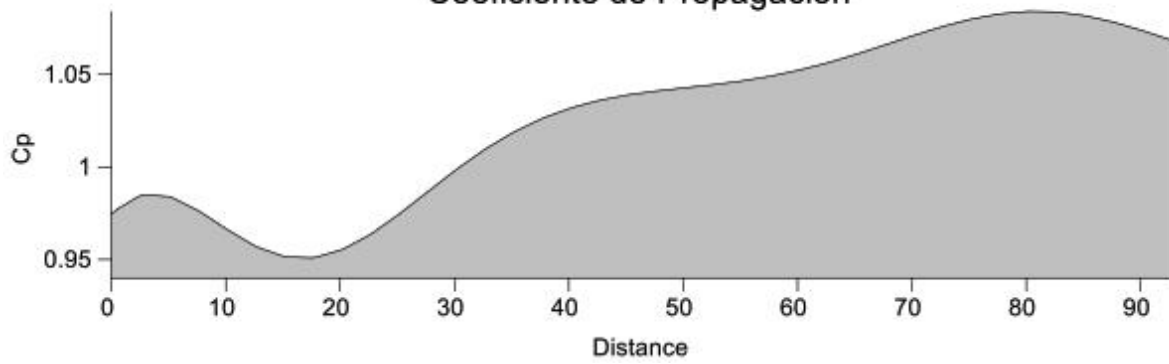
Caso 3 (48) R



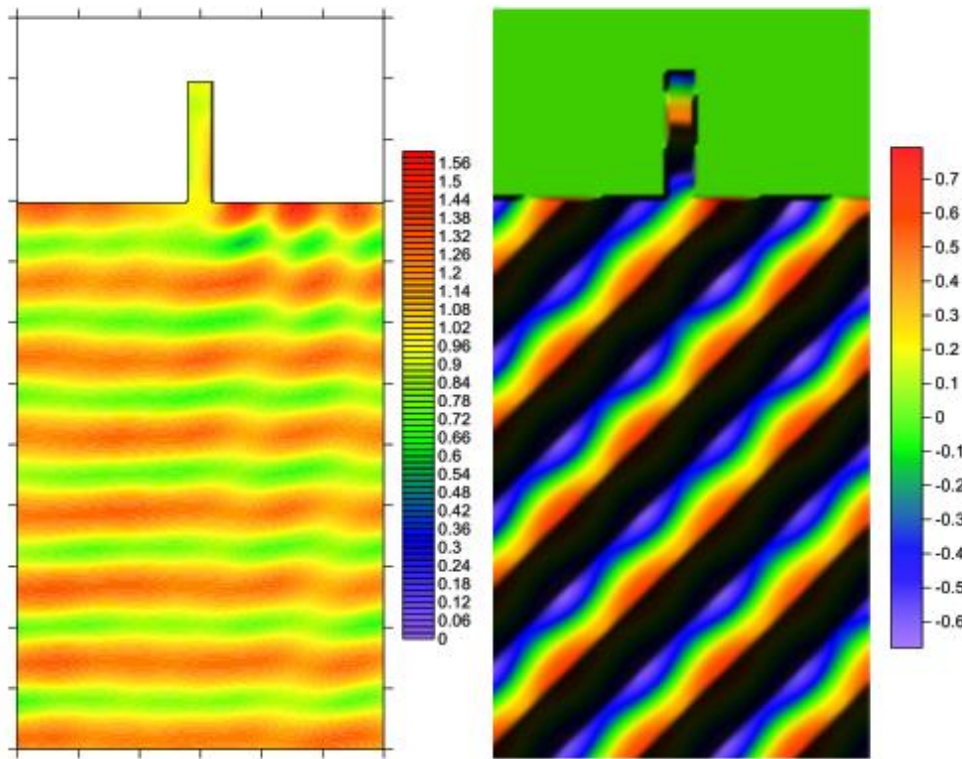
Caso 4 (49)



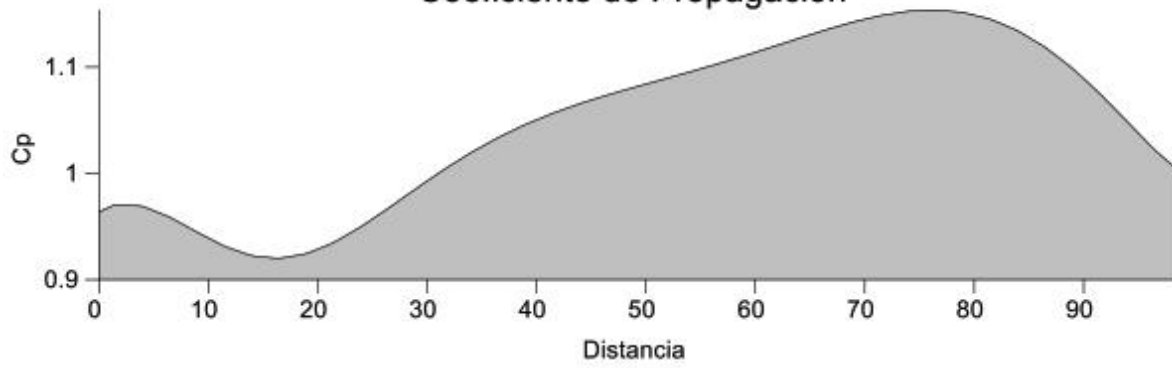
Coeficiente de Propagación



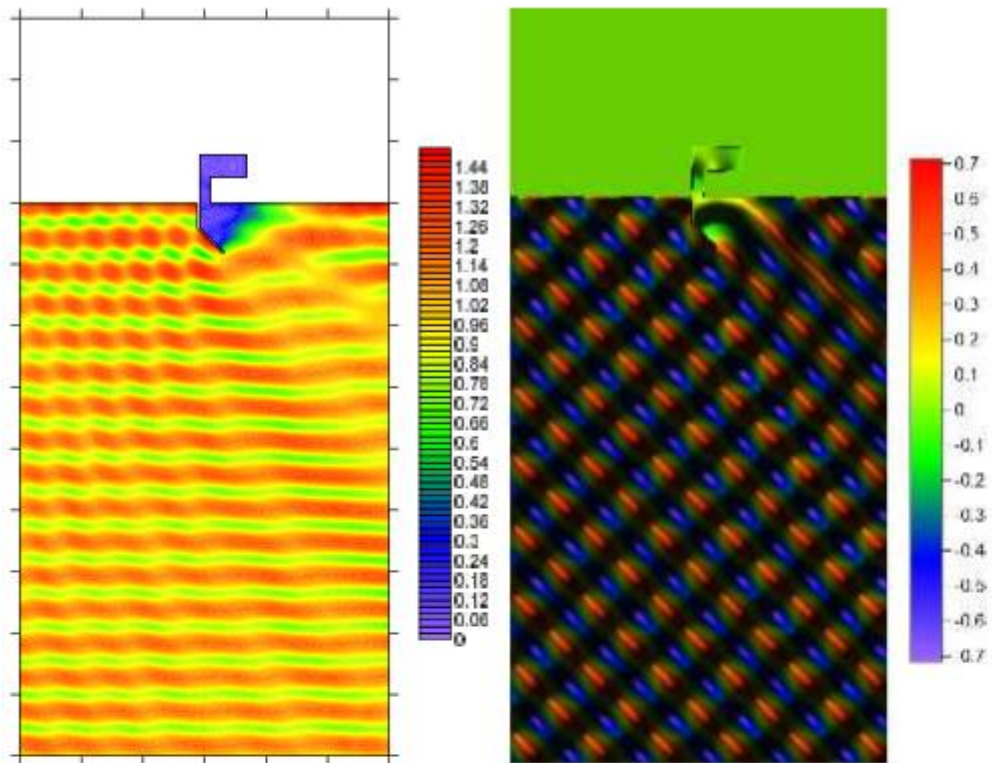
Caso 5 (50)



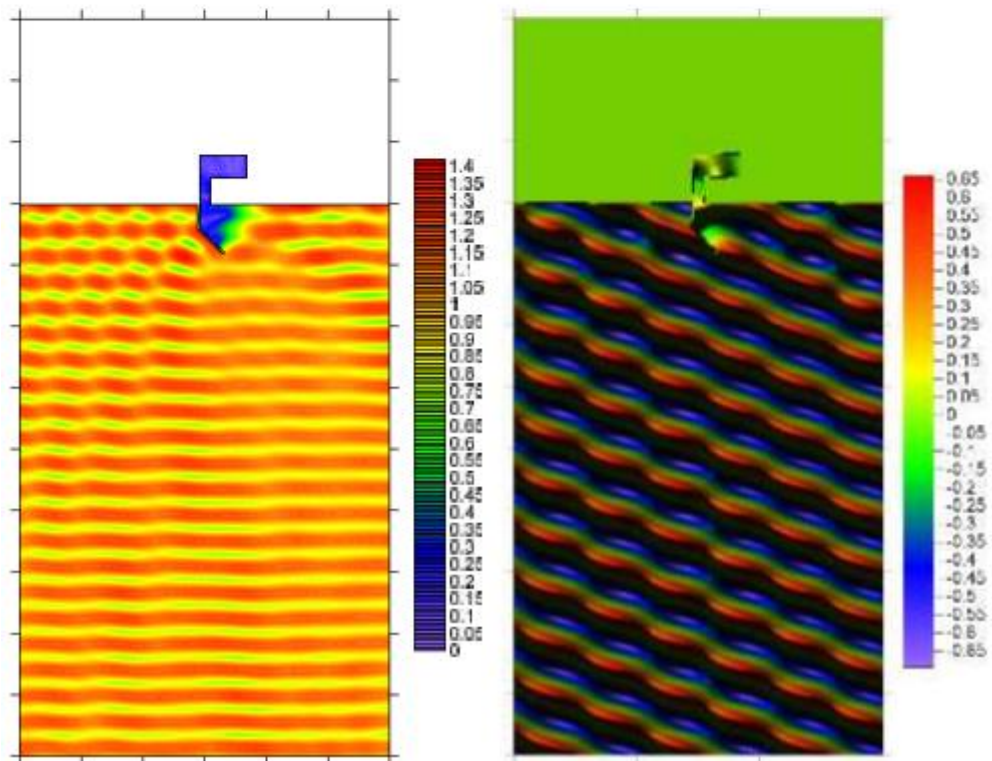
Coefficiente de Propagación



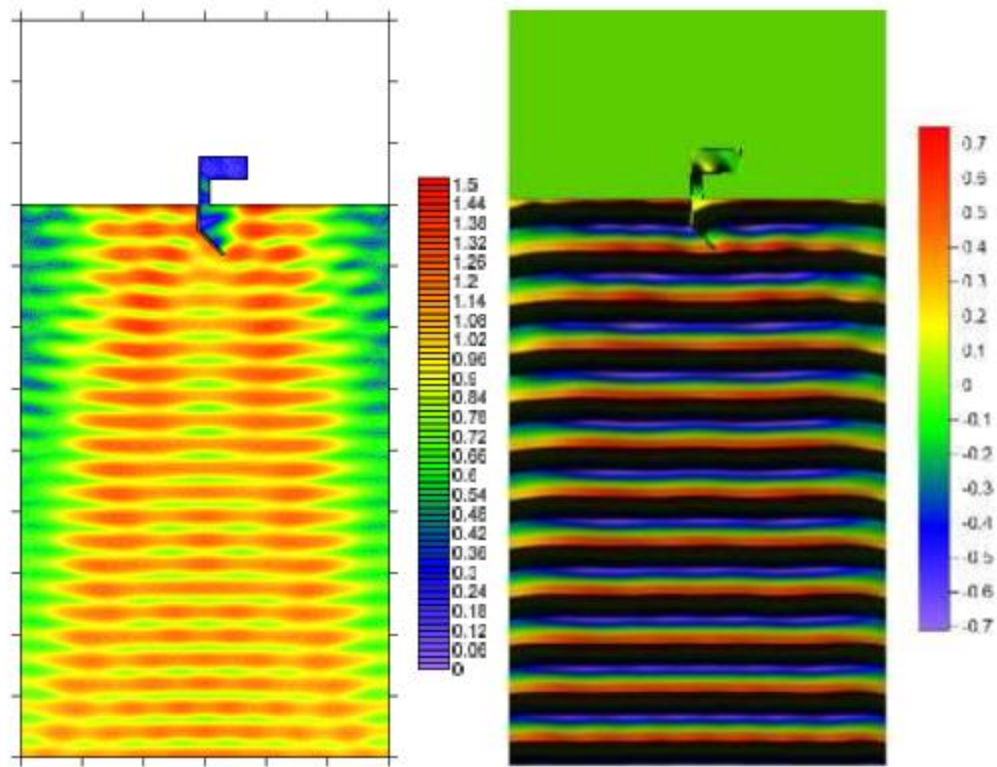
Caso 1 (51)



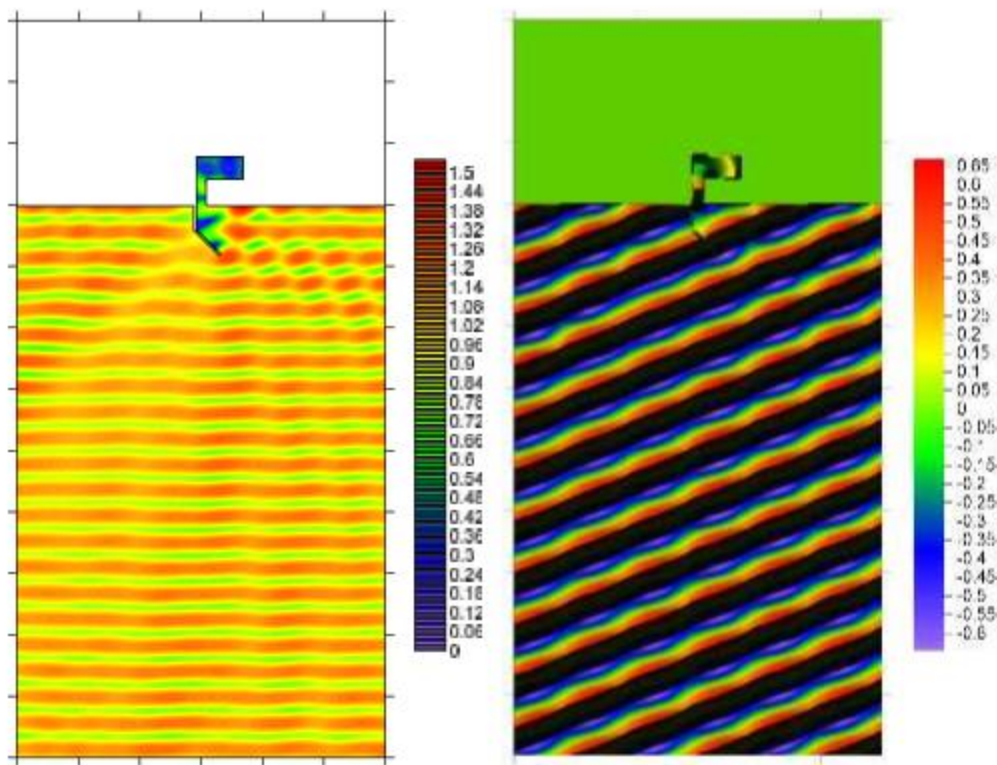
Caso 2 (52)



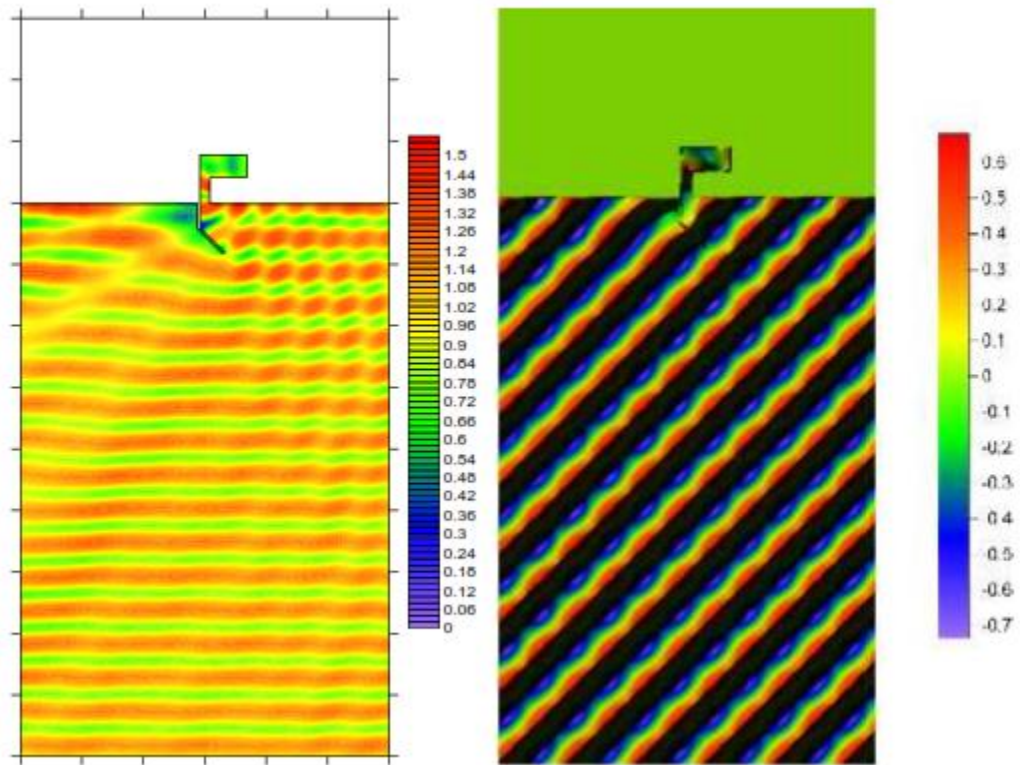
Caso 3 (53)



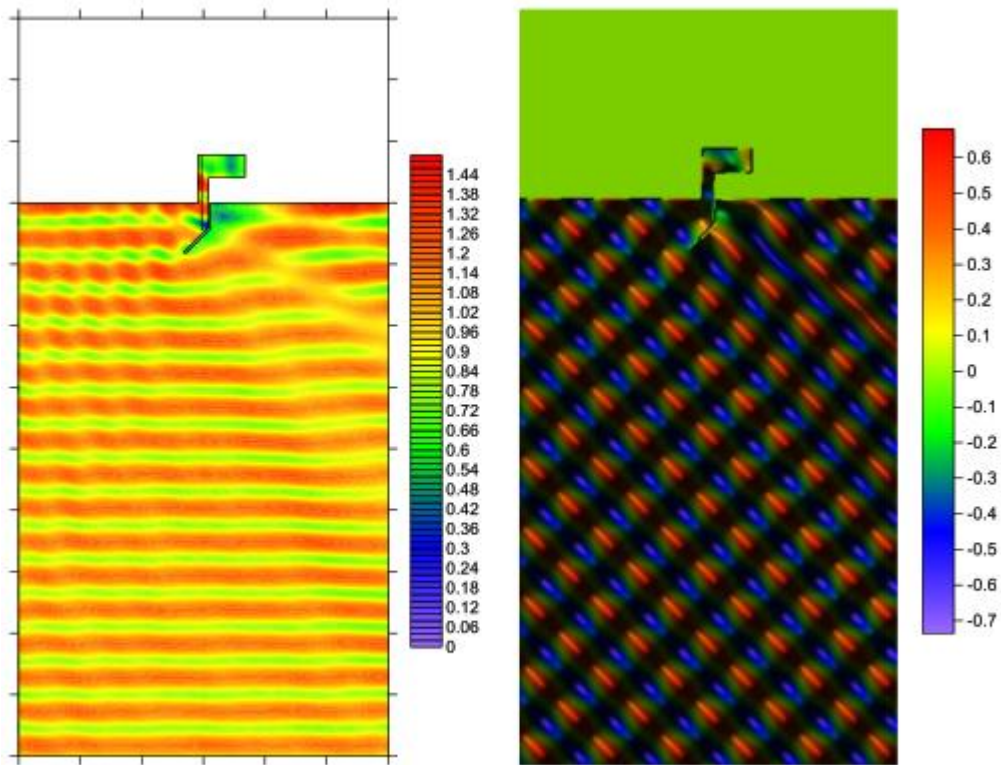
Caso 4 (54)



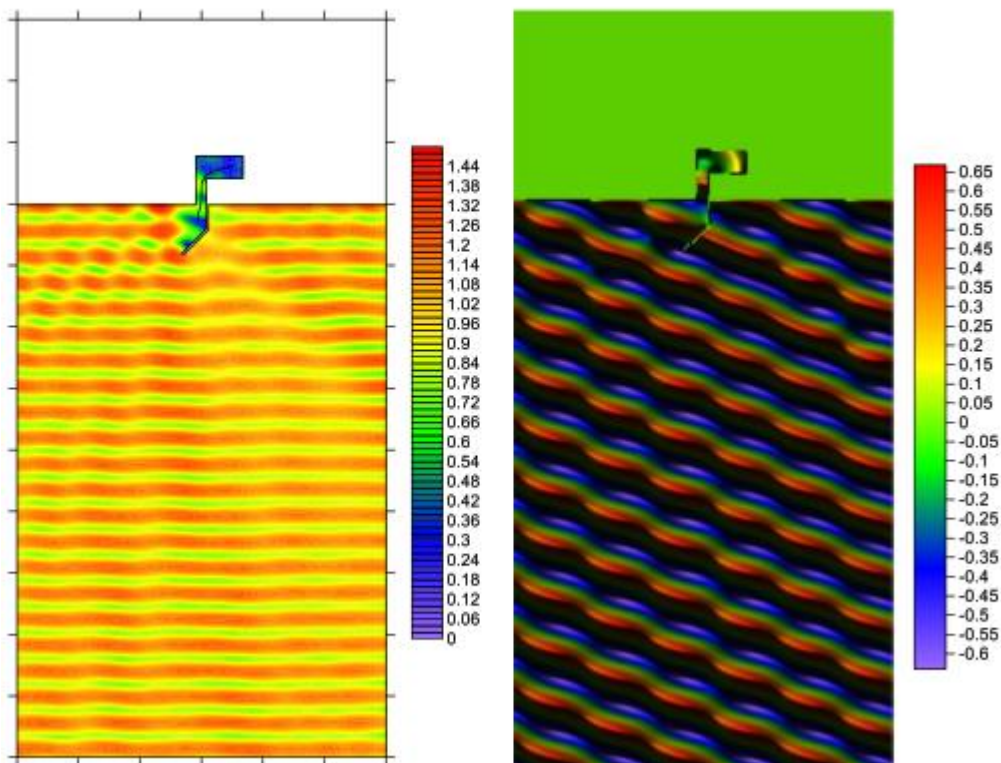
Caso 5 (55) R



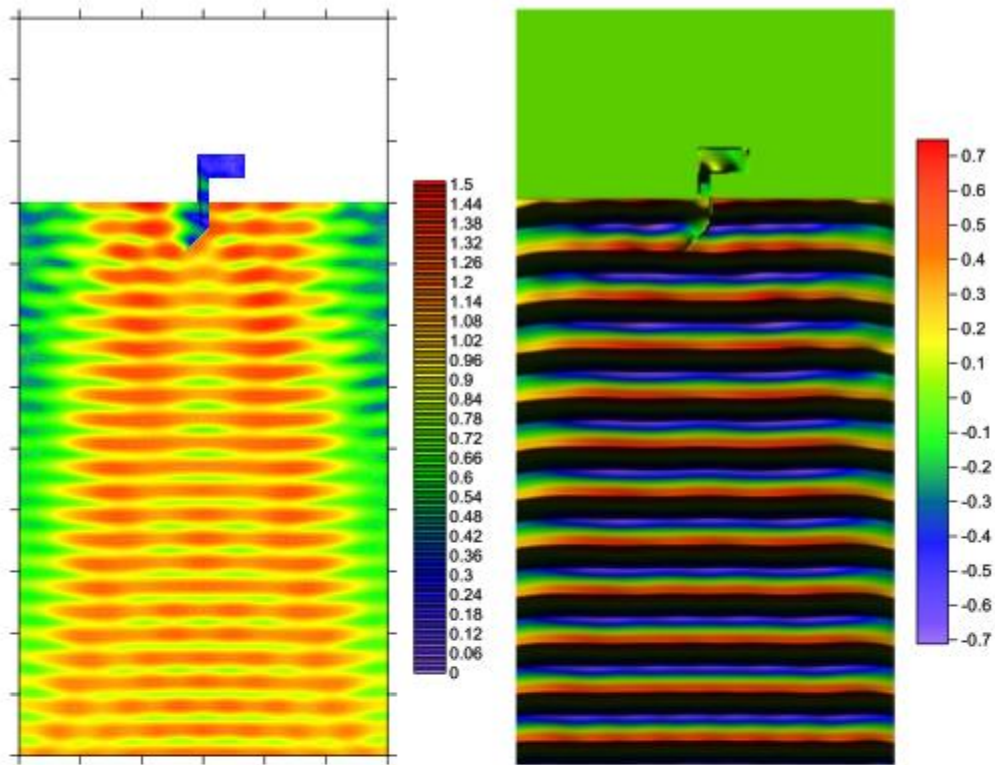
Caso 1 (56) R



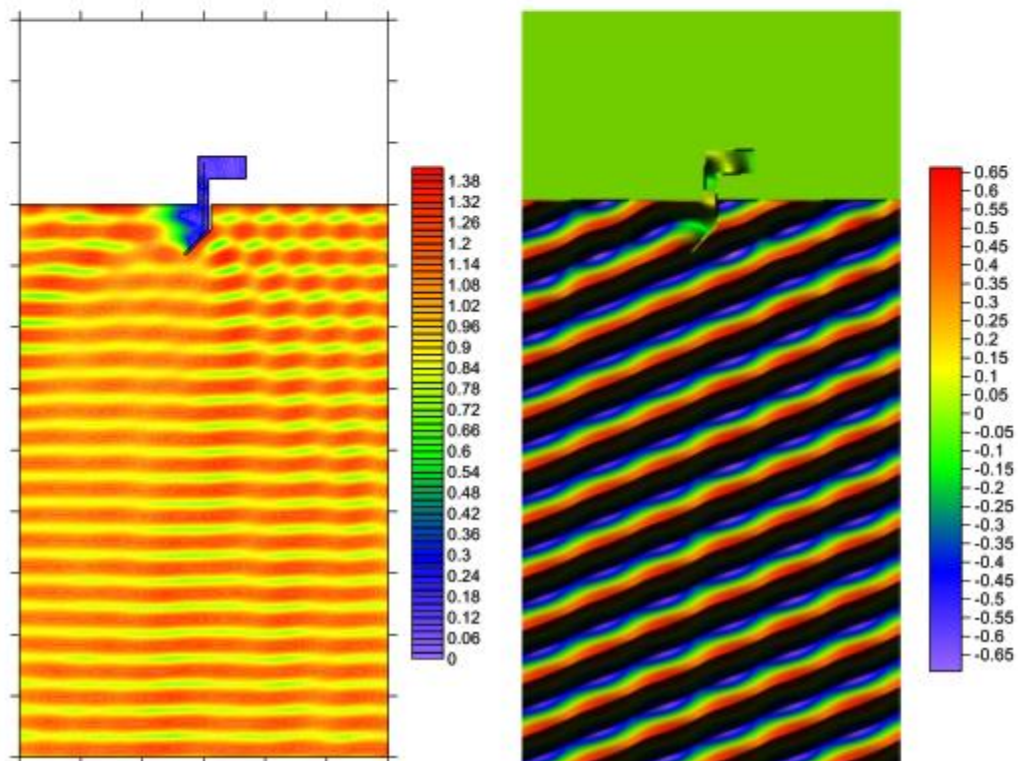
Caso 2 (57)



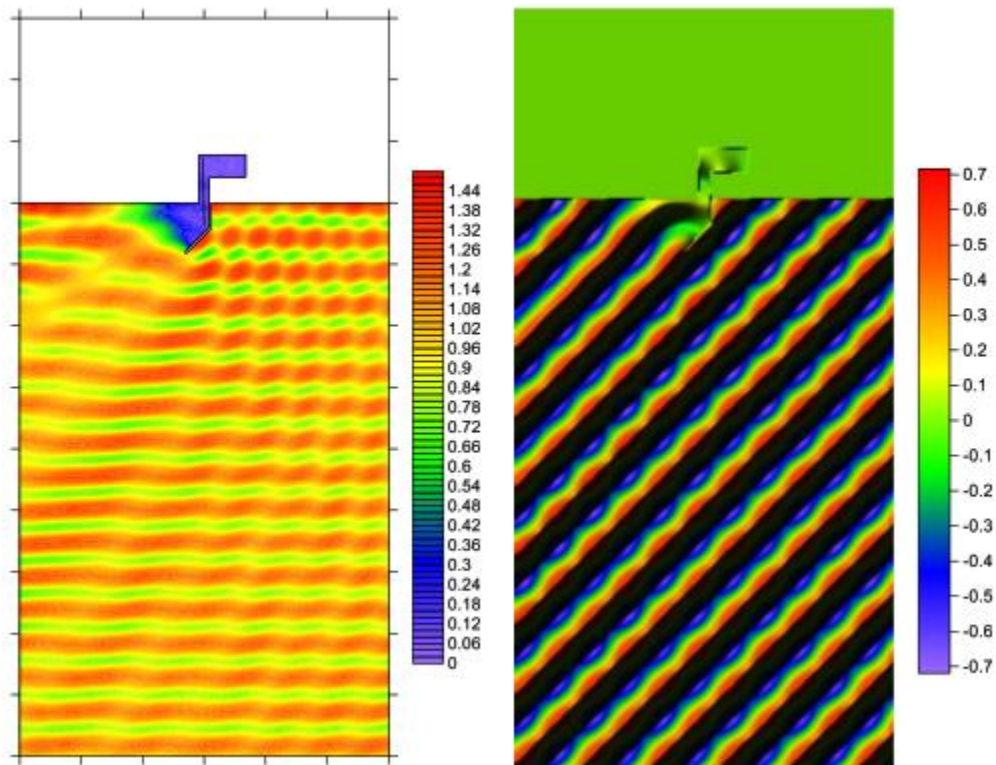
Caso 3 (58)



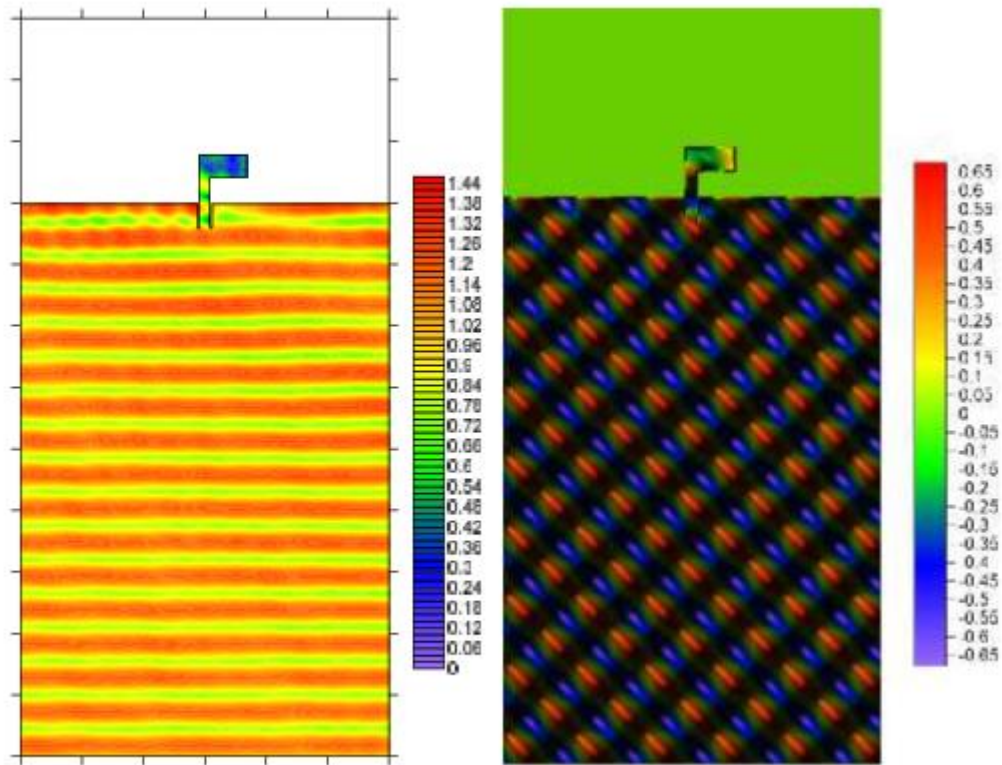
Caso 4 (59)



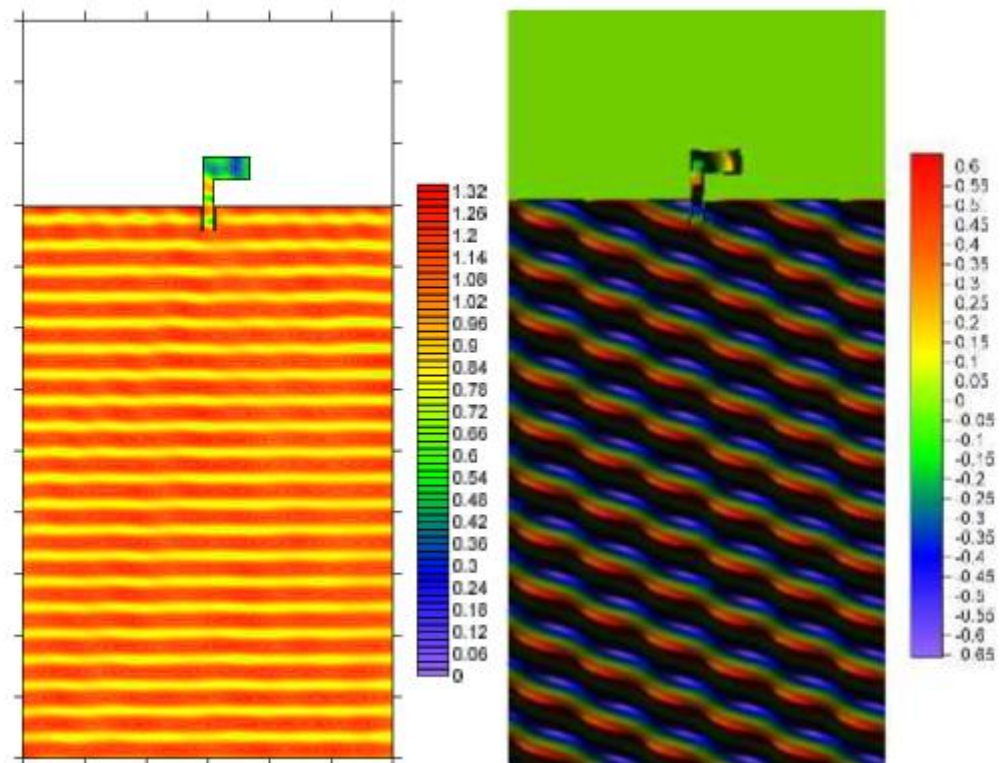
Caso 5 (60)



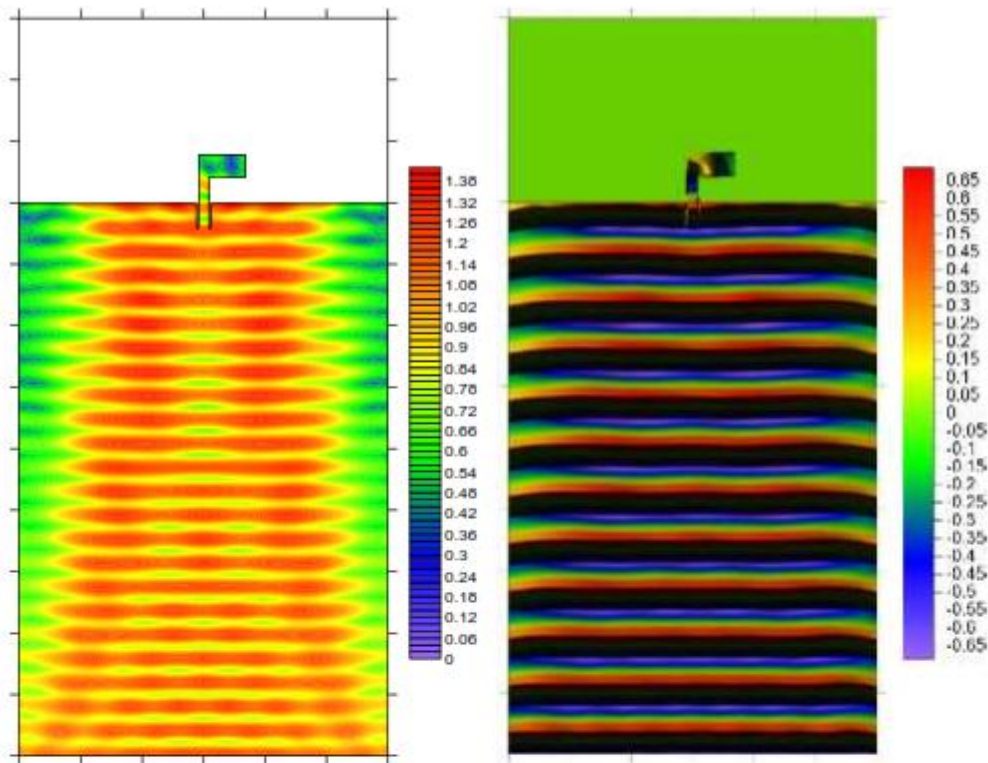
Caso 1 (61)



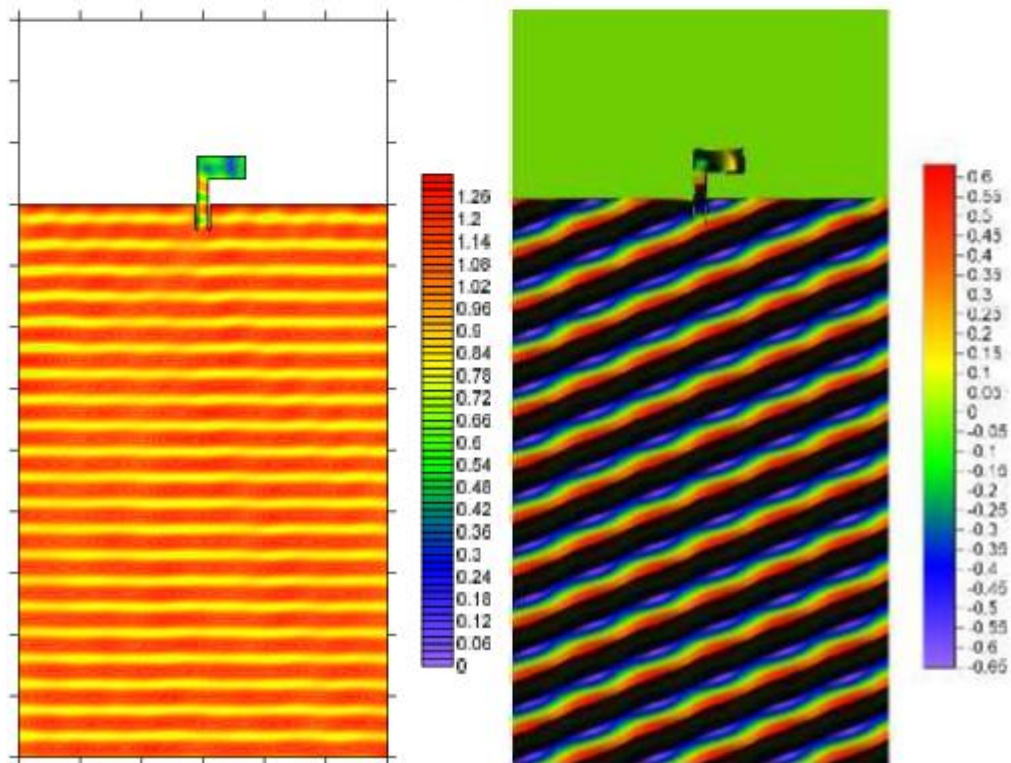
Caso 2 (62)



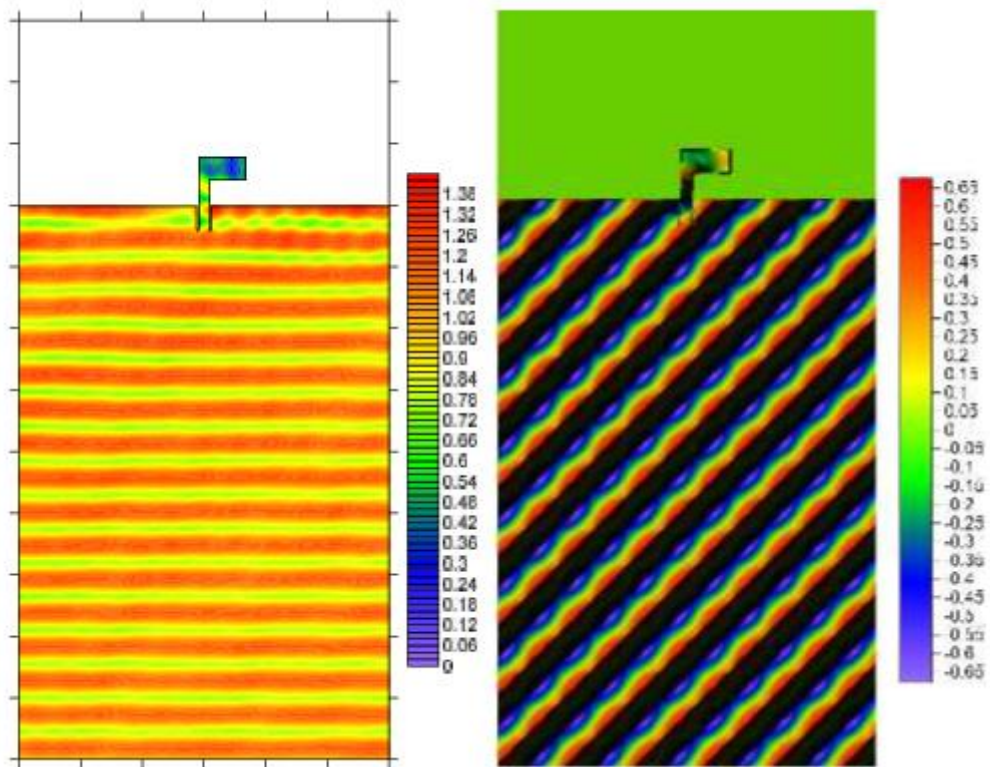
Caso 3 (63)



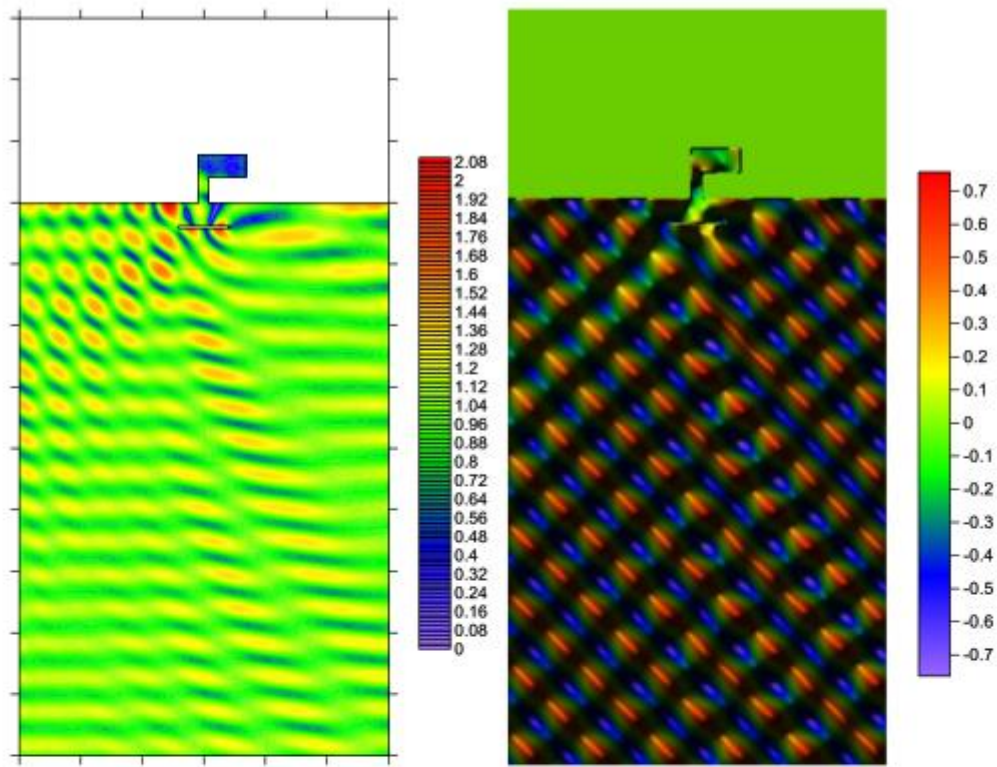
Caso 4 (64)



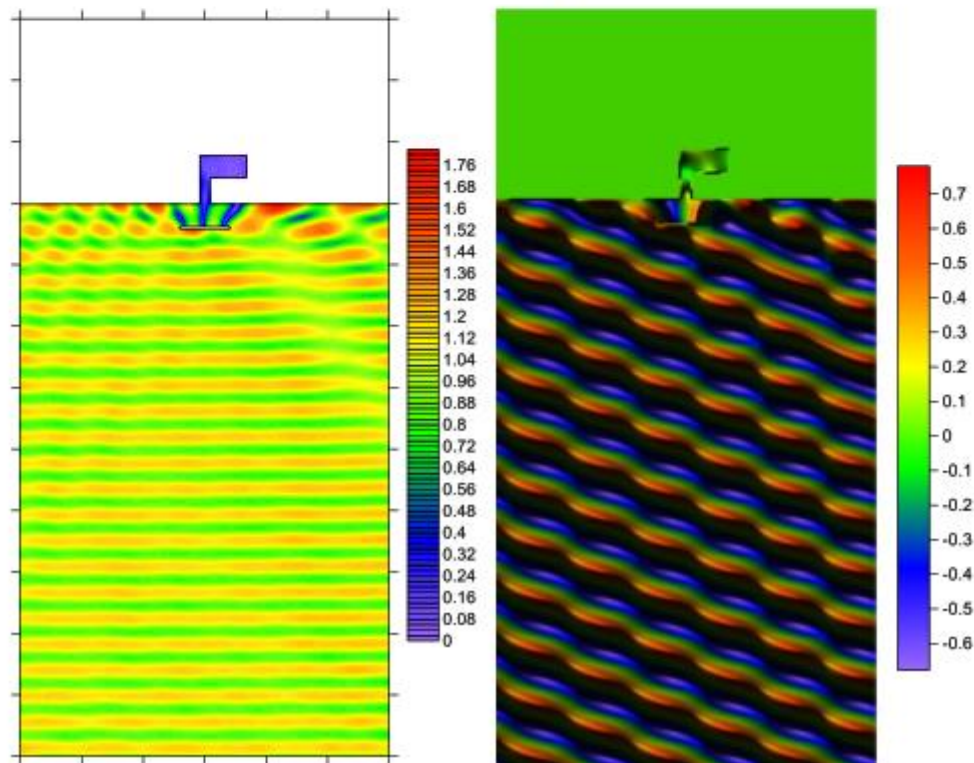
Caso 5 (65)



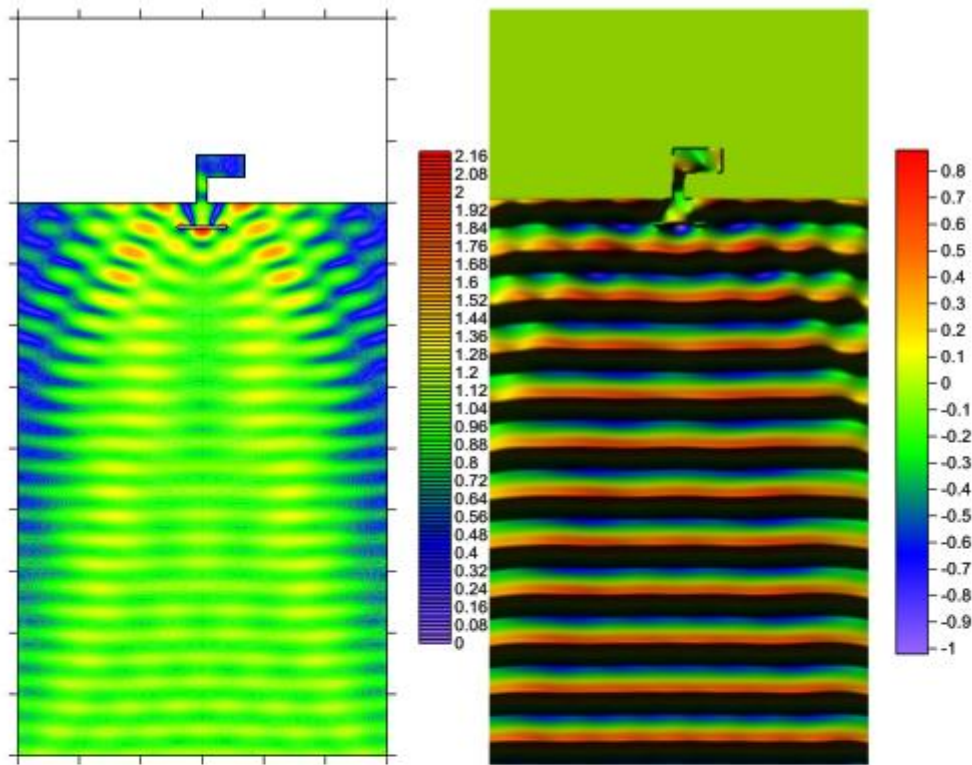
Caso 1 (66)



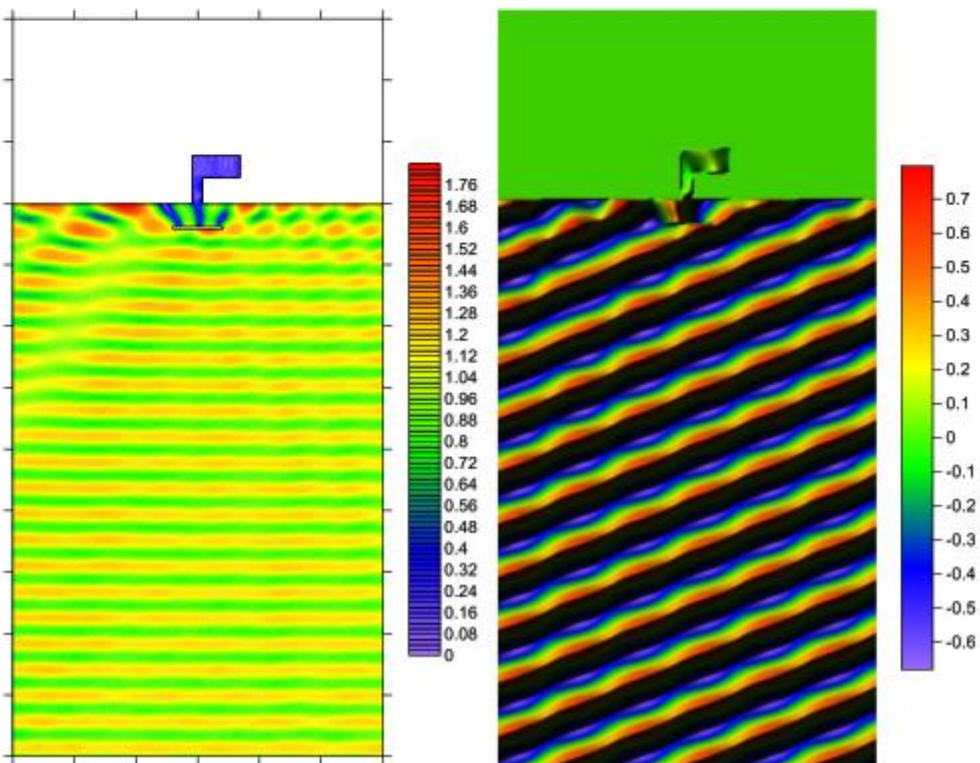
Caso 2 (67)



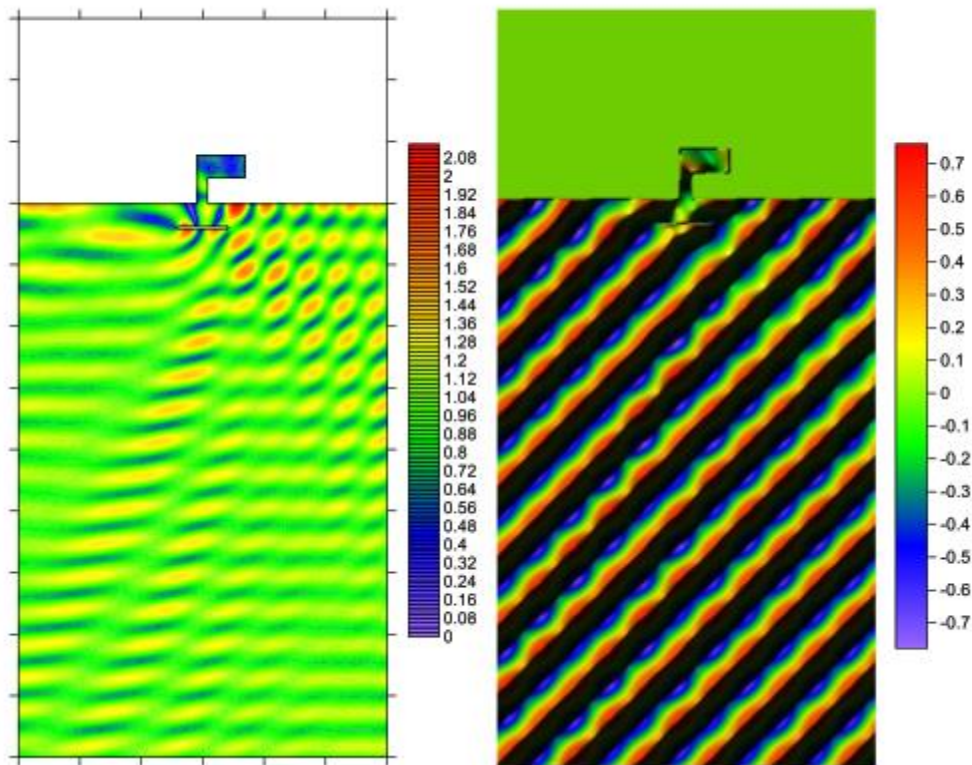
Caso 3 (68)



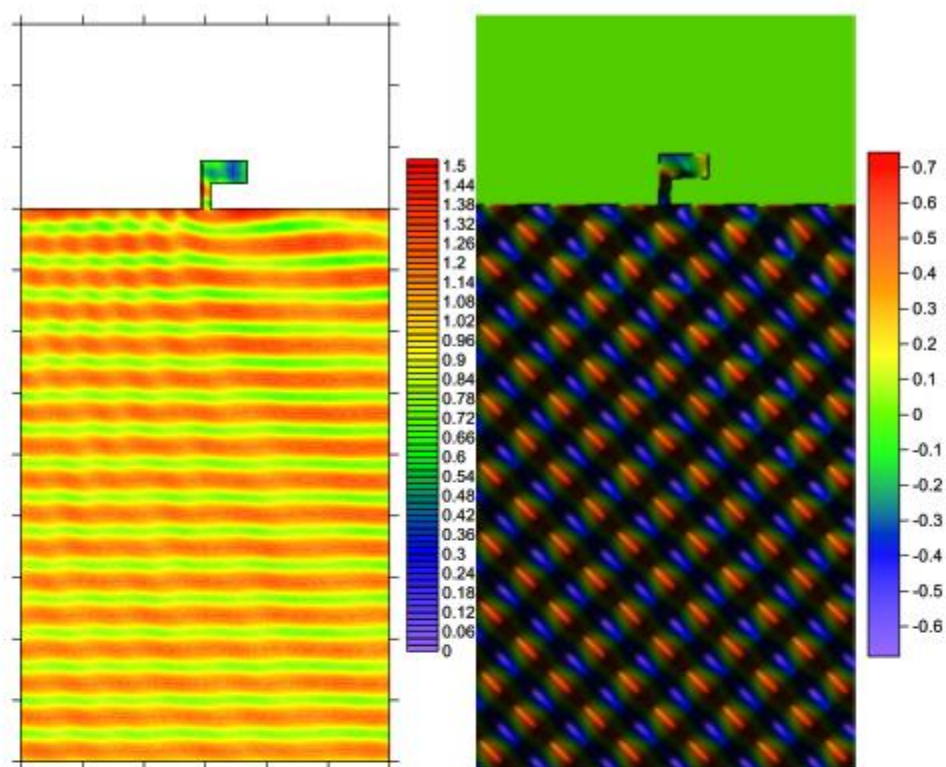
Caso 4 (69)



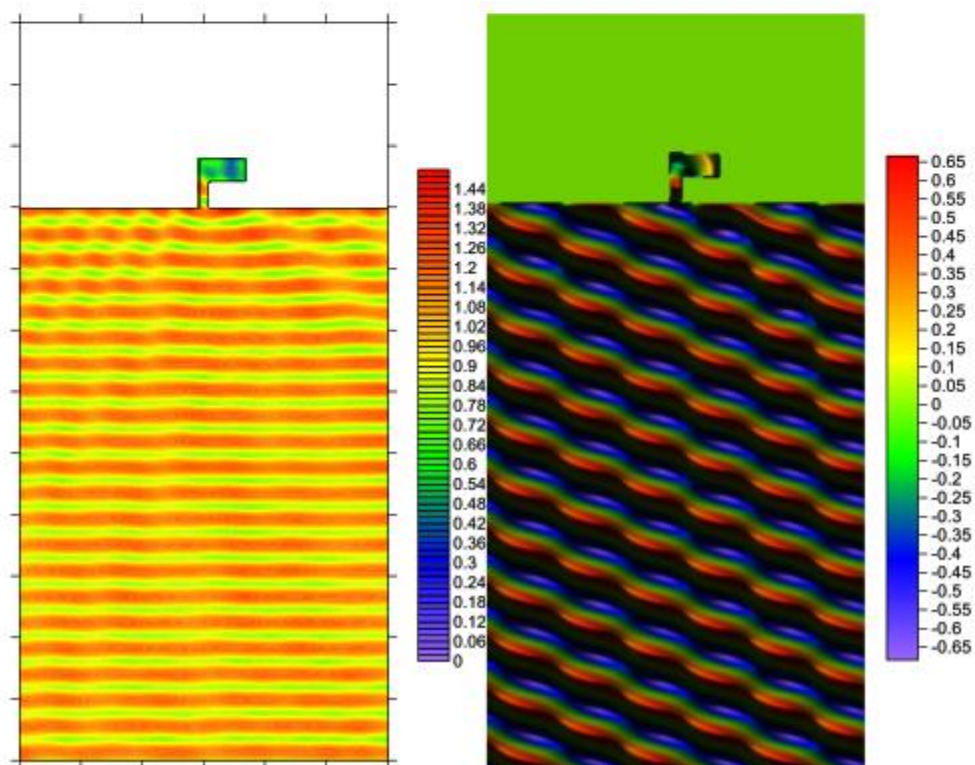
Caso 5 (70)



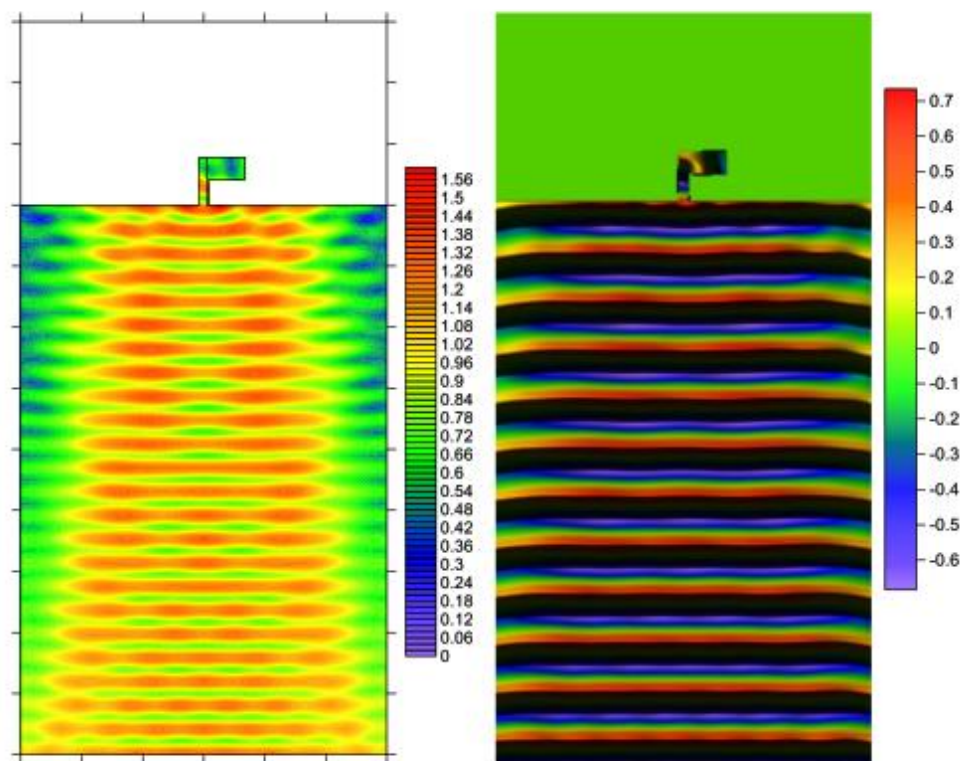
Caso 1 (71)



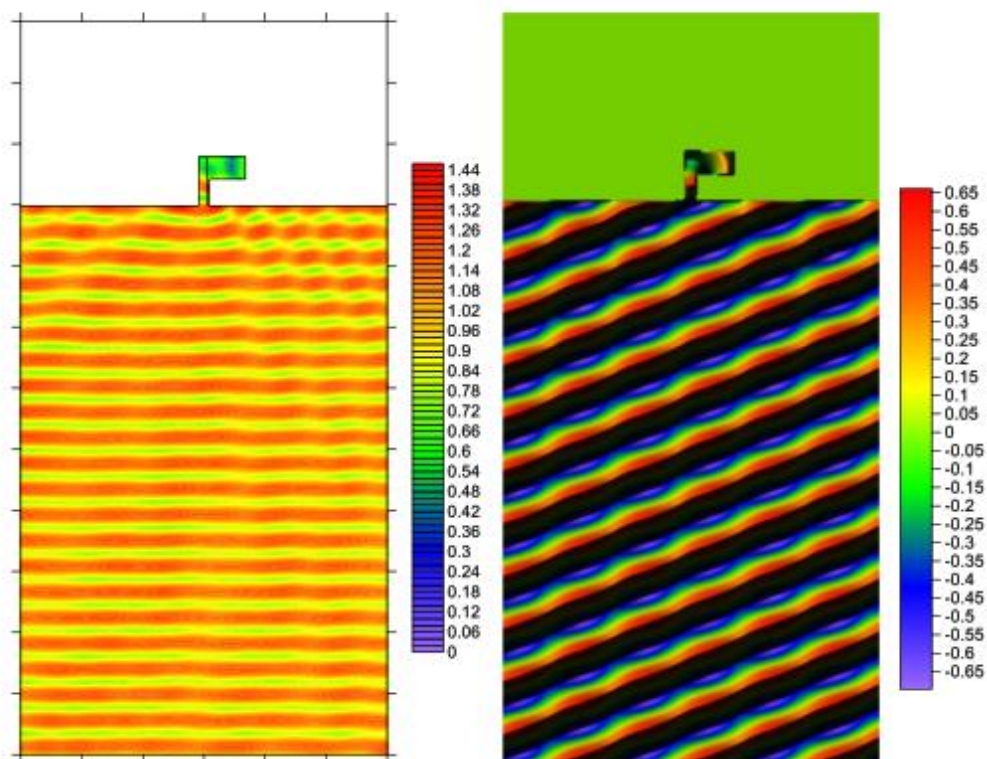
Caso 2 (72)



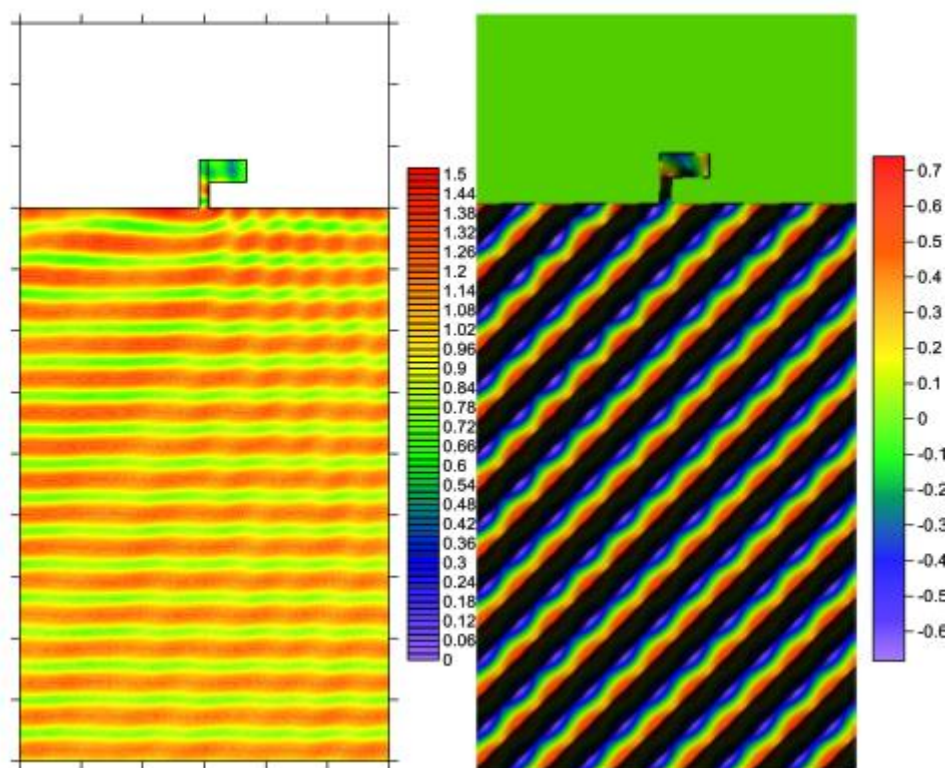
Caso 3 (73)



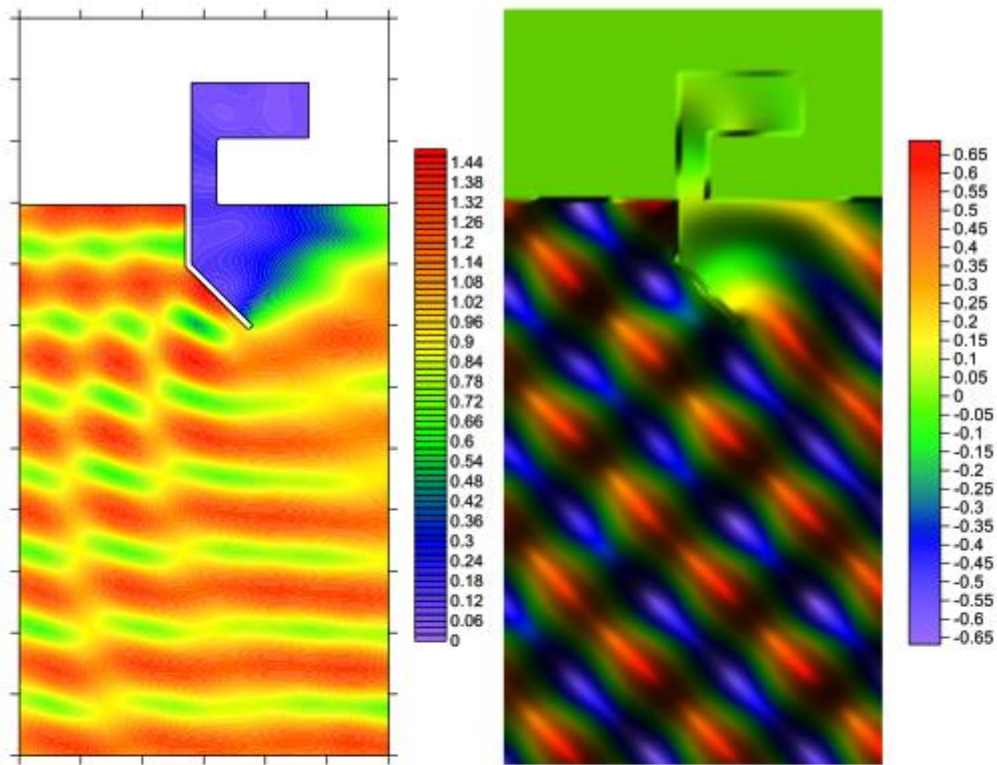
Caso 4 (74)



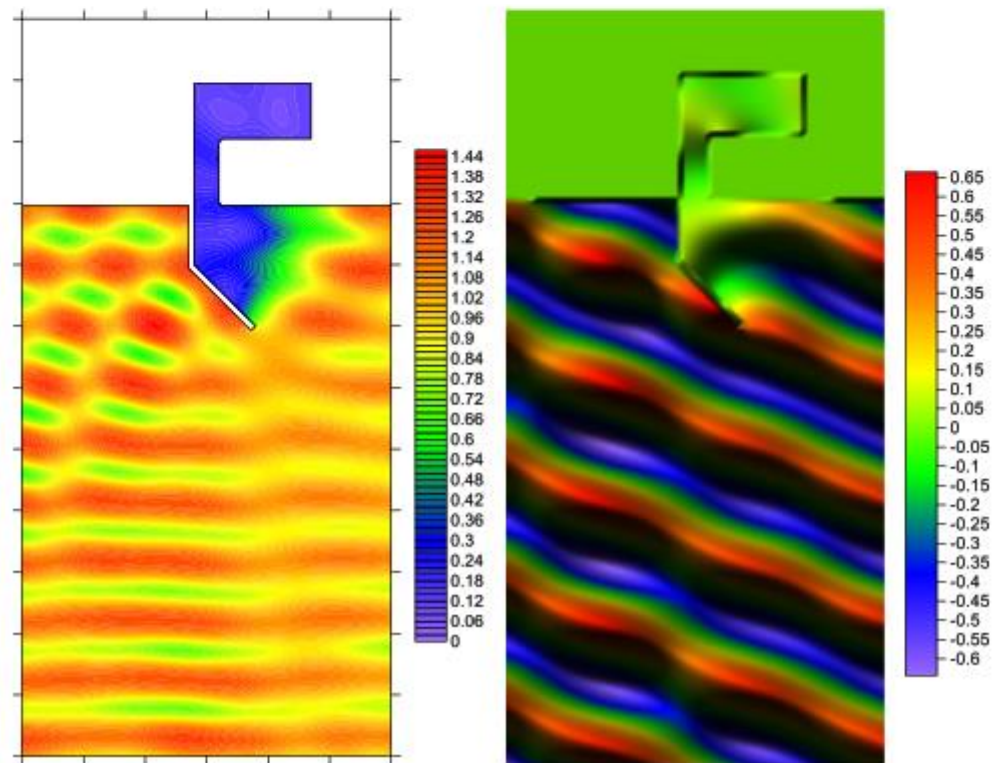
Caso 5 (75)



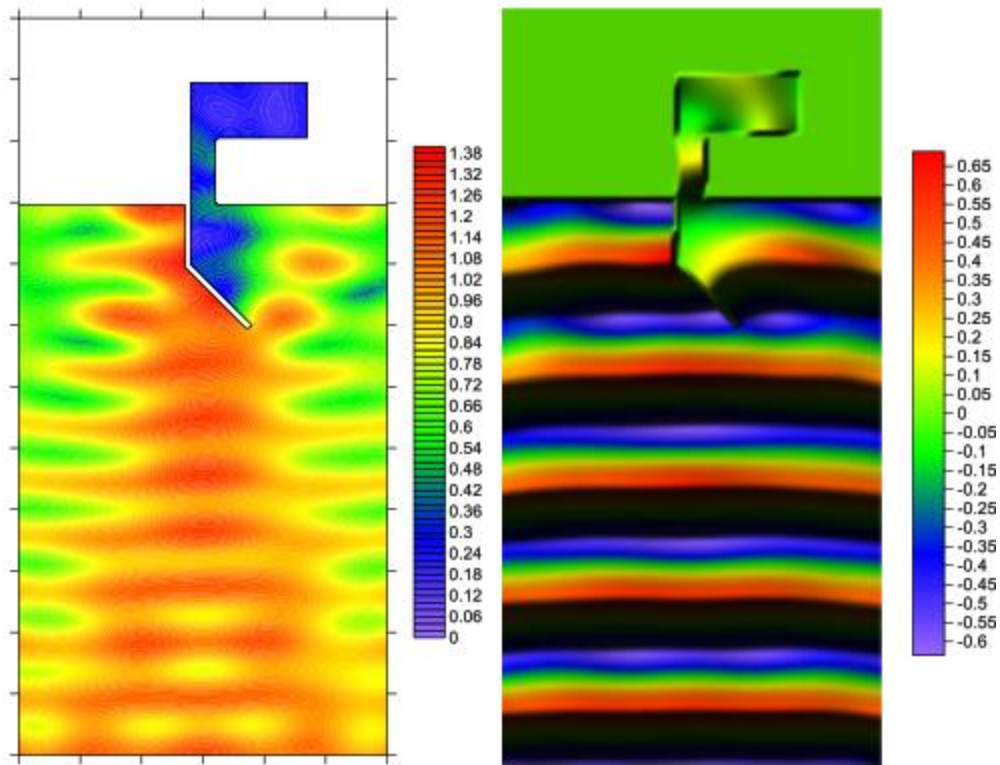
Caso 1 (76)



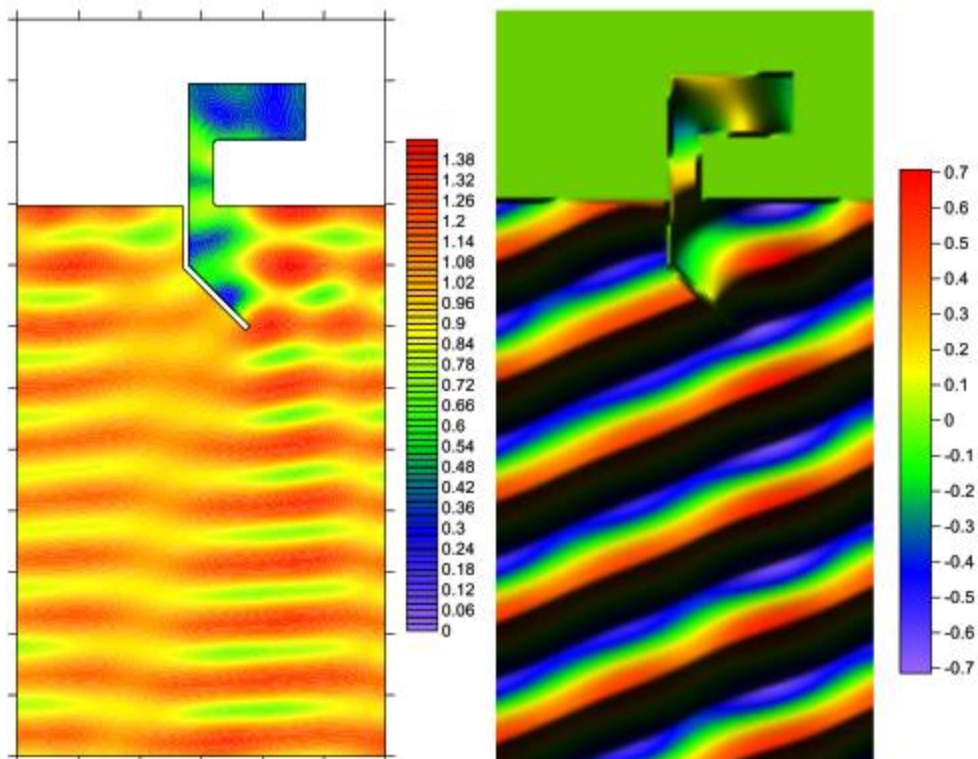
Caso 2 (77)



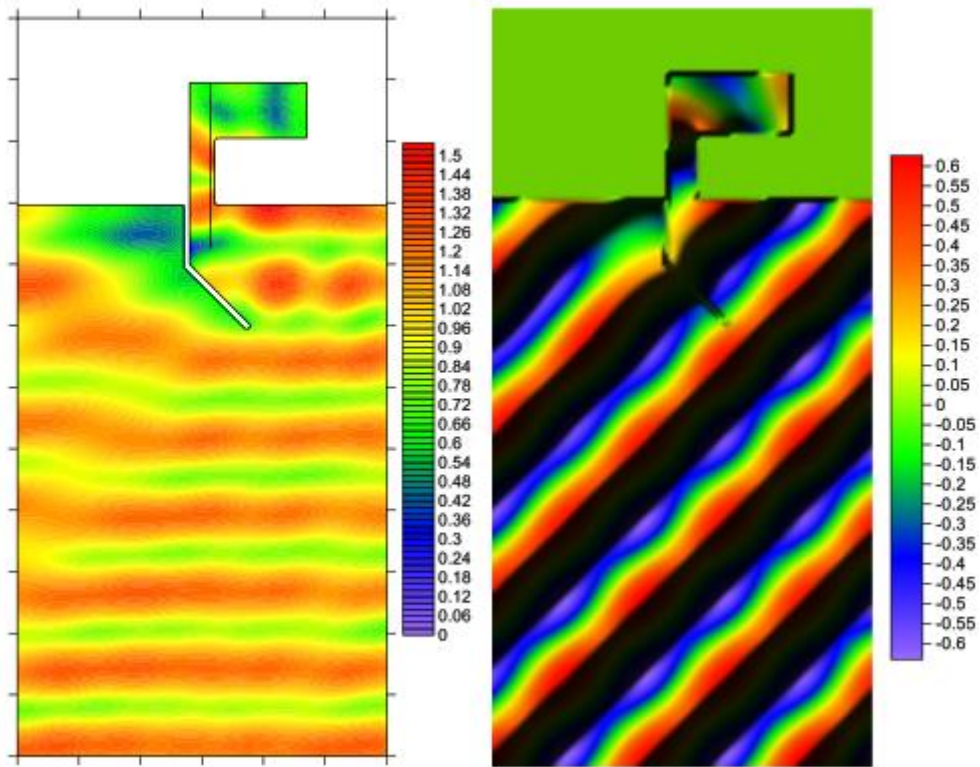
Caso 3 (78)



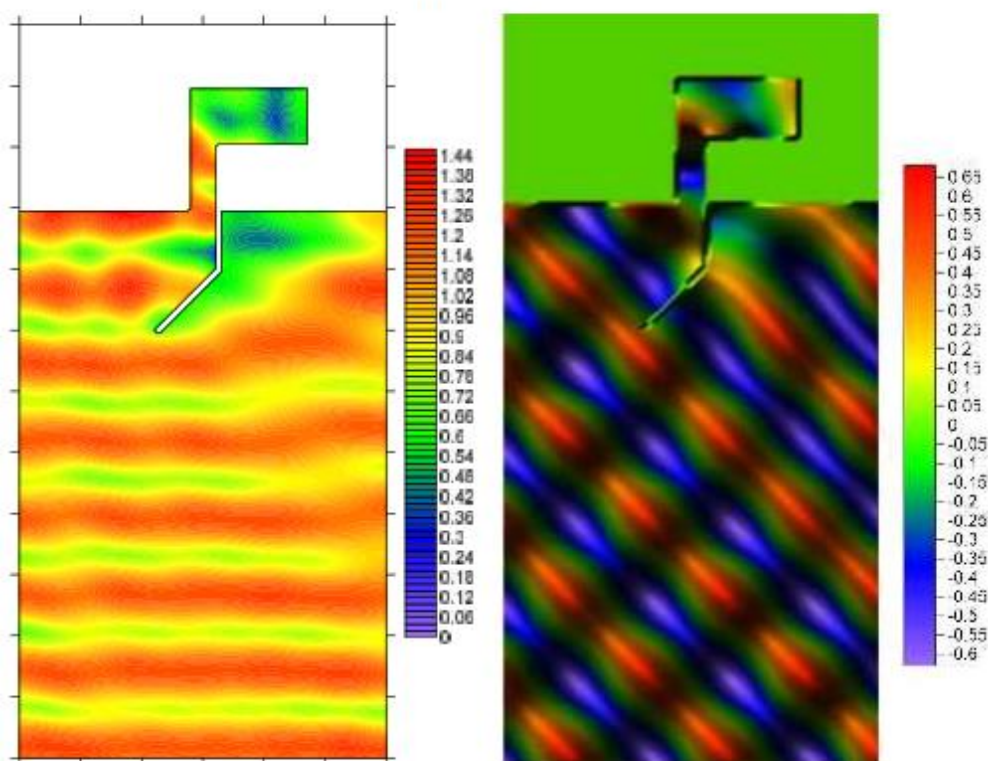
Caso 4 (79)



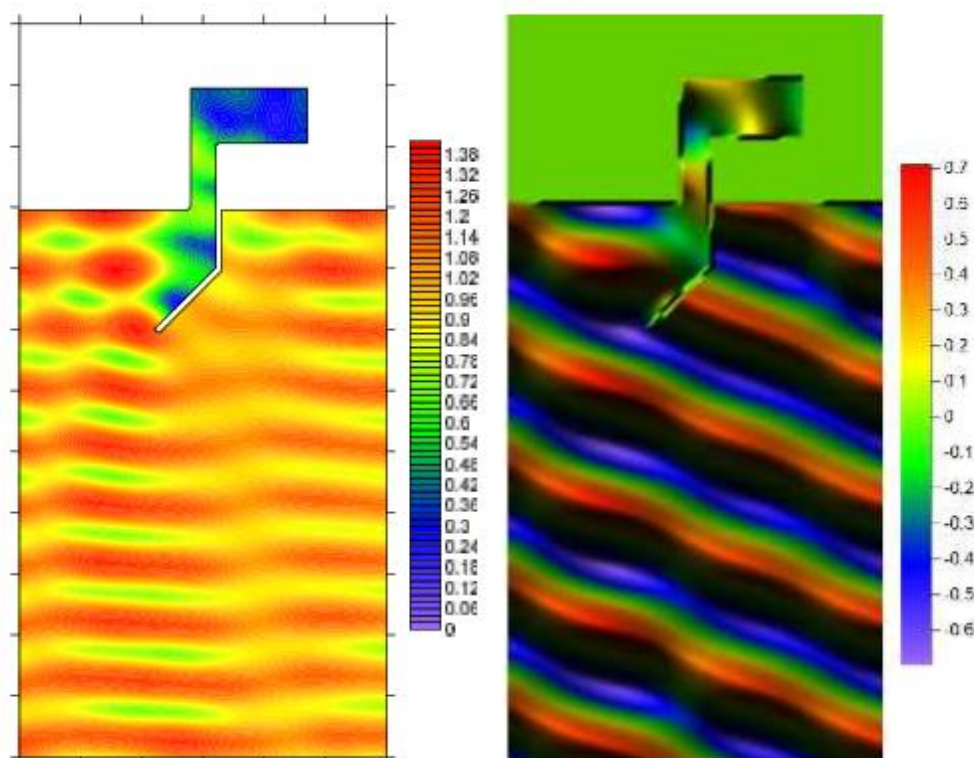
Caso 5 (80) R



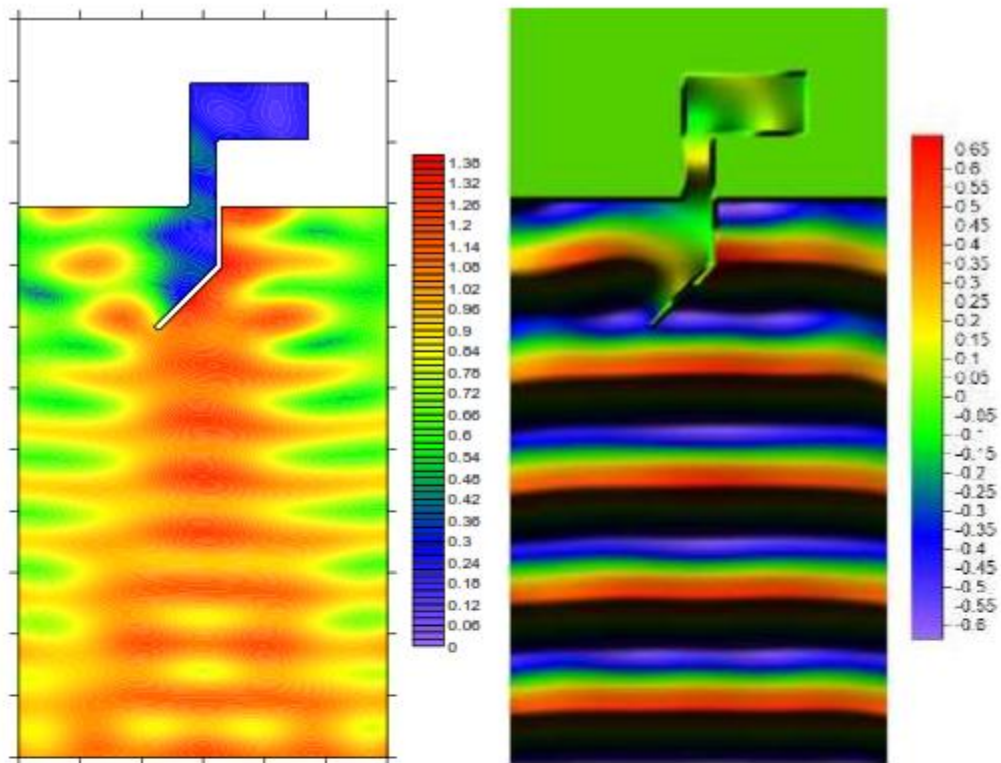
Caso 1 (81) R



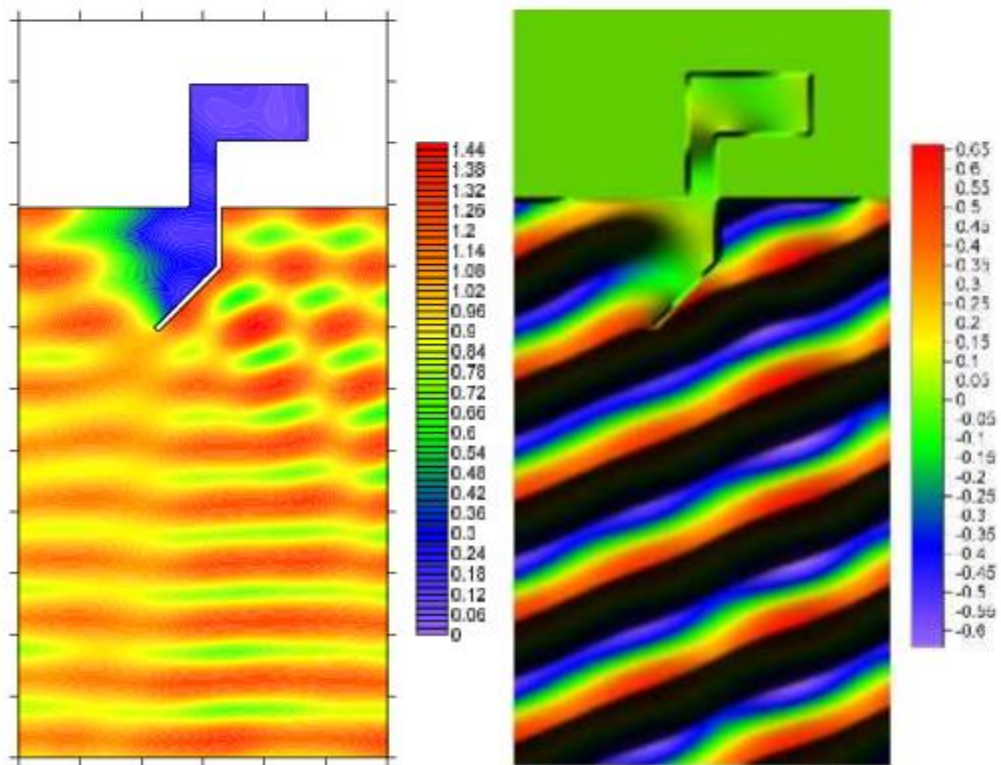
Caso 2 (82)



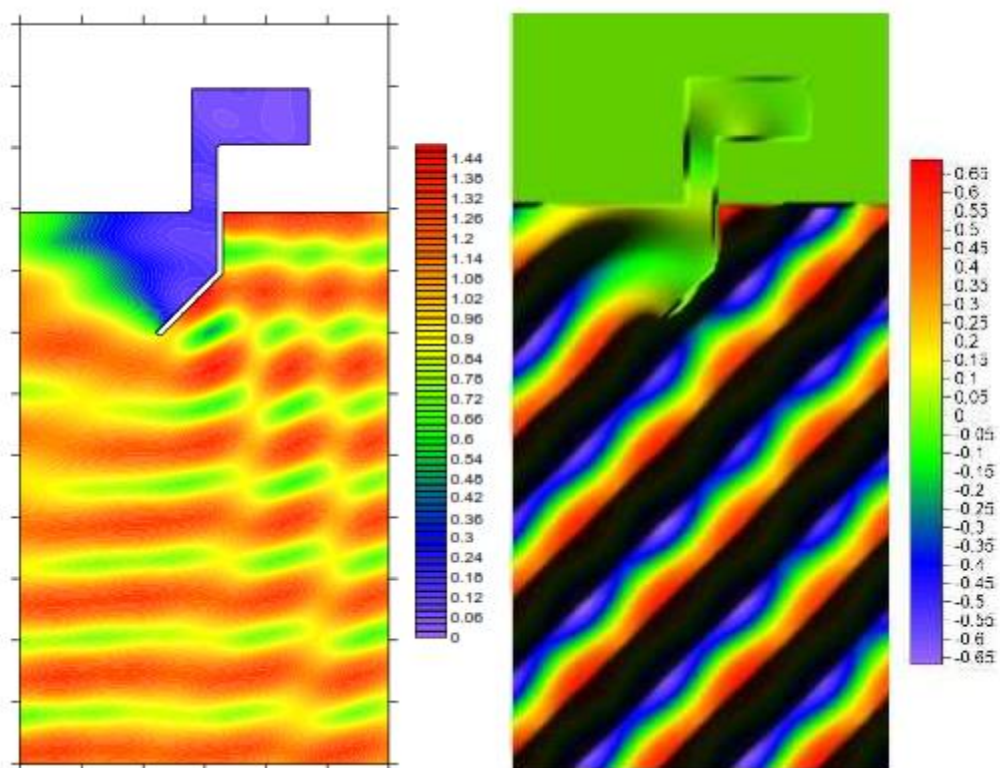
Caso 3 (83)



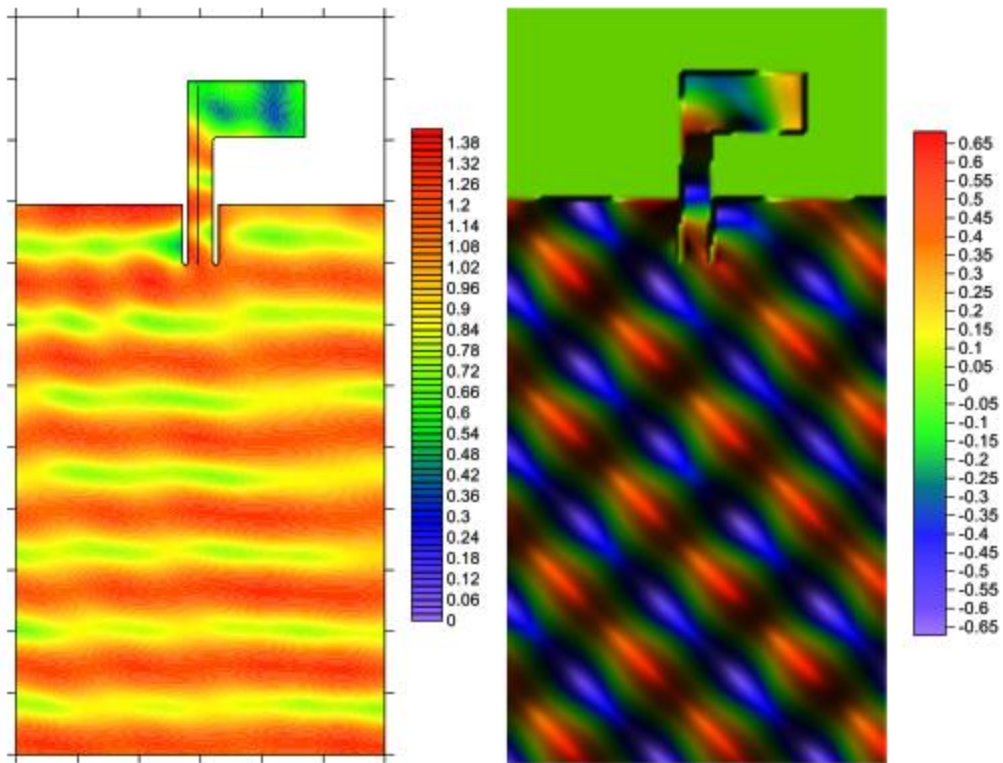
Caso 4 (84)



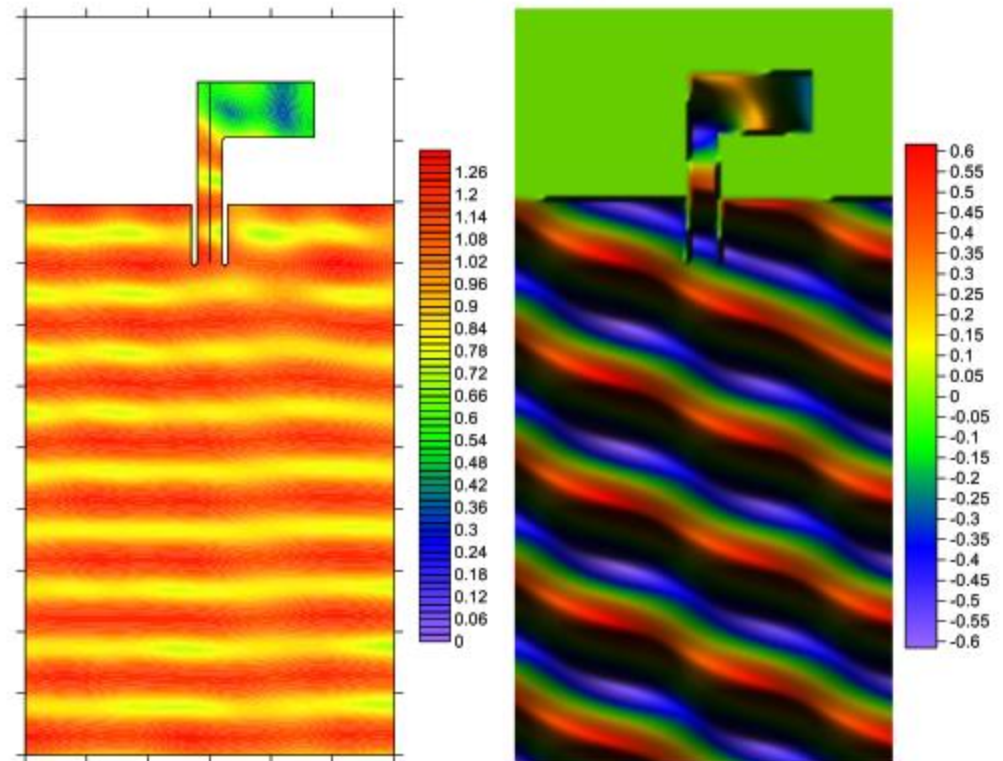
Caso 5 (85)



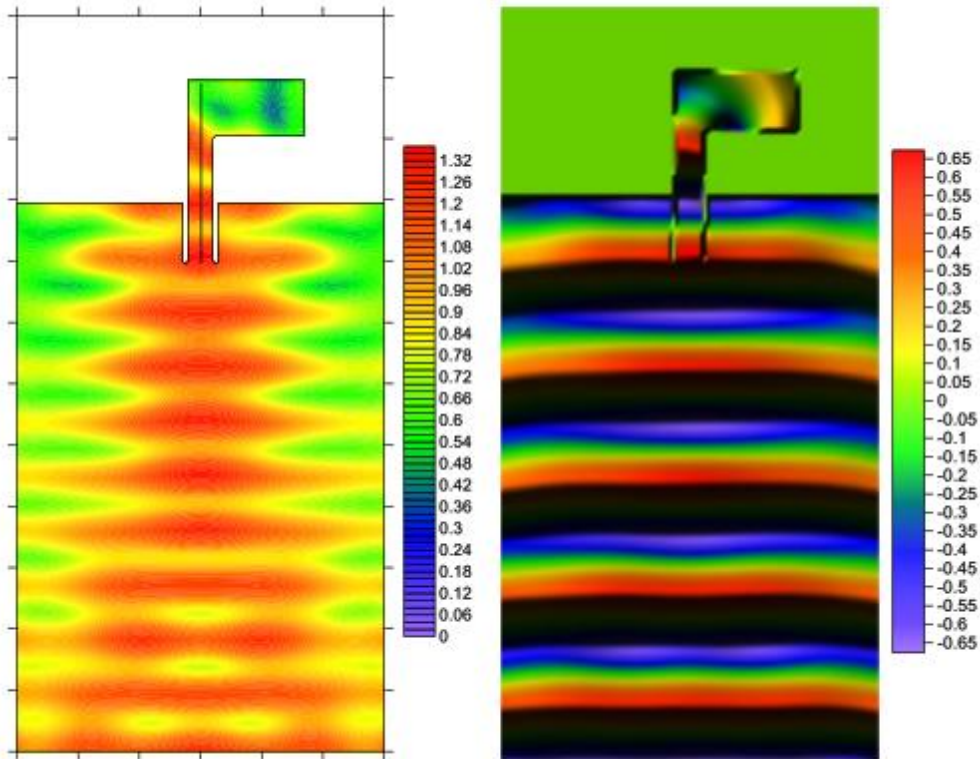
Caso 1 (86) R



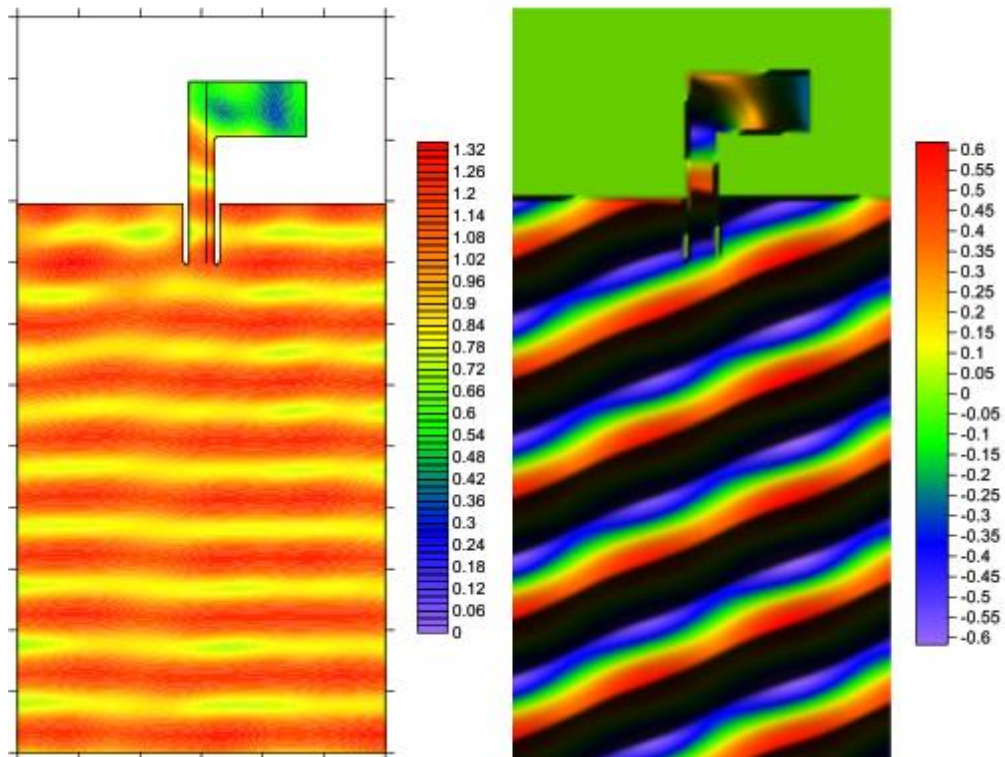
Caso 2 (87) R



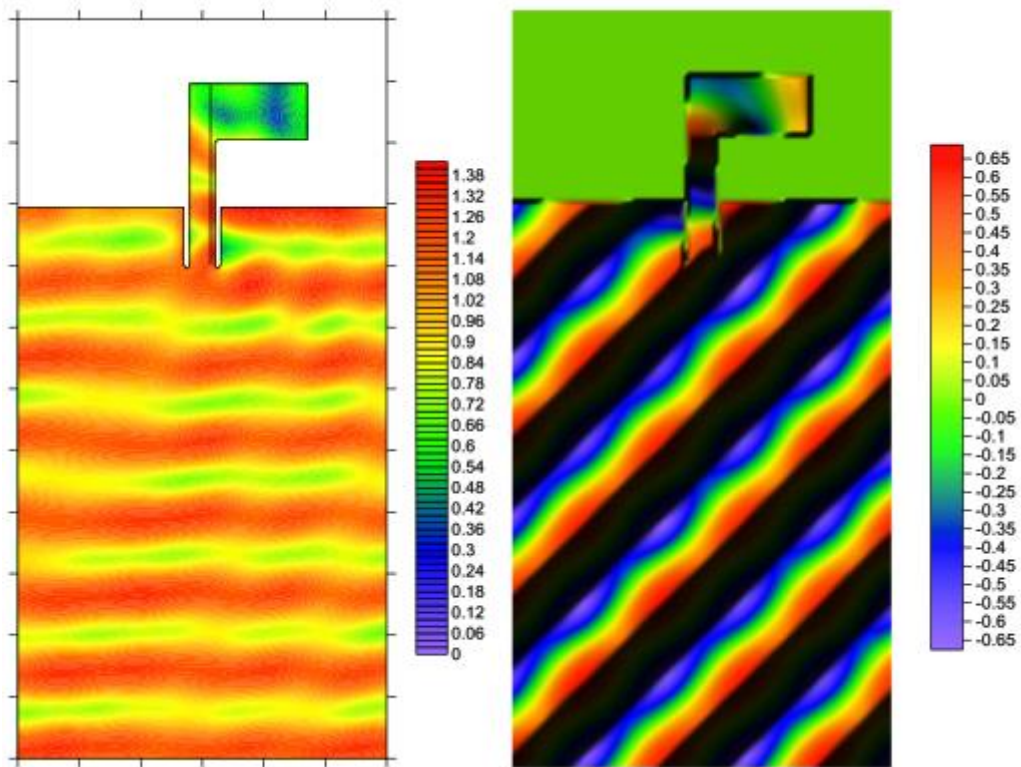
Caso 3 (88) R



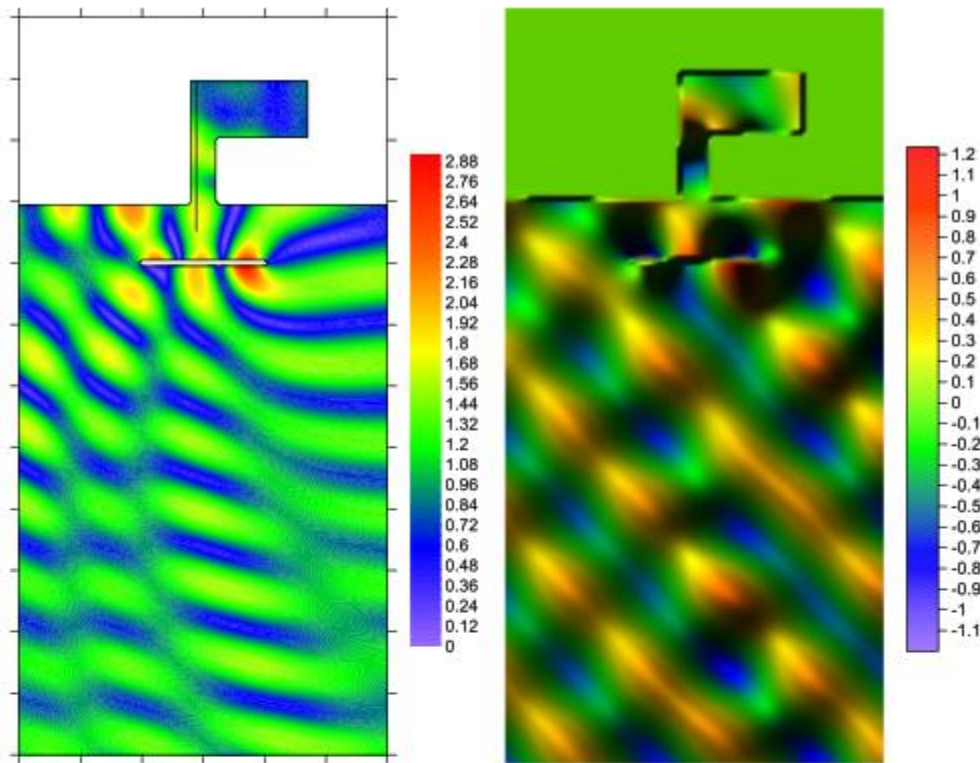
Caso 4 (89) R



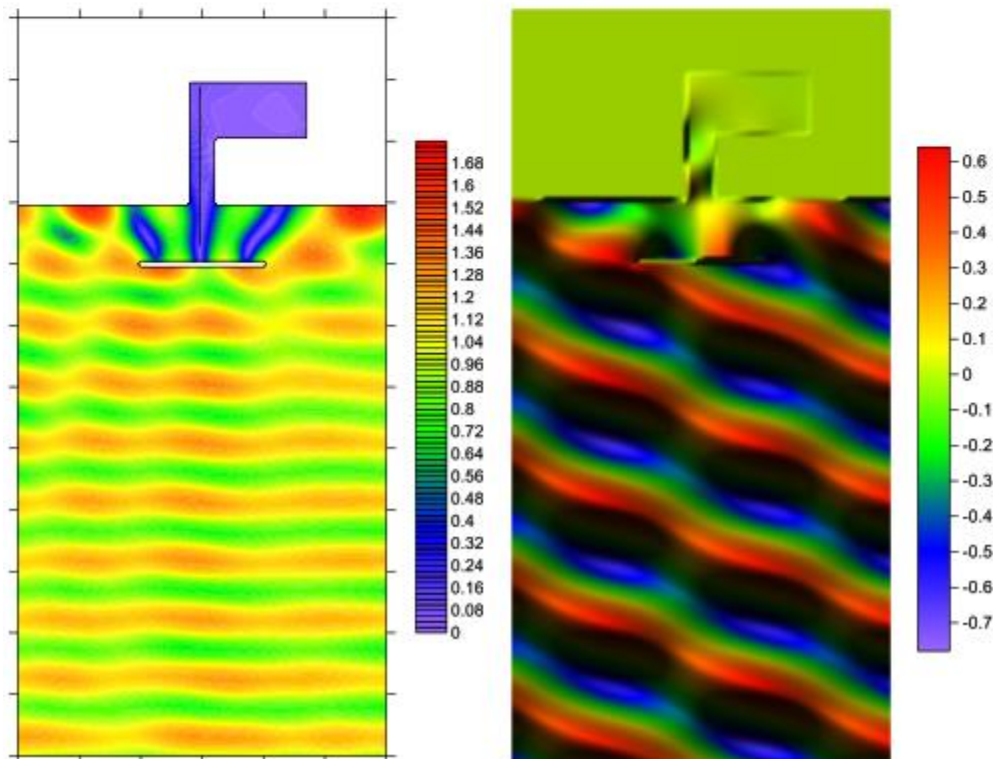
Caso 5 (90) R



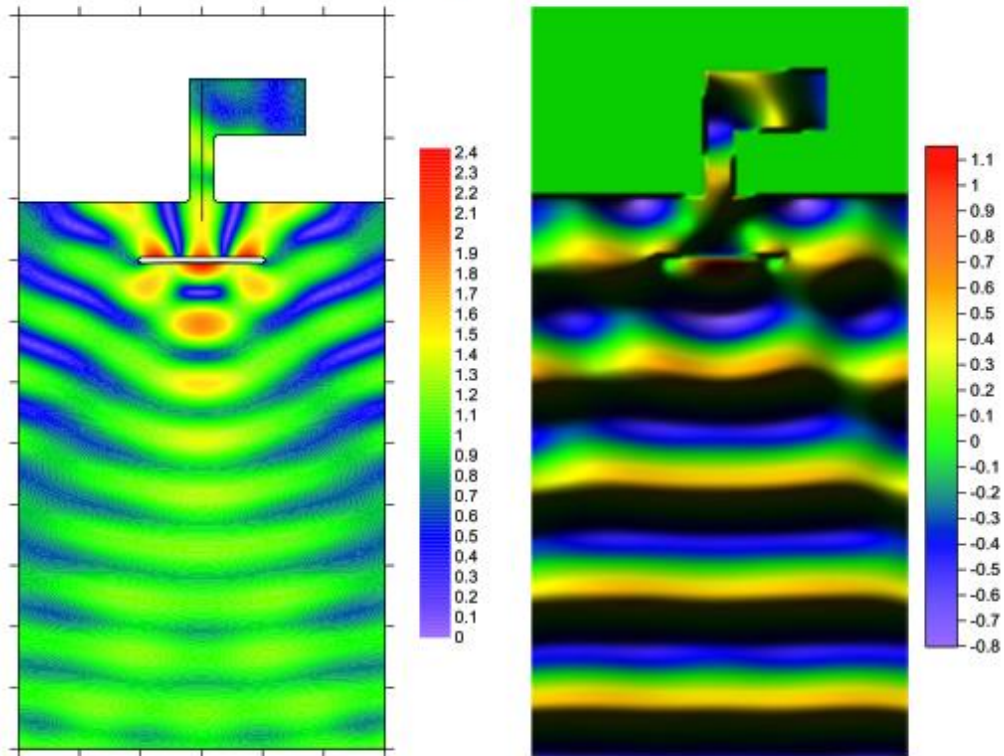
Caso 1 (91) R



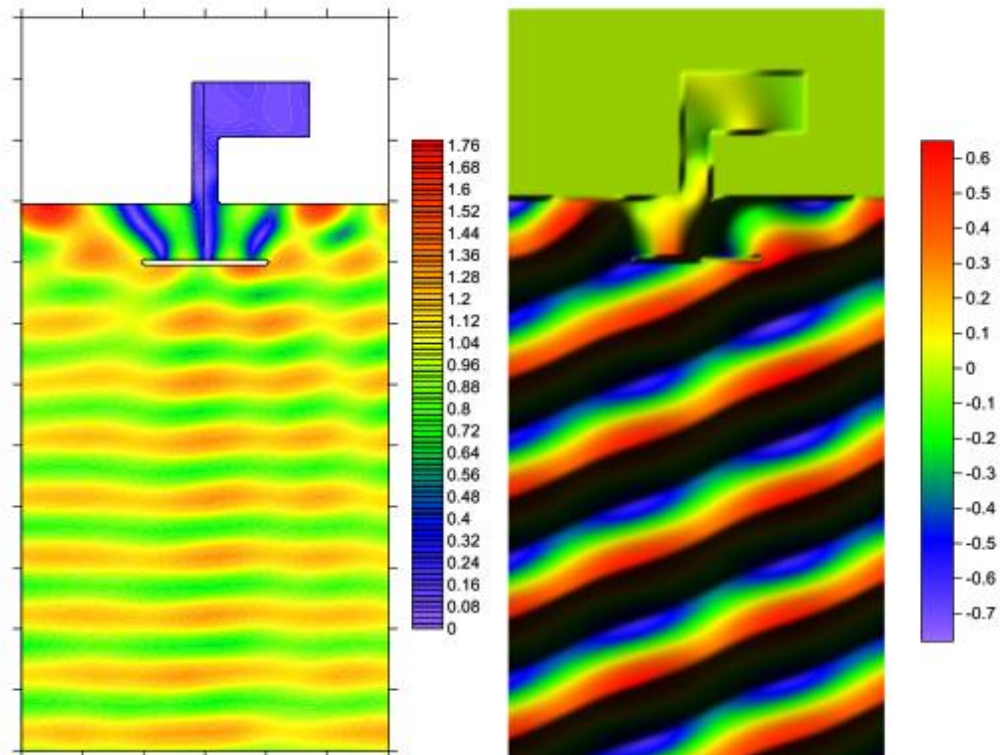
Caso 2 (92)



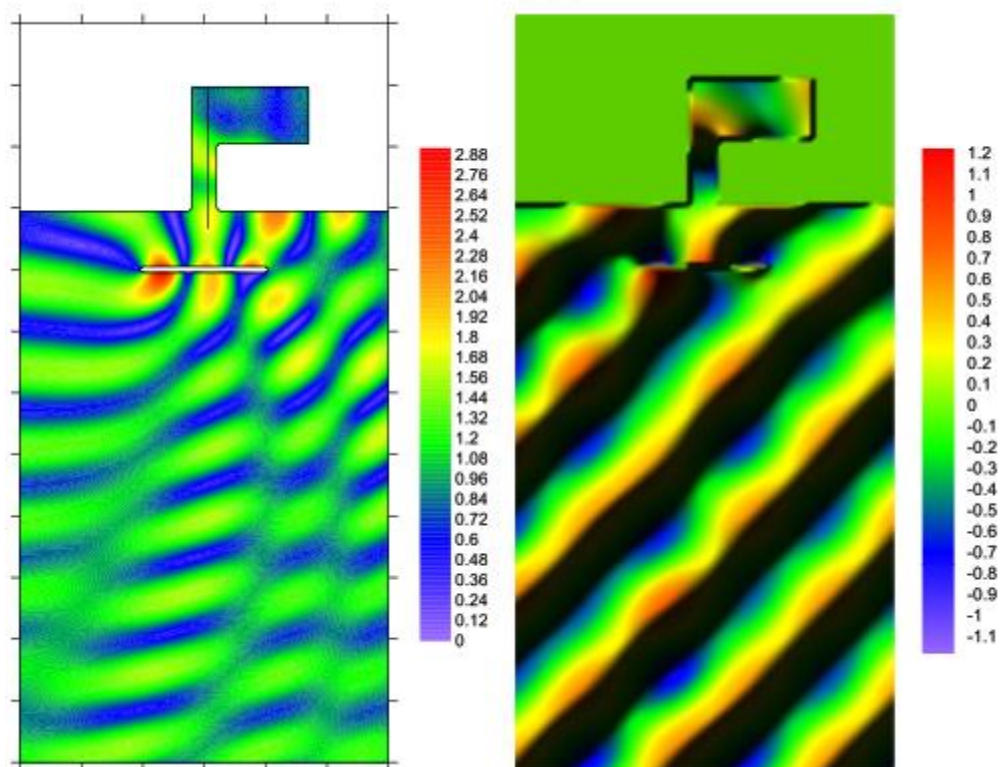
Caso 3 (93) R



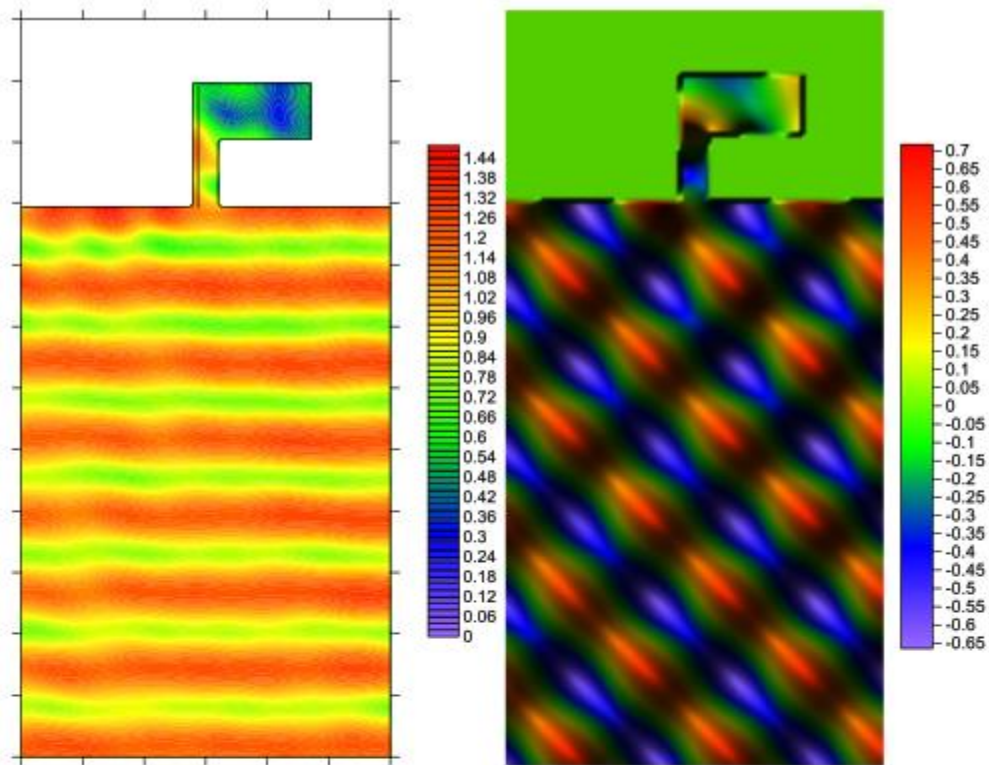
Caso 4 (94)



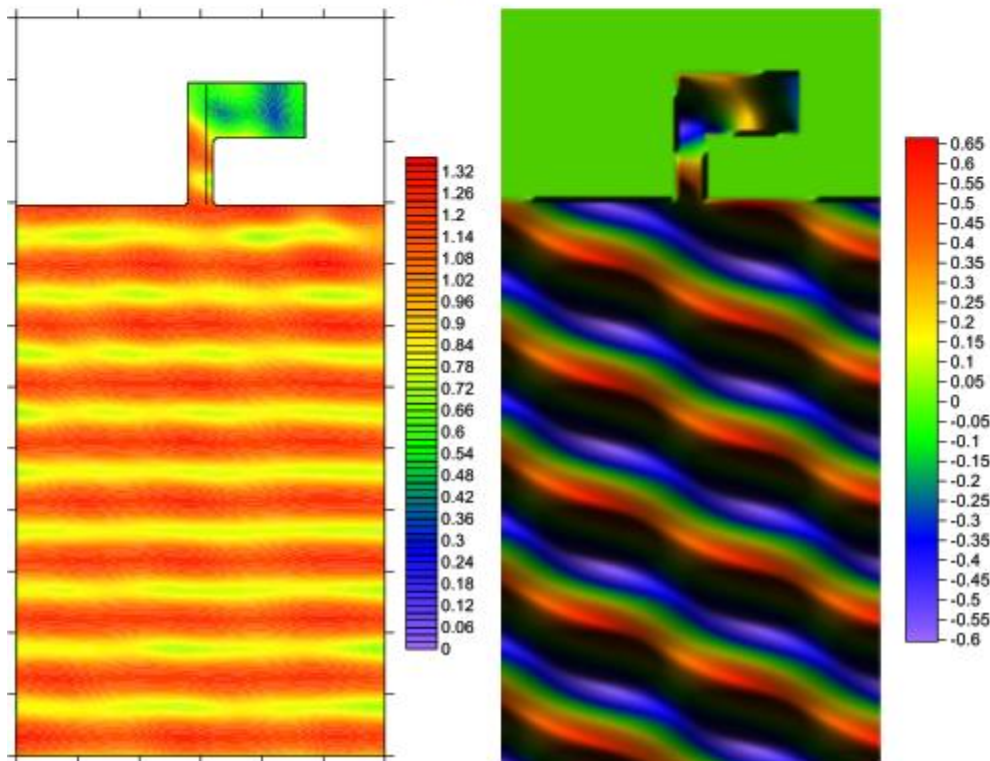
Caso 5 (95) R



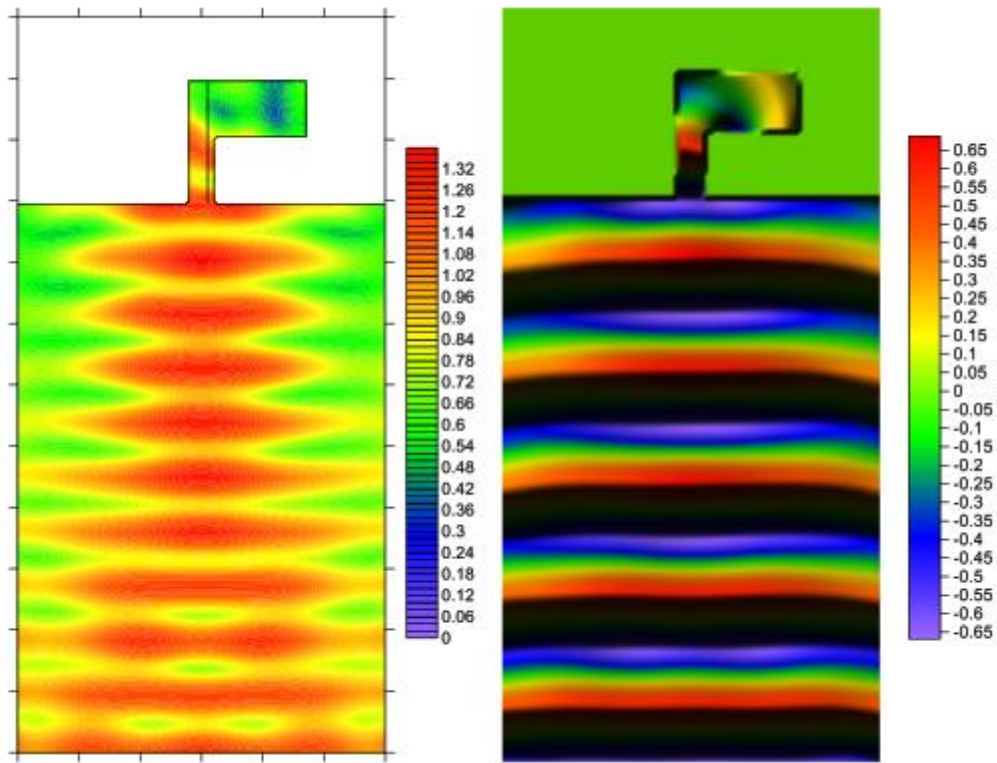
Caso 1 (96) R



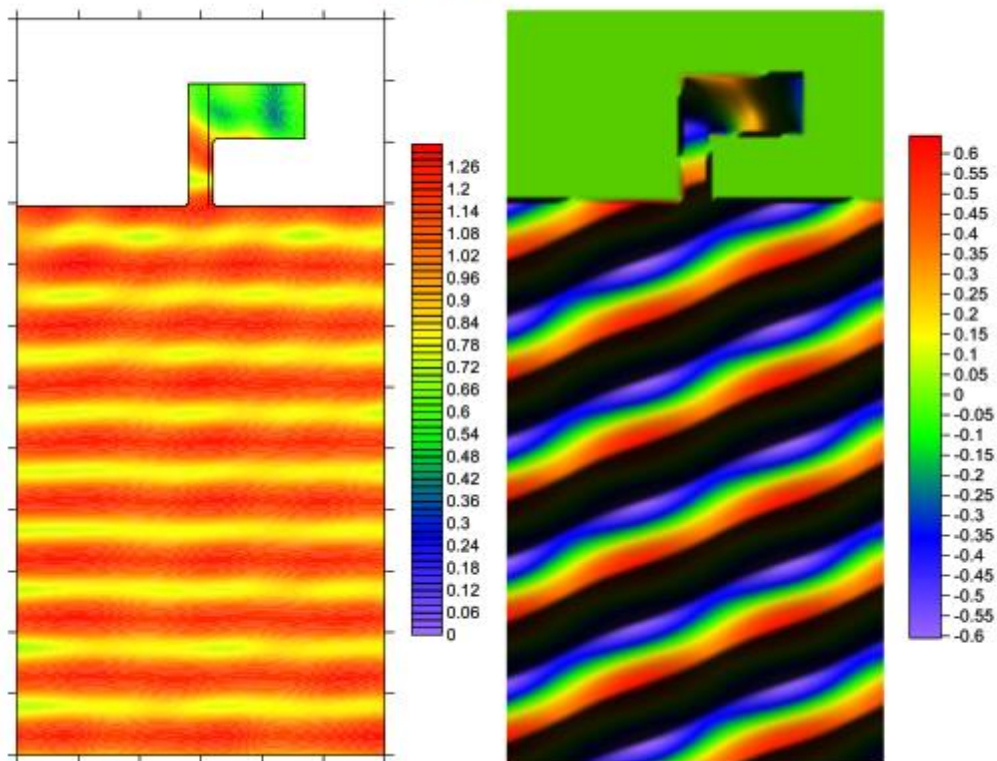
Caso 2 (97) R



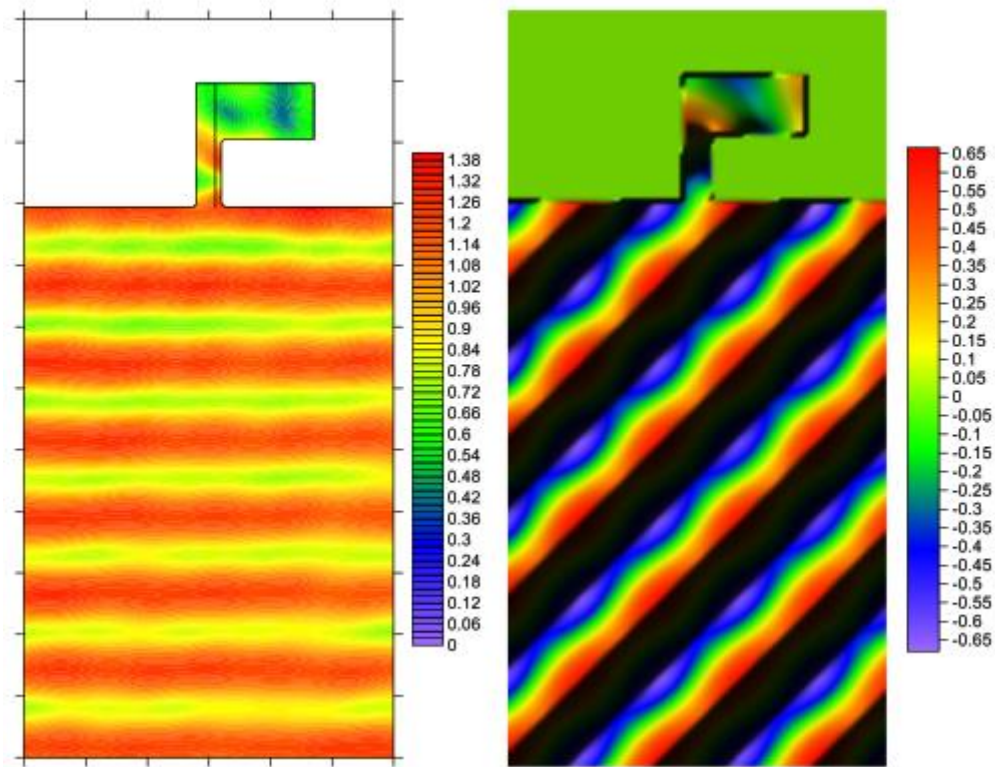
Caso 3 (98) R



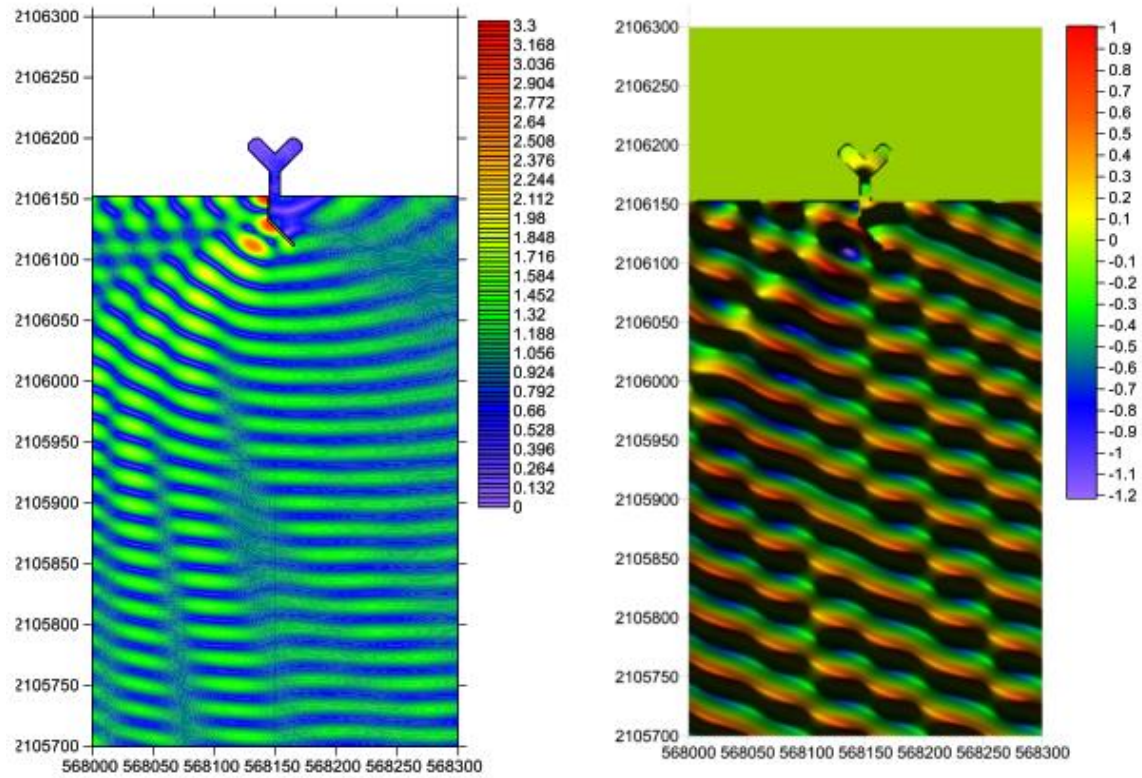
Caso 4 (99) R



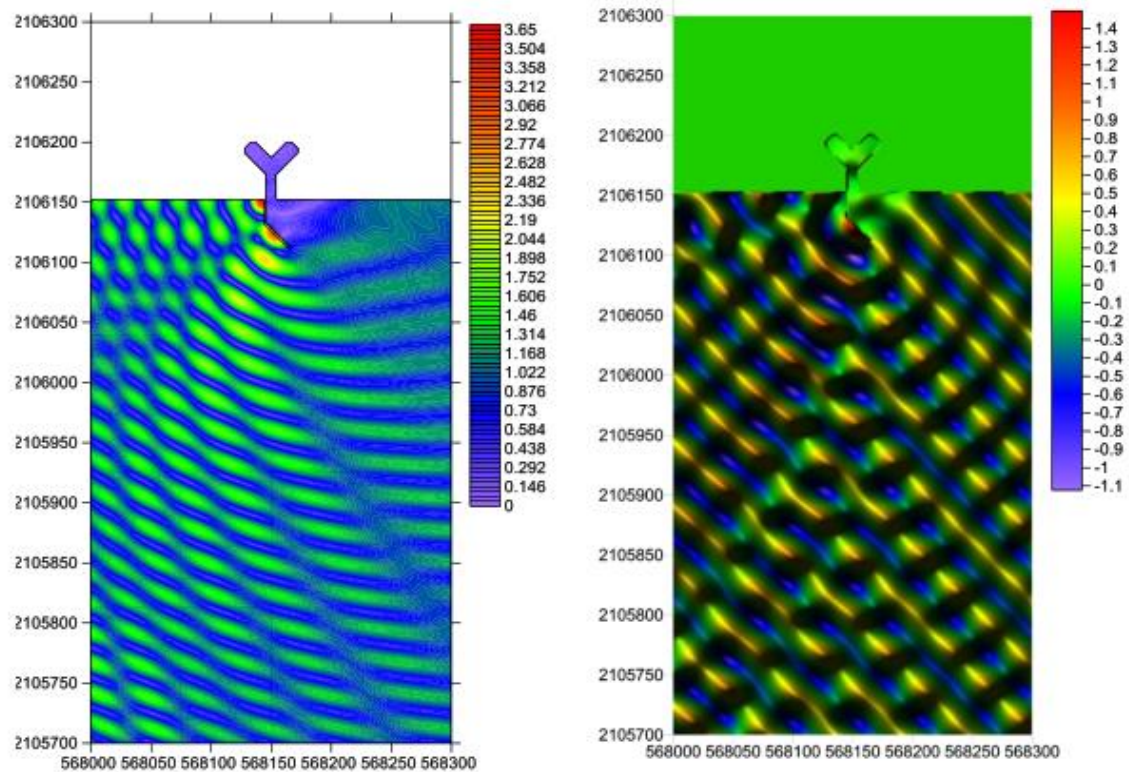
Caso 5 (100) R



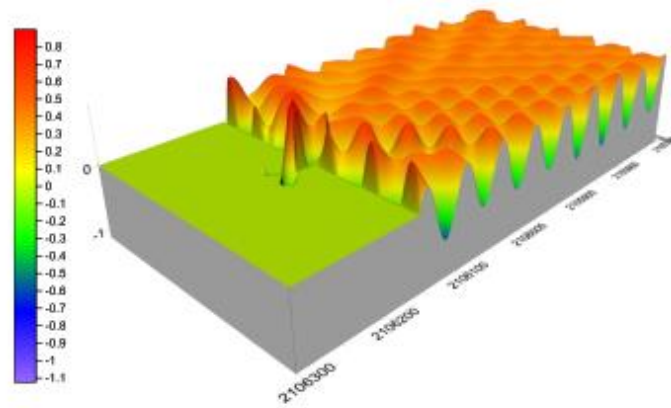
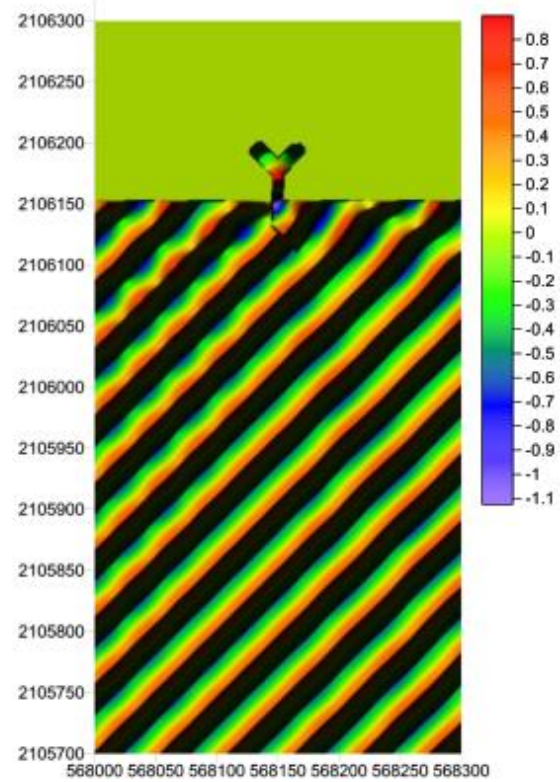
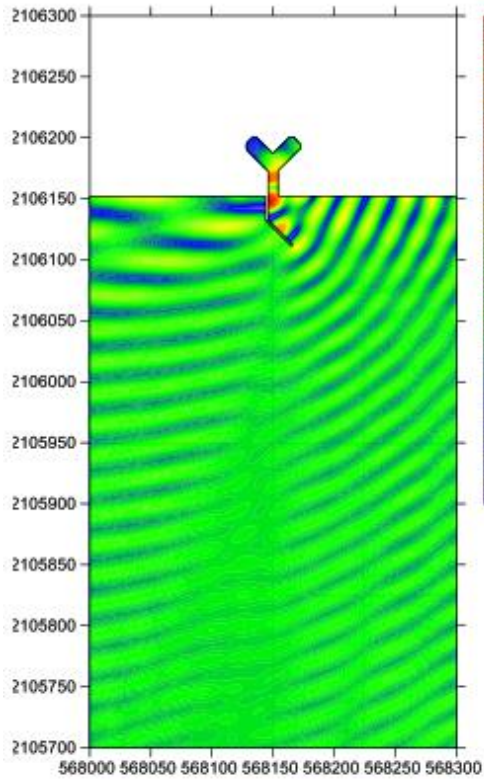
Caso 101



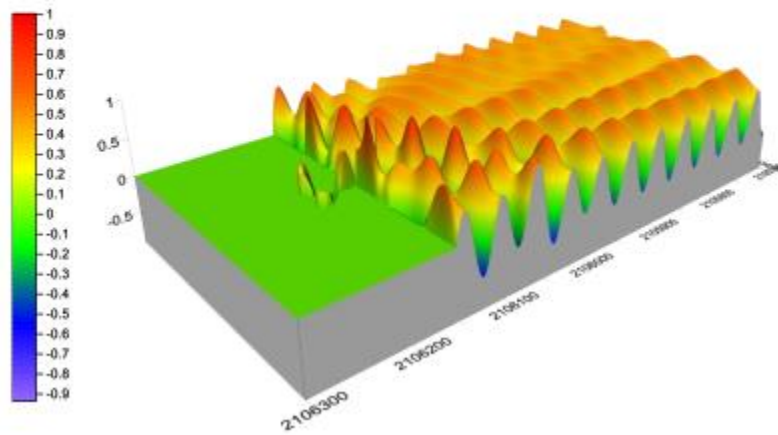
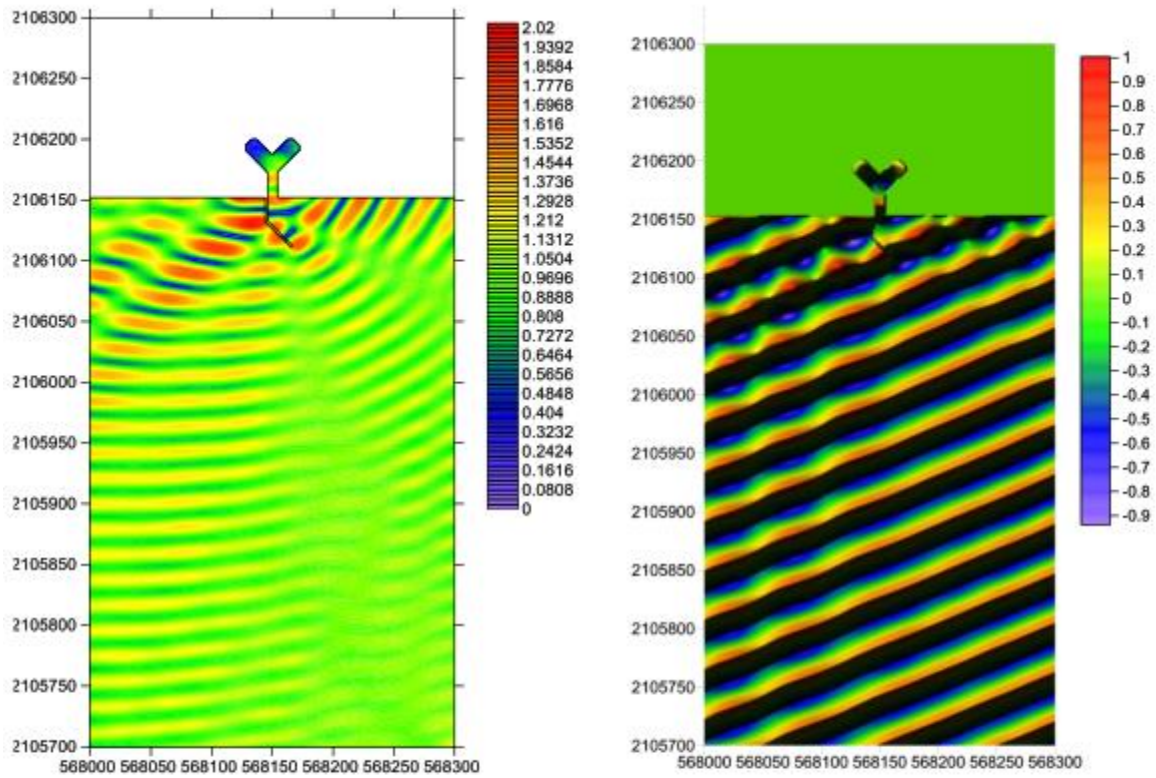
Caso 102



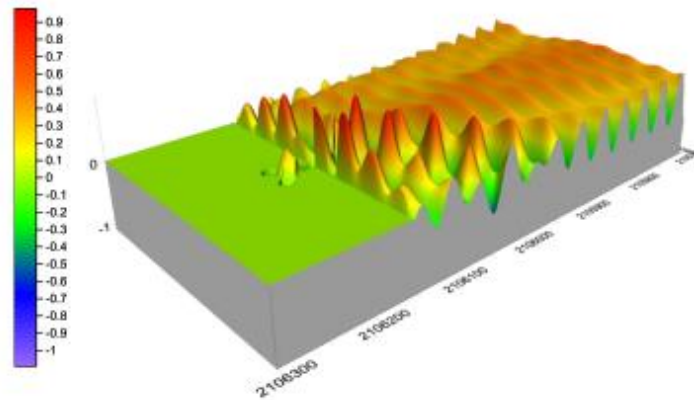
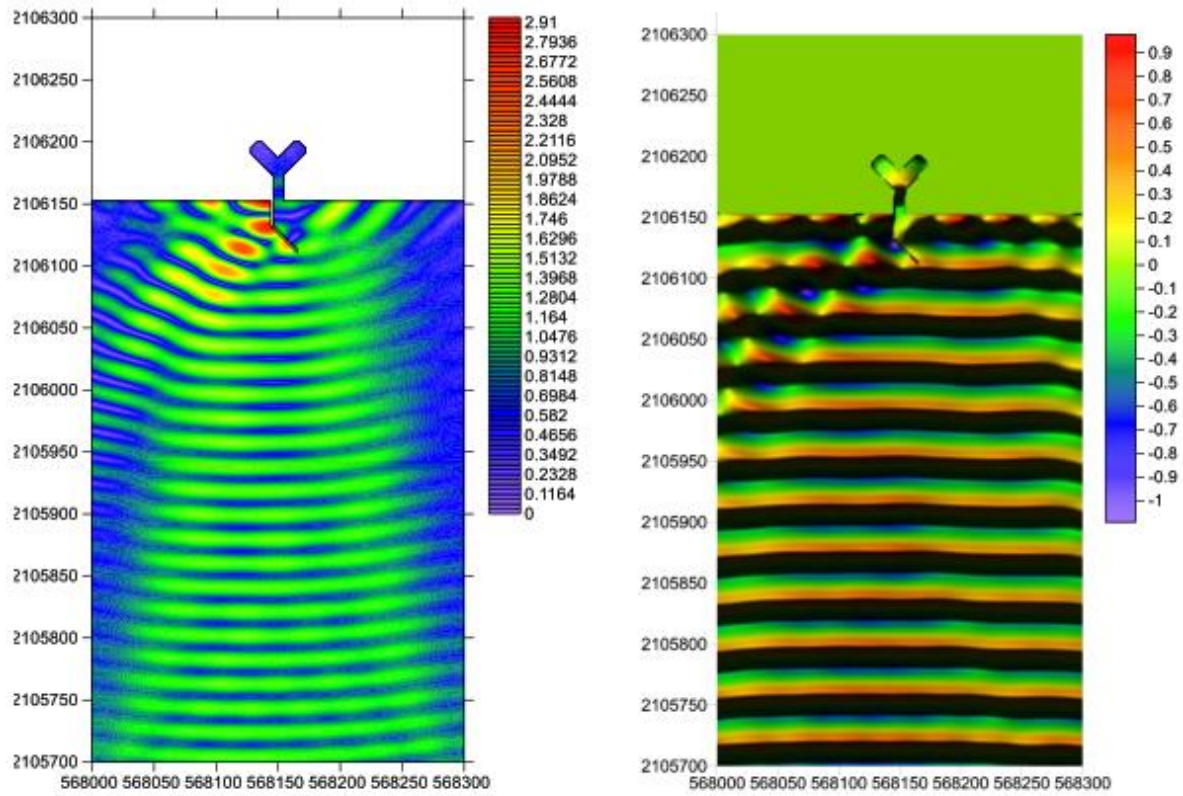
Caso 103



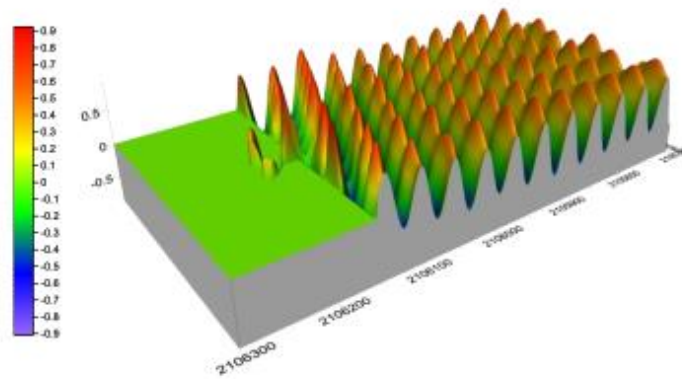
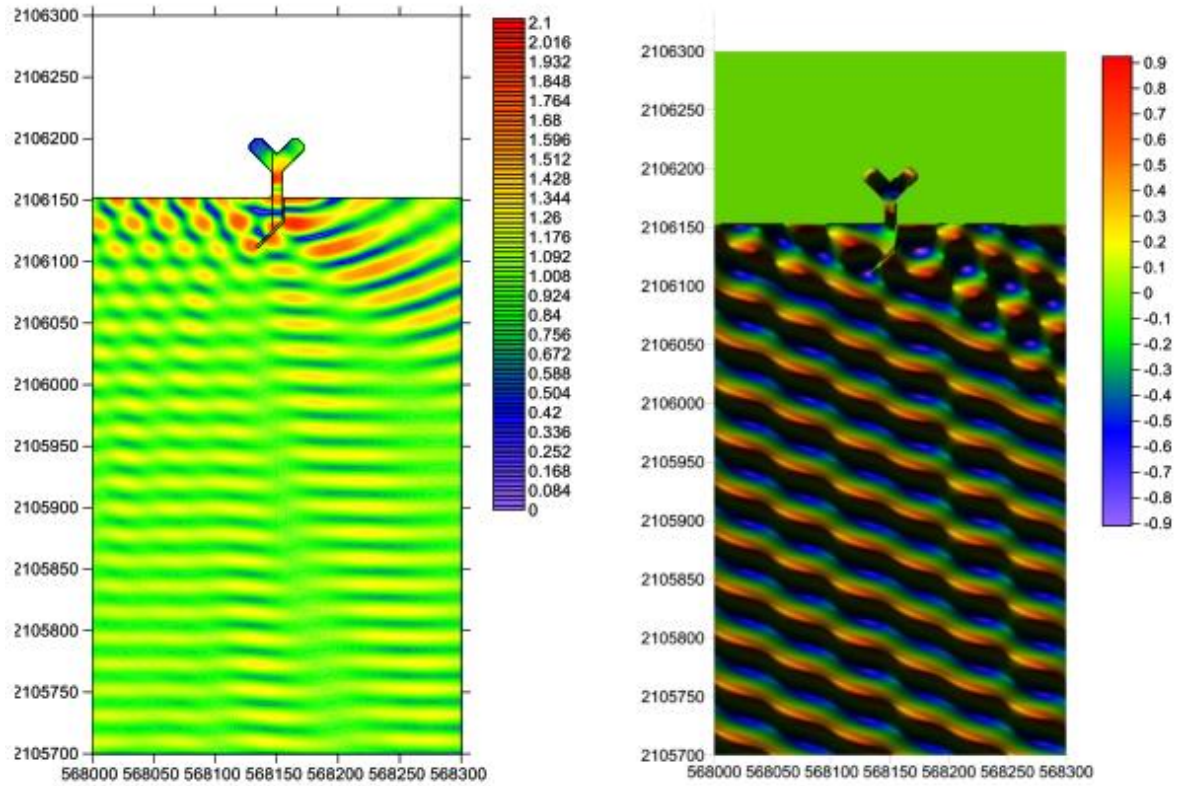
Caso 104



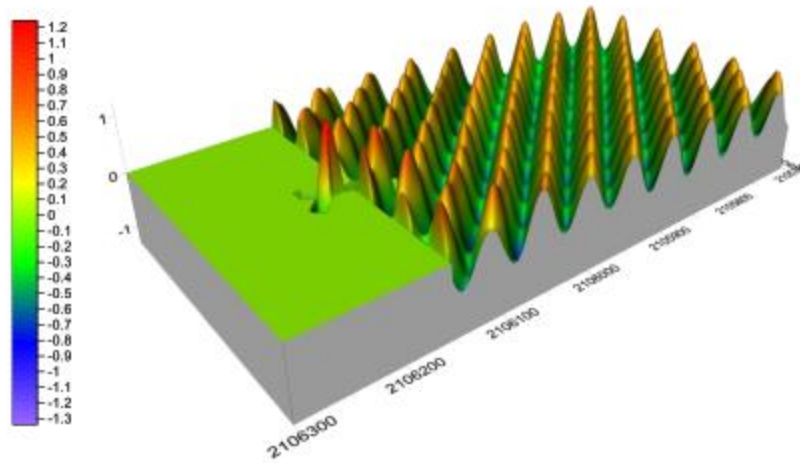
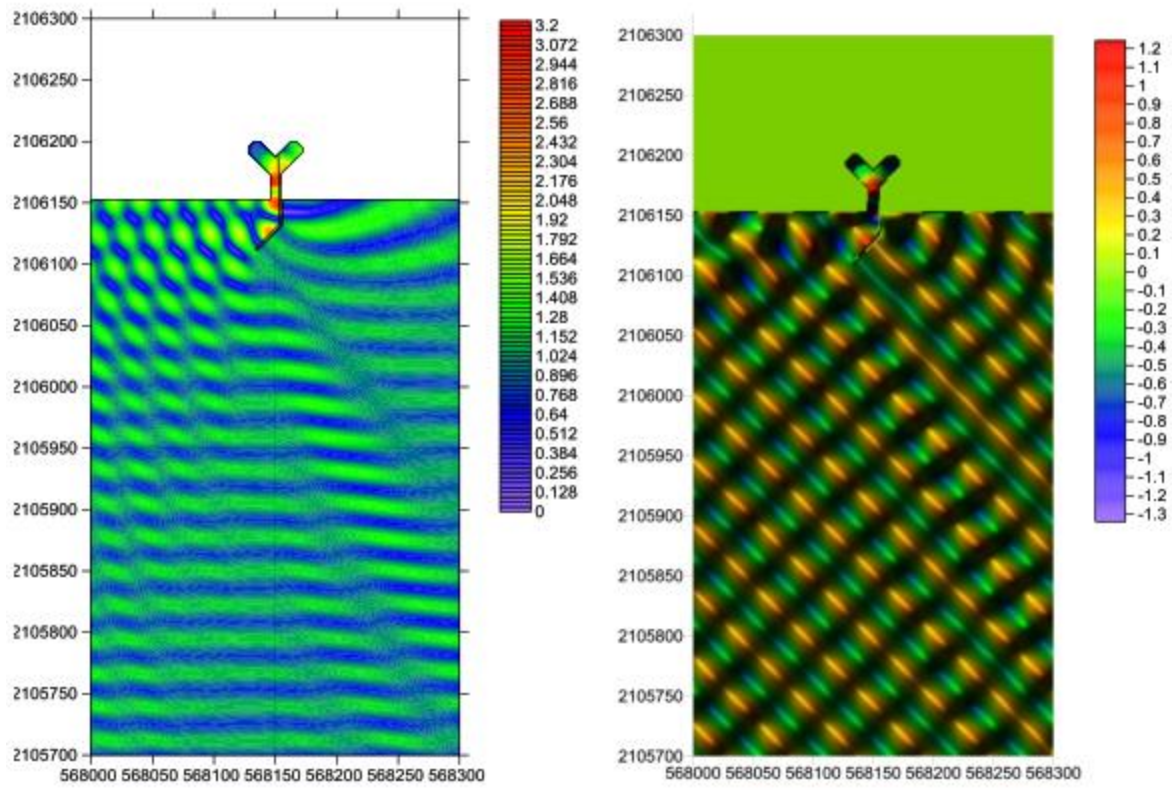
Caso 105



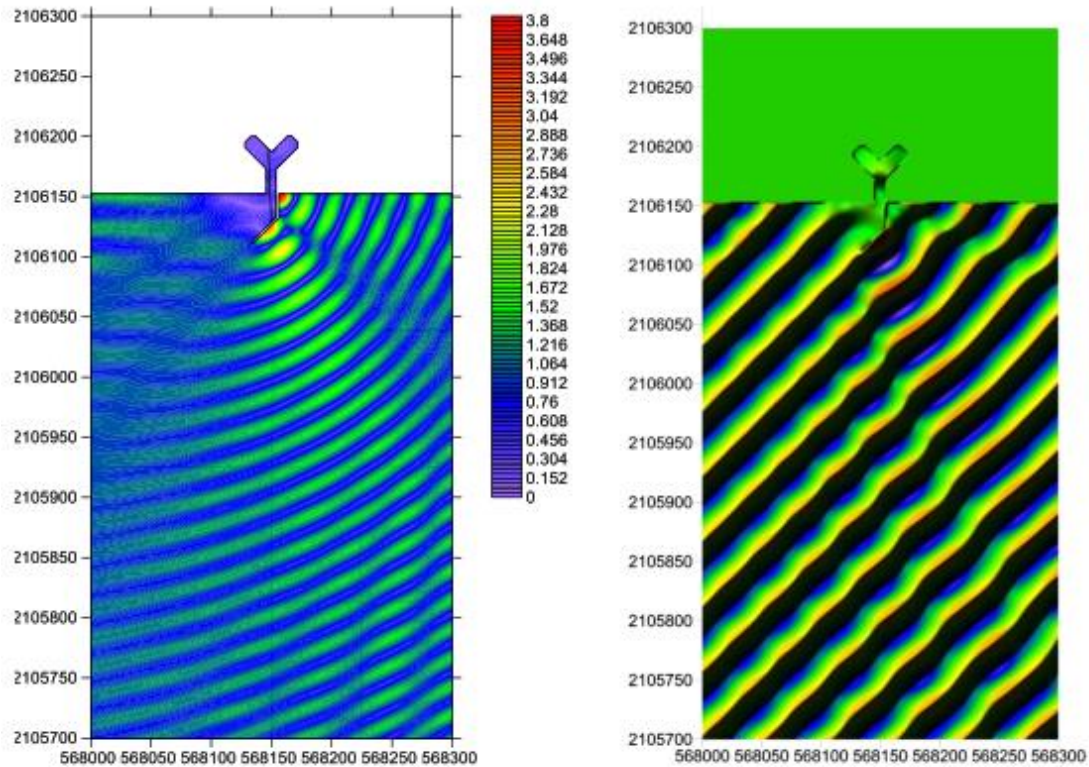
Caso 106 (R)



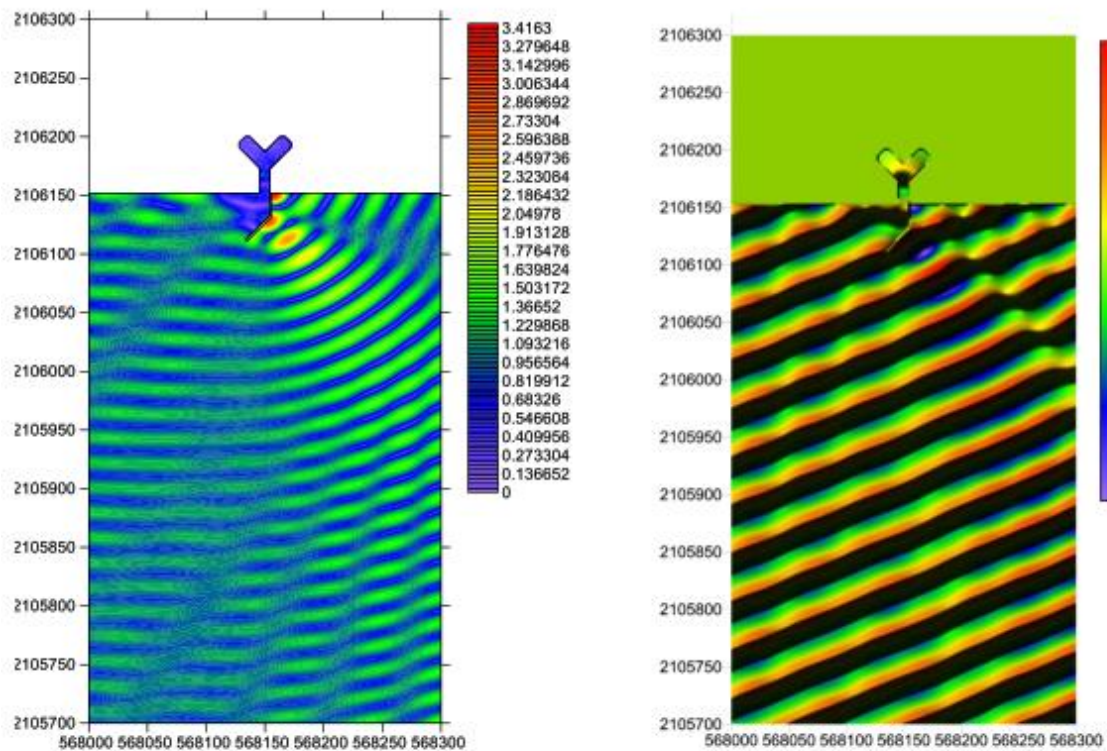
Caso 107 (R)



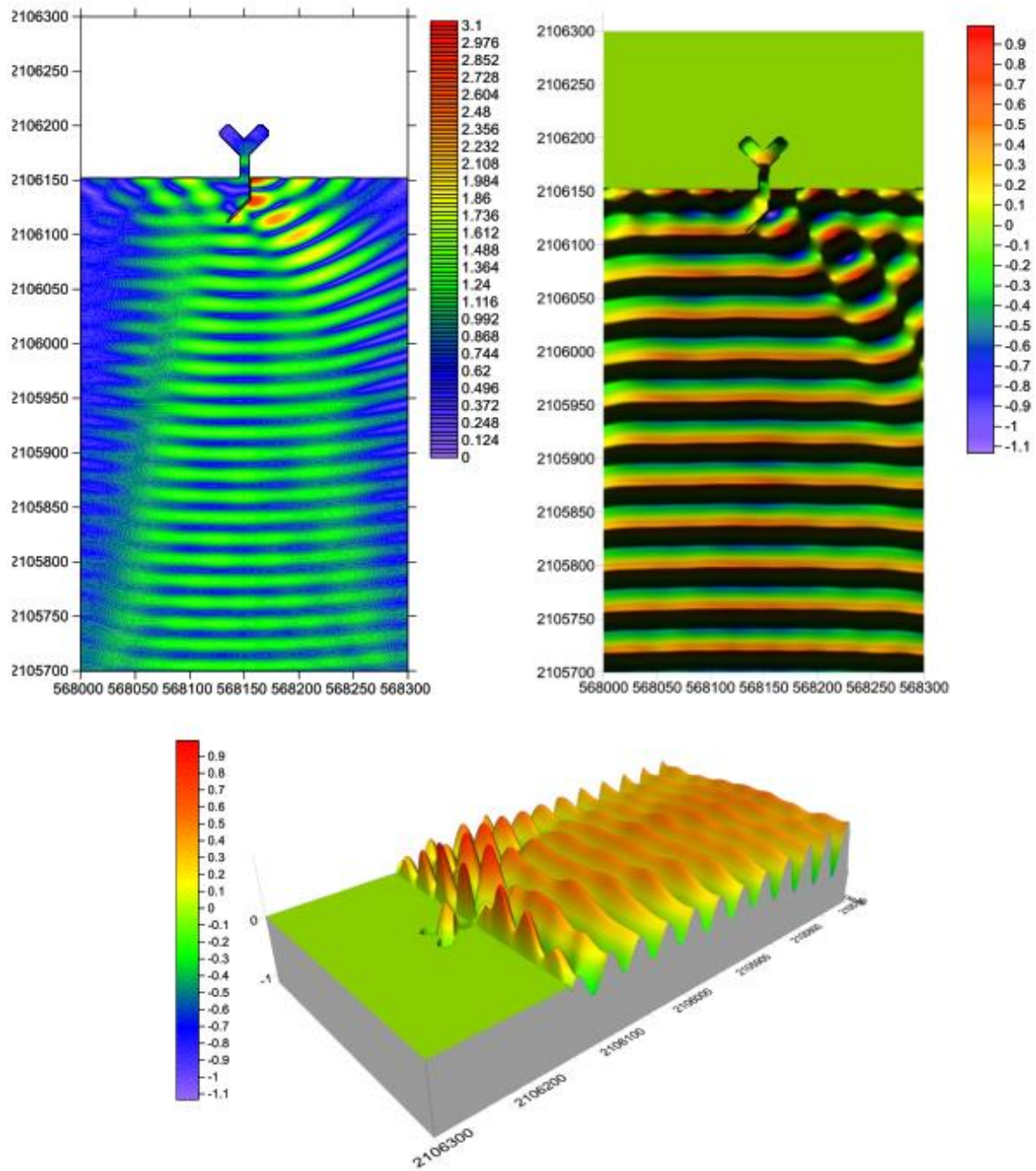
Caso 108



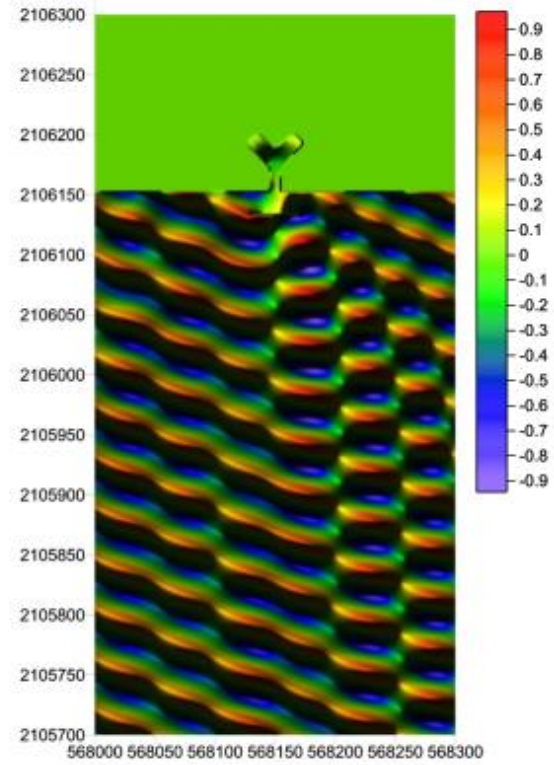
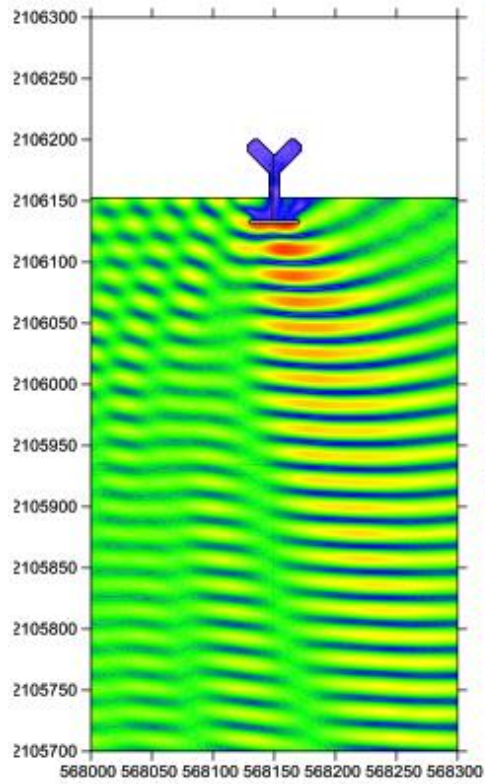
Caso 109



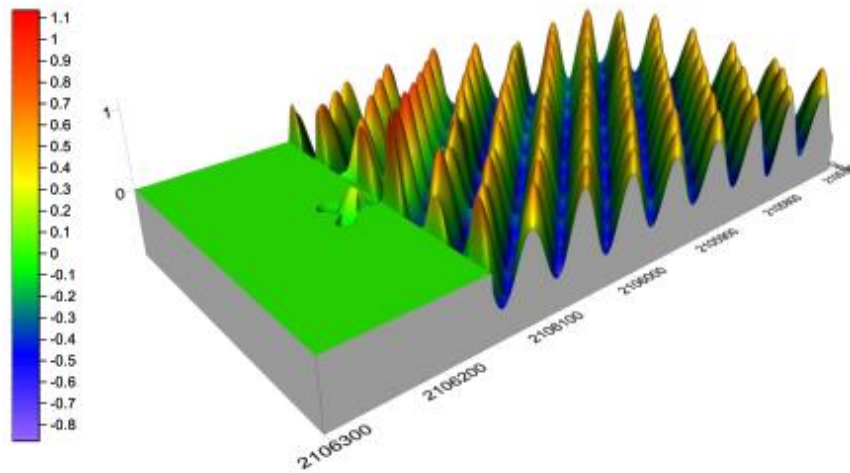
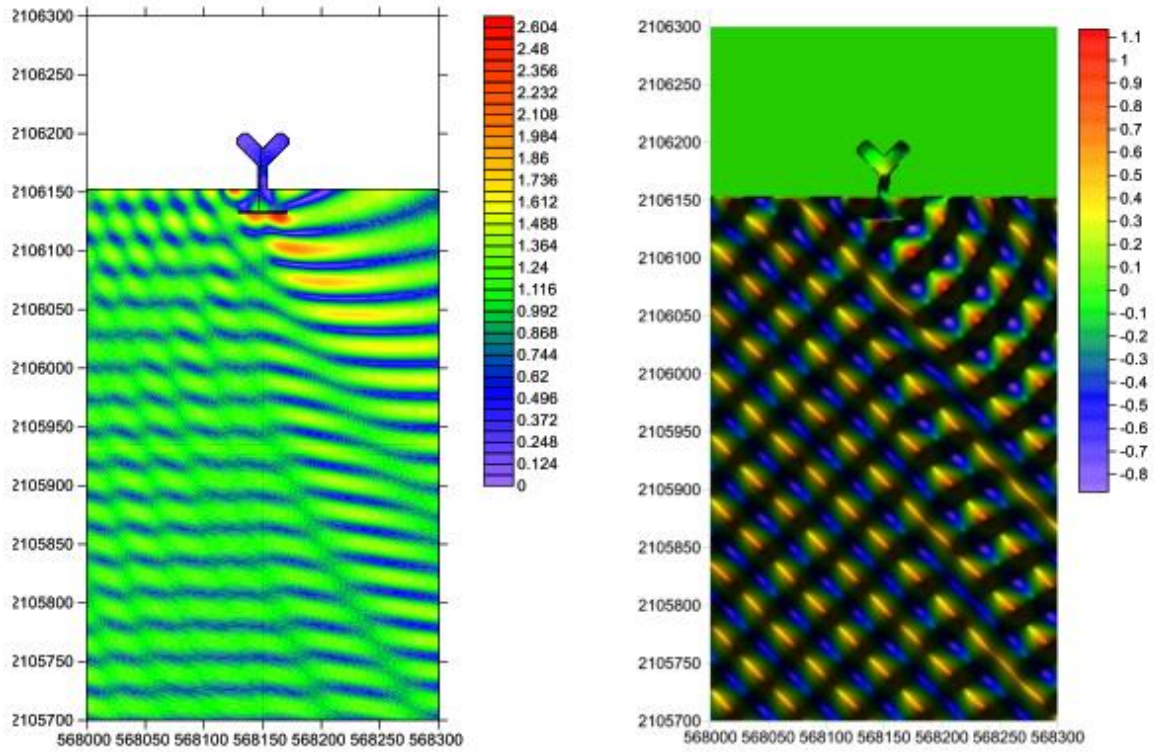
Caso 110 (R)



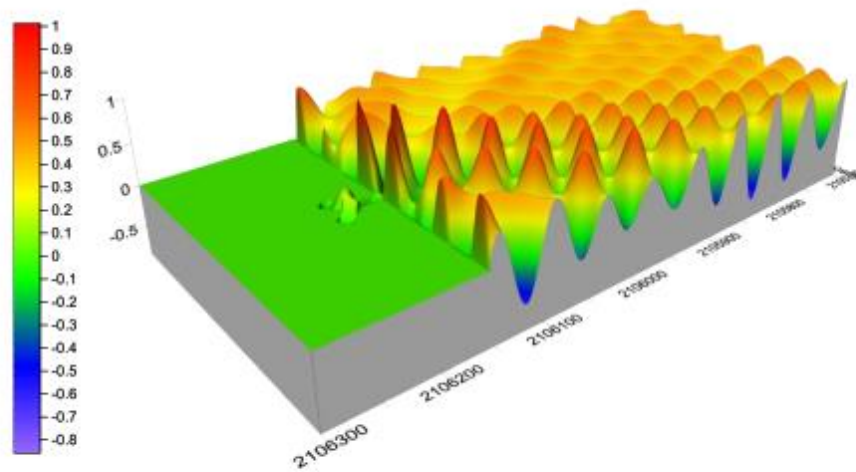
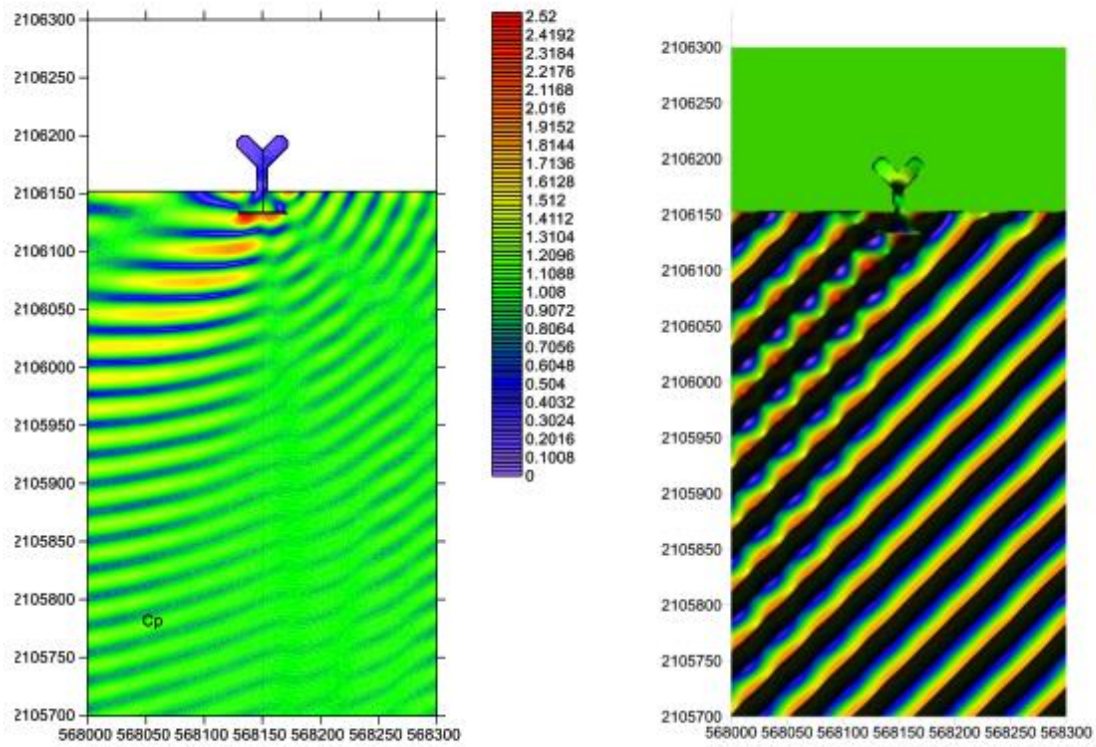
Caso 111



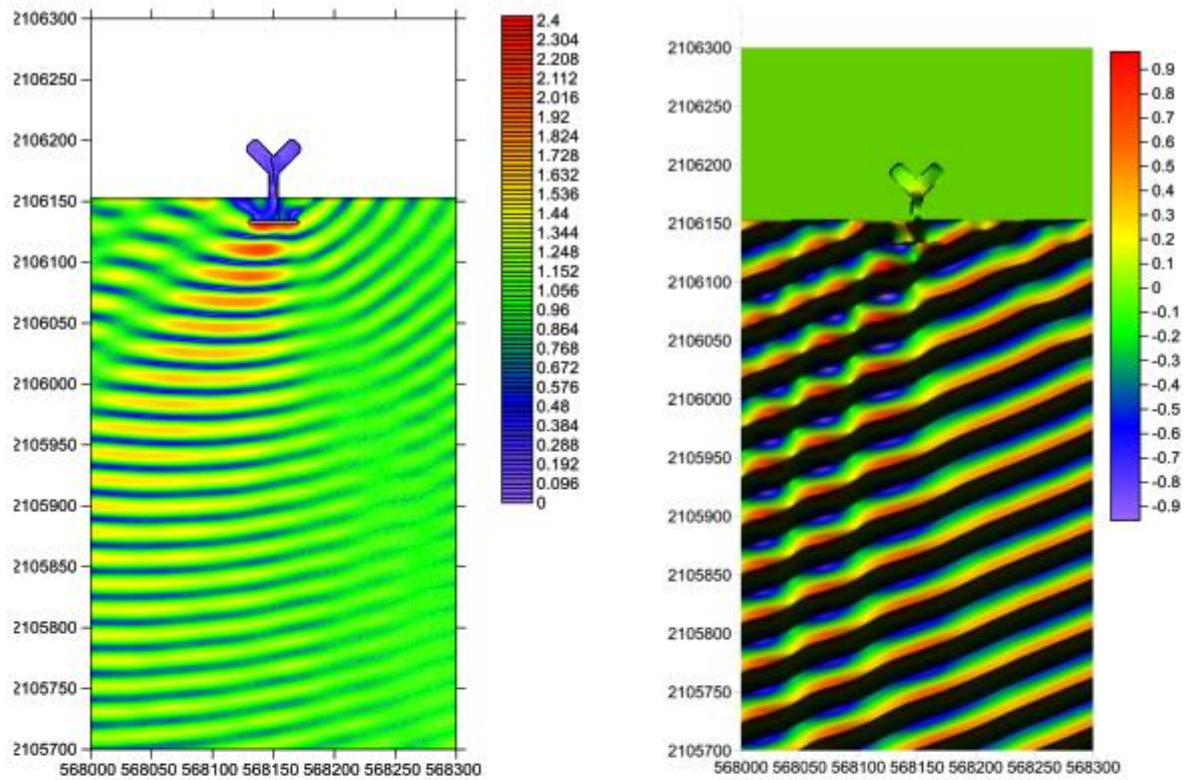
Caso 112 (R)



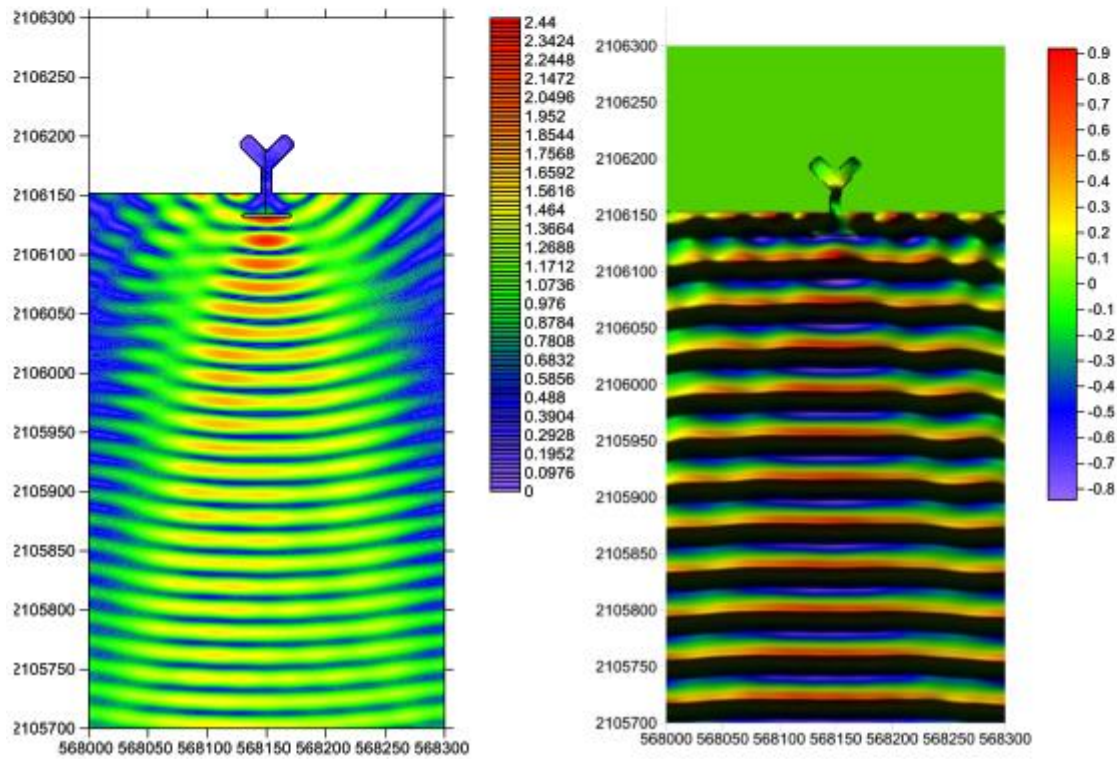
Caso 113 (R)



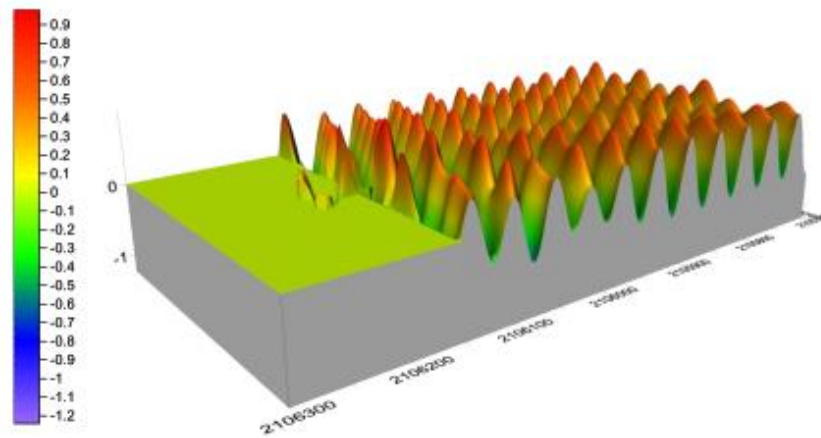
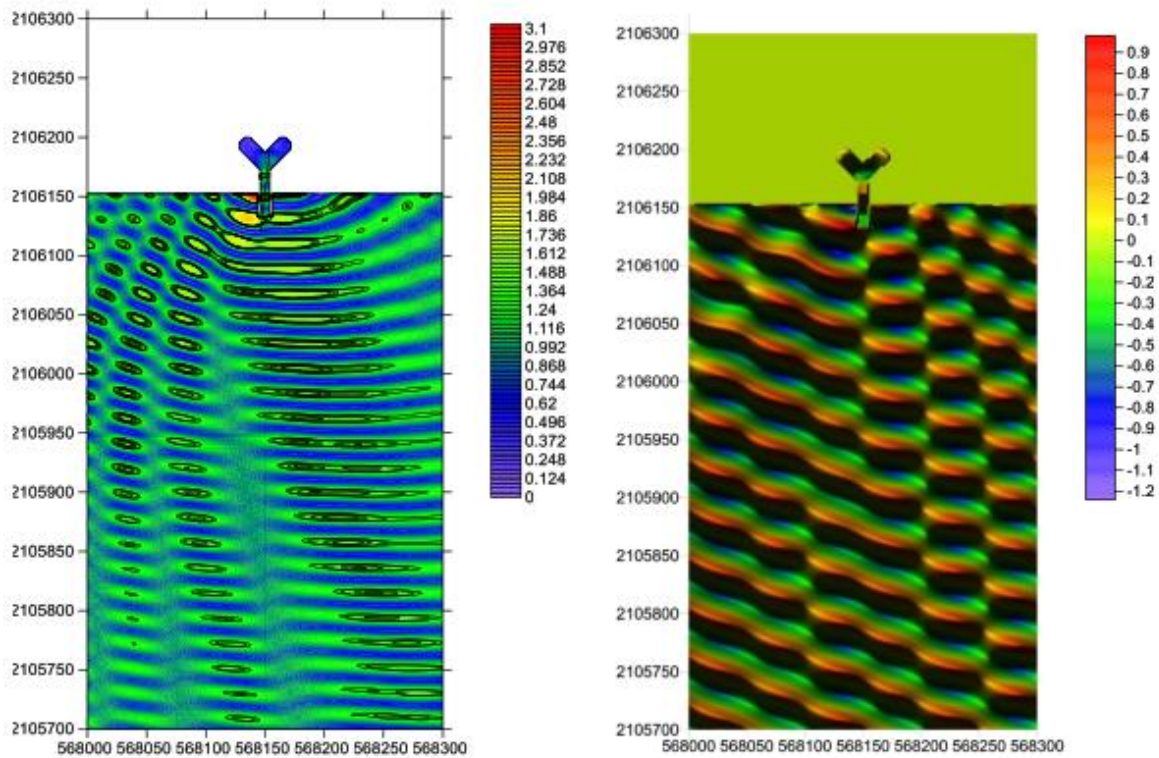
Caso 114



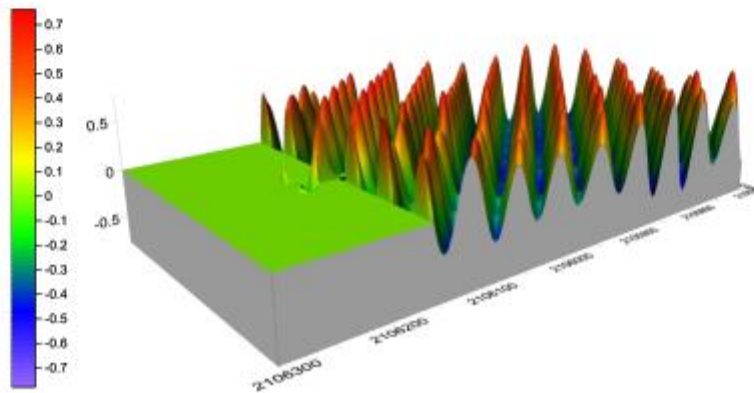
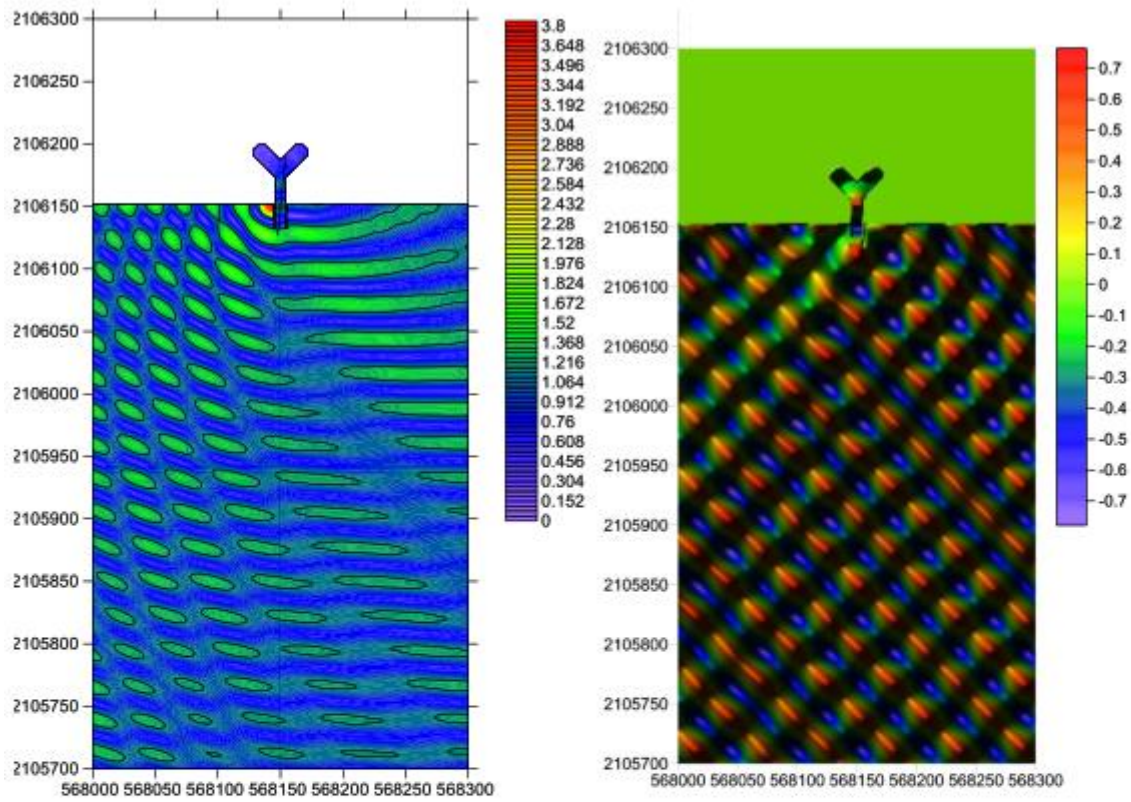
Caso 115



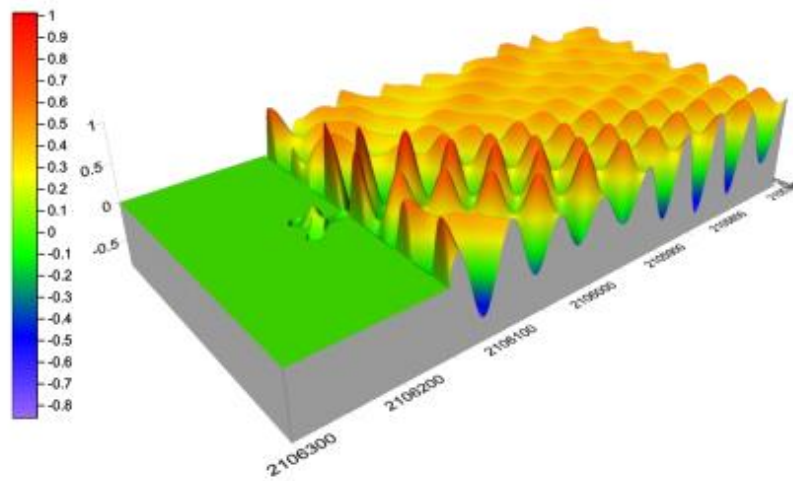
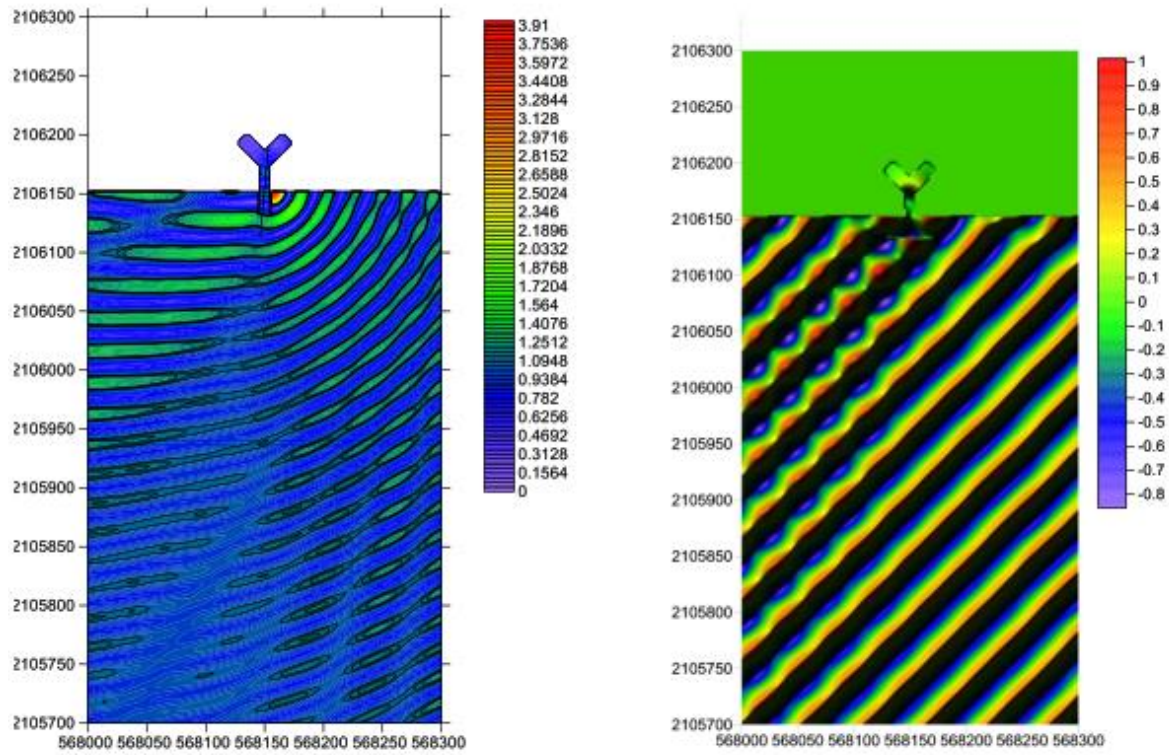
Caso 116 (R)



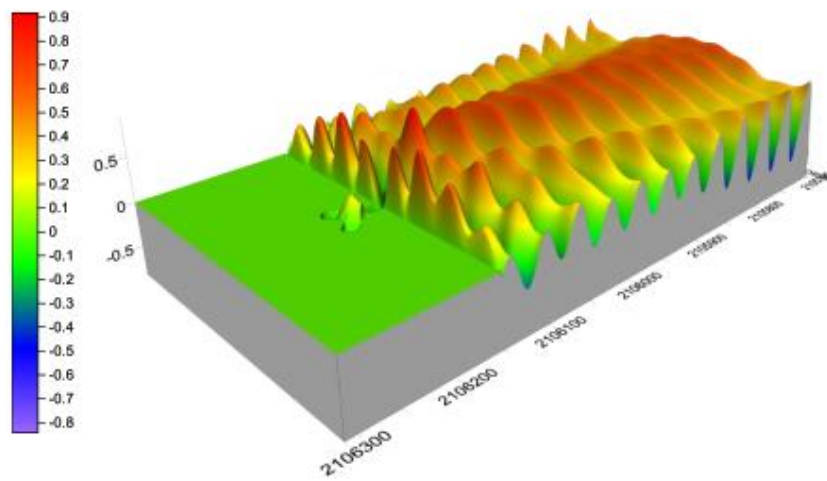
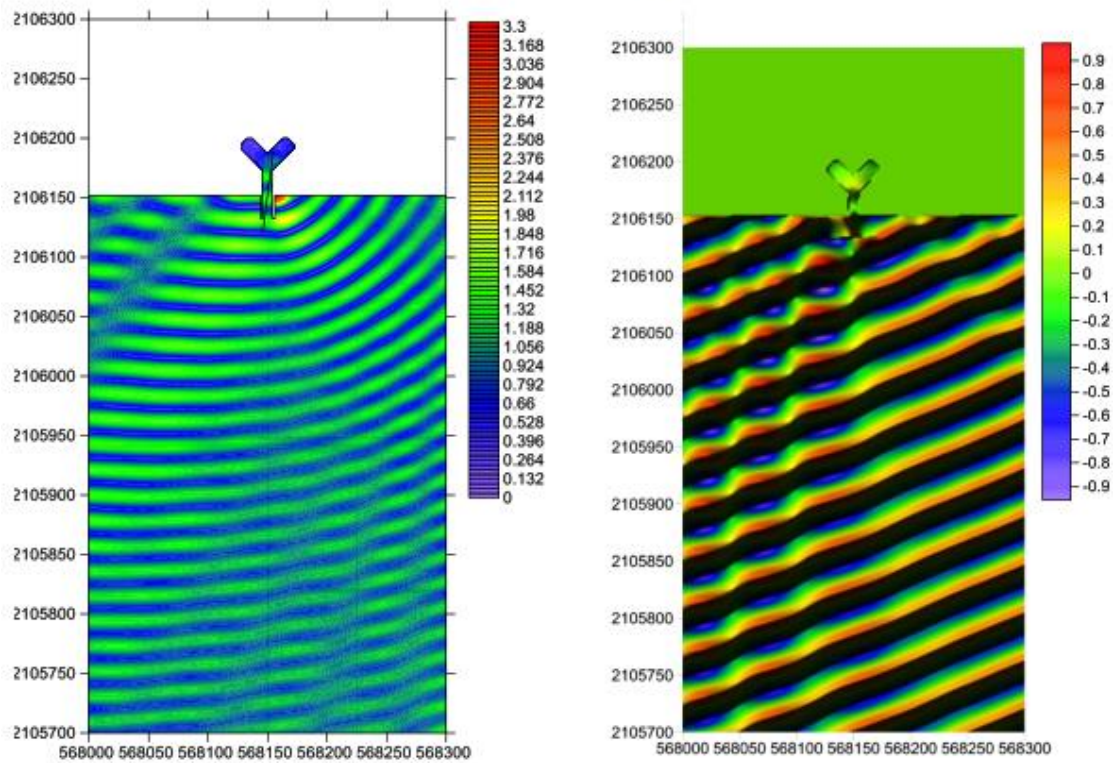
Caso 117 (R)



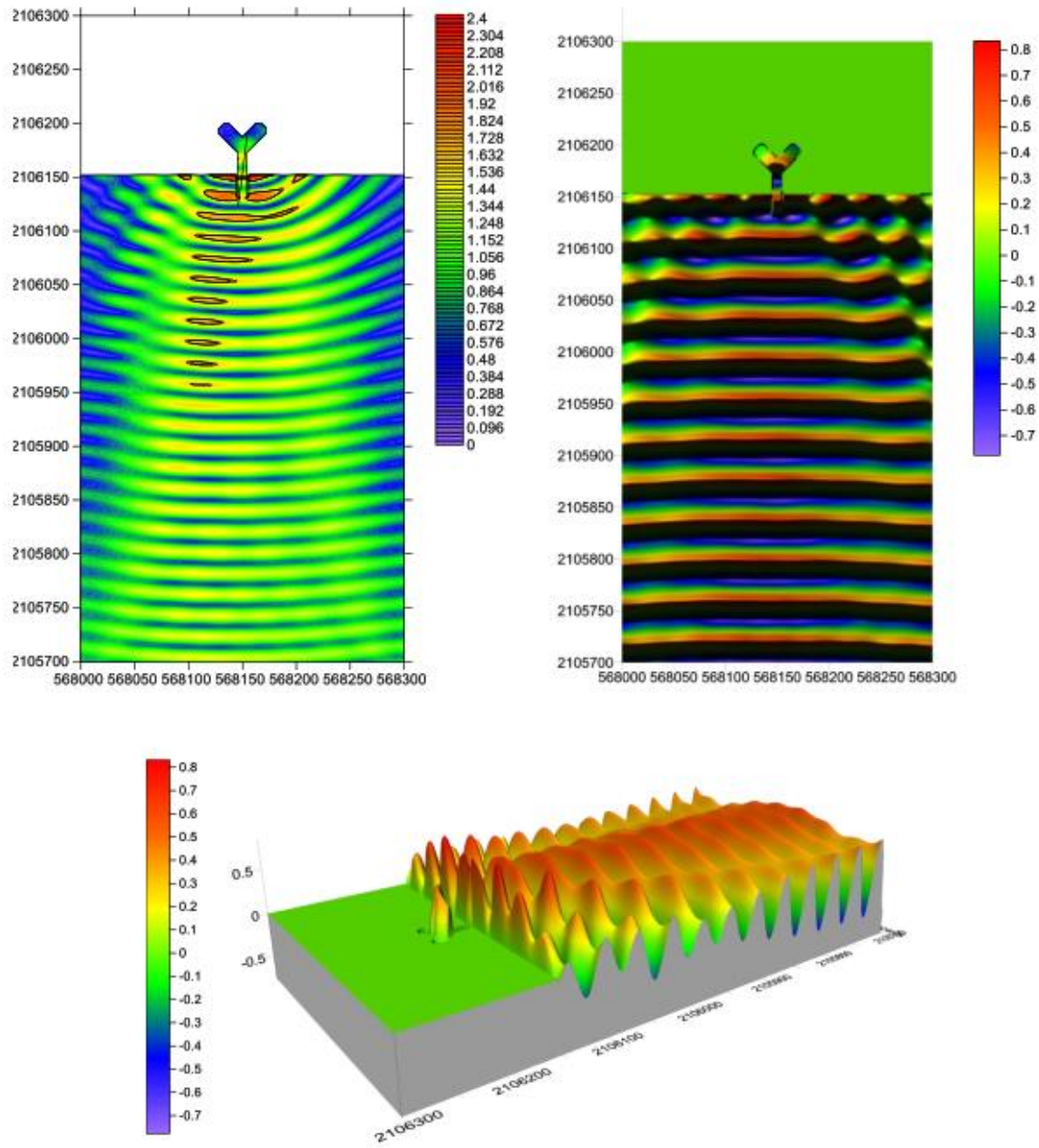
Caso 118 (R)



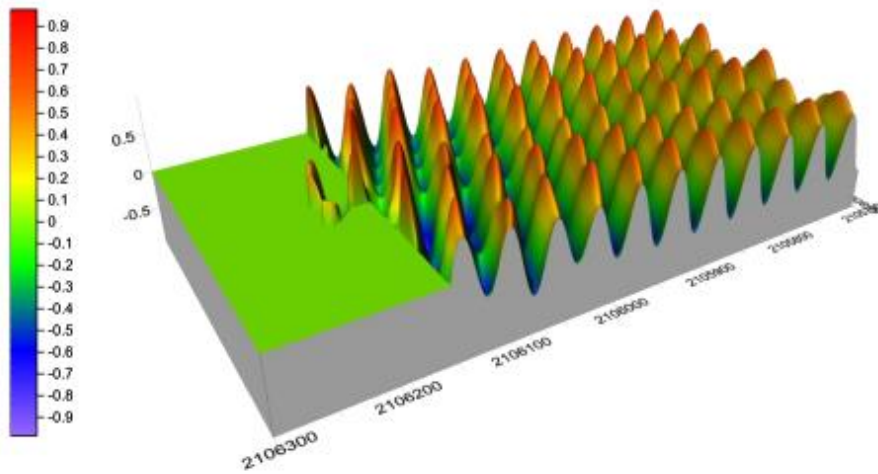
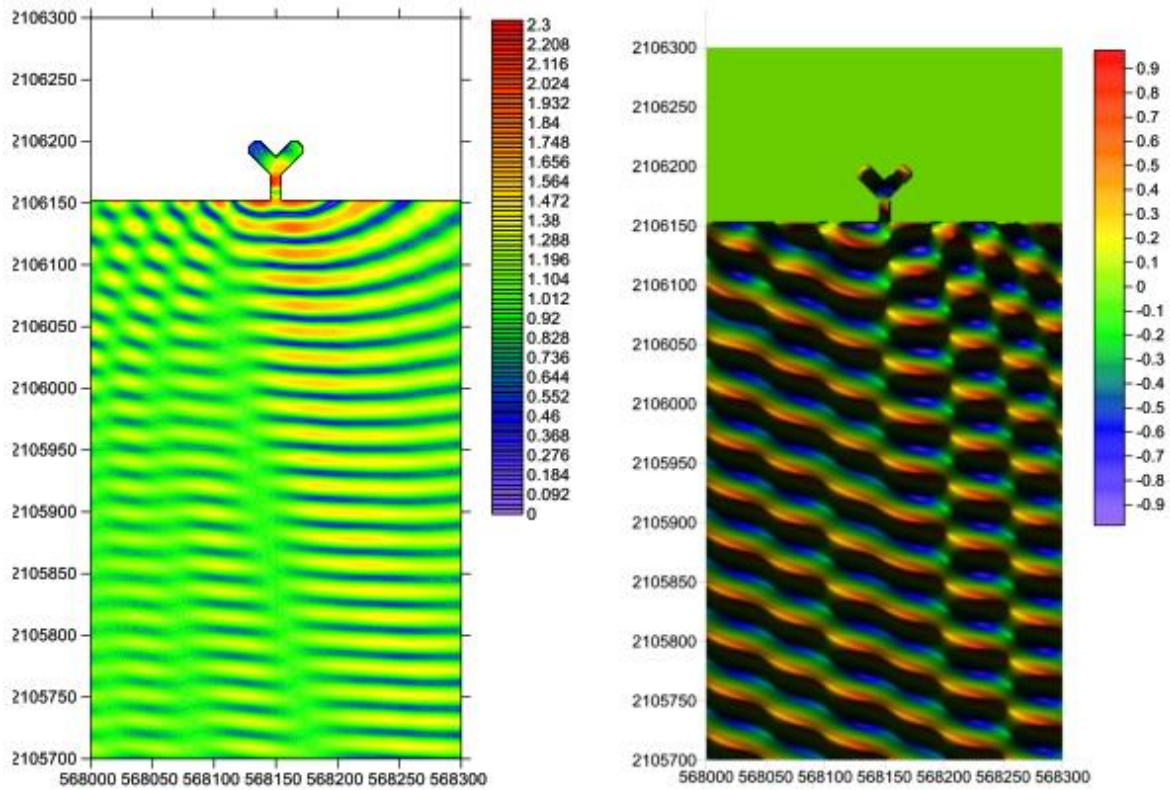
Caso 119 (R)



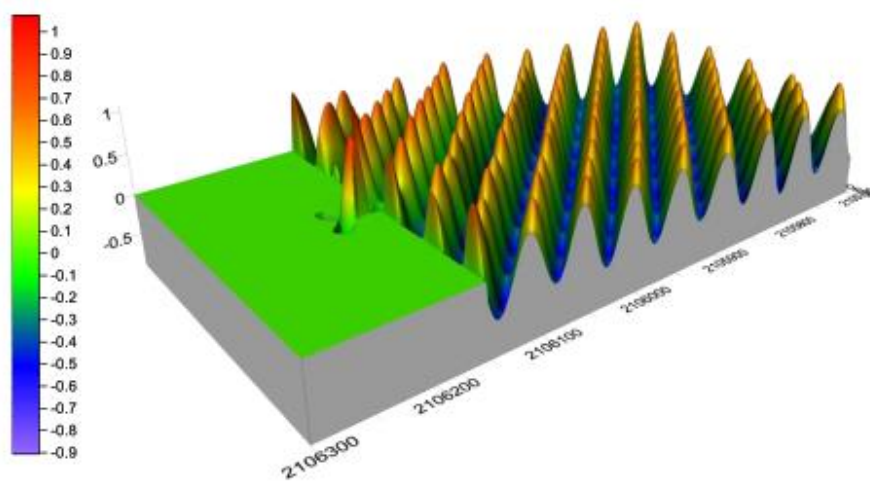
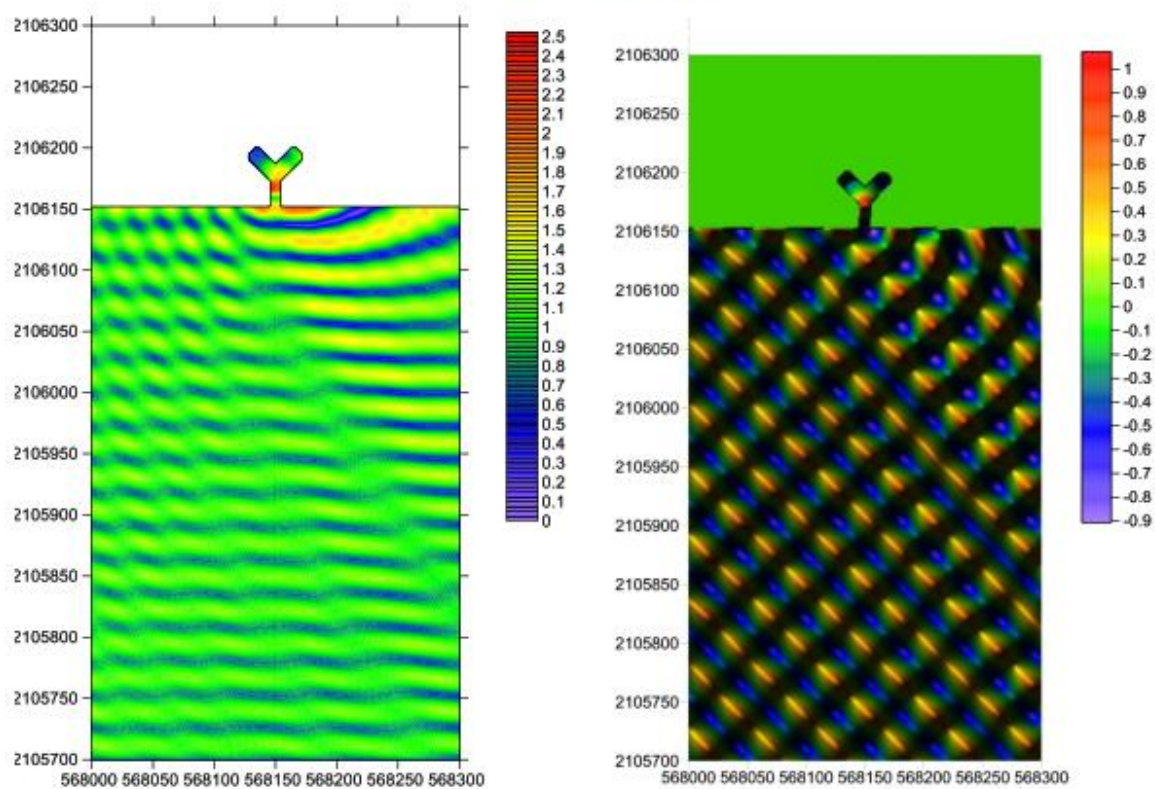
Caso 120 (R)



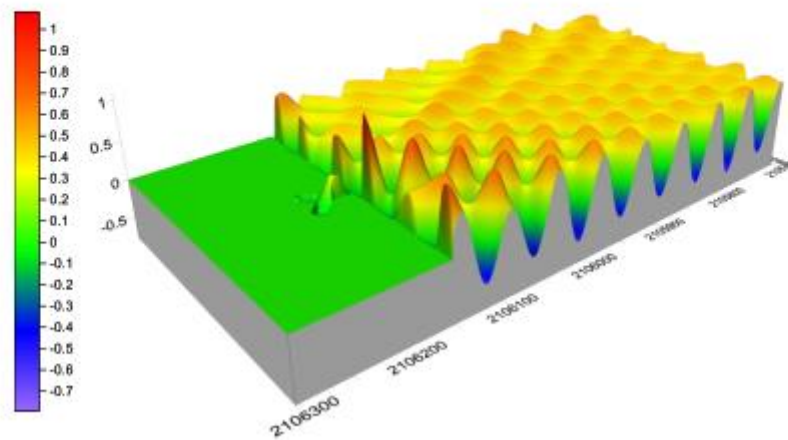
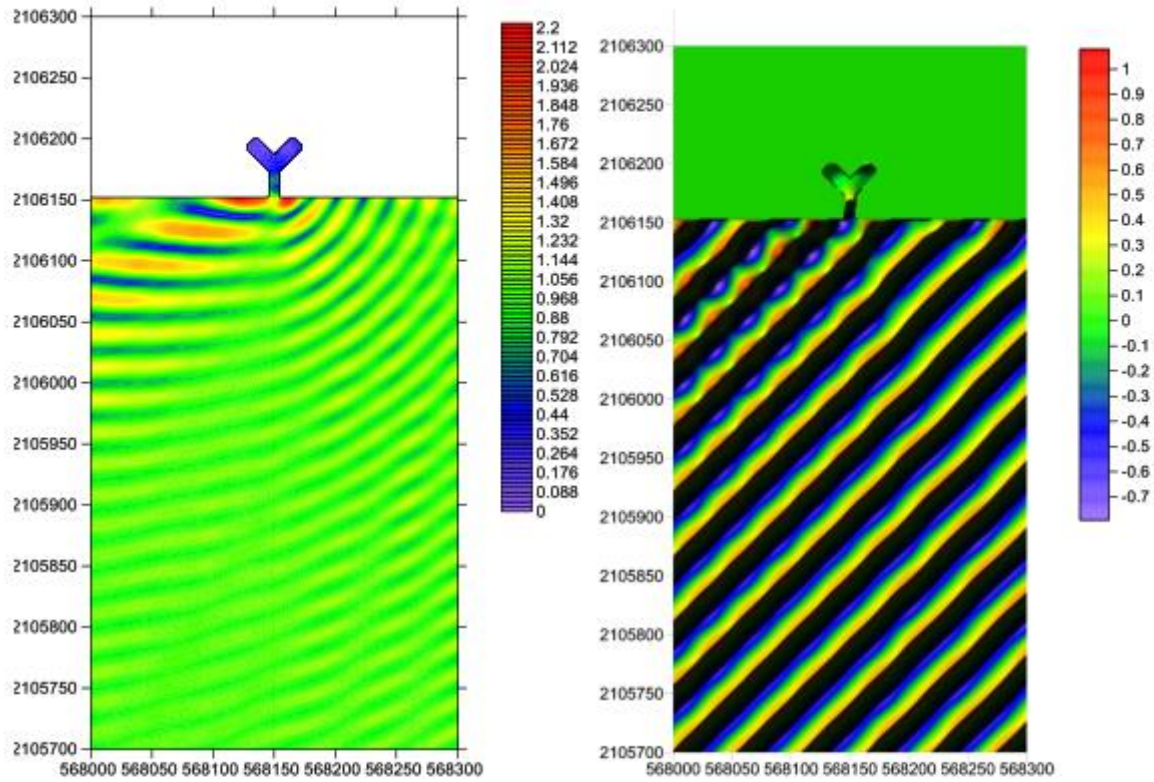
Caso 121 (R)



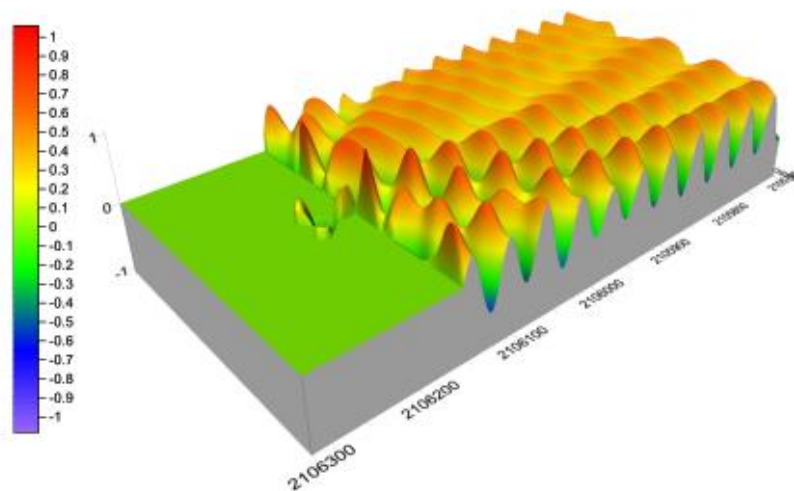
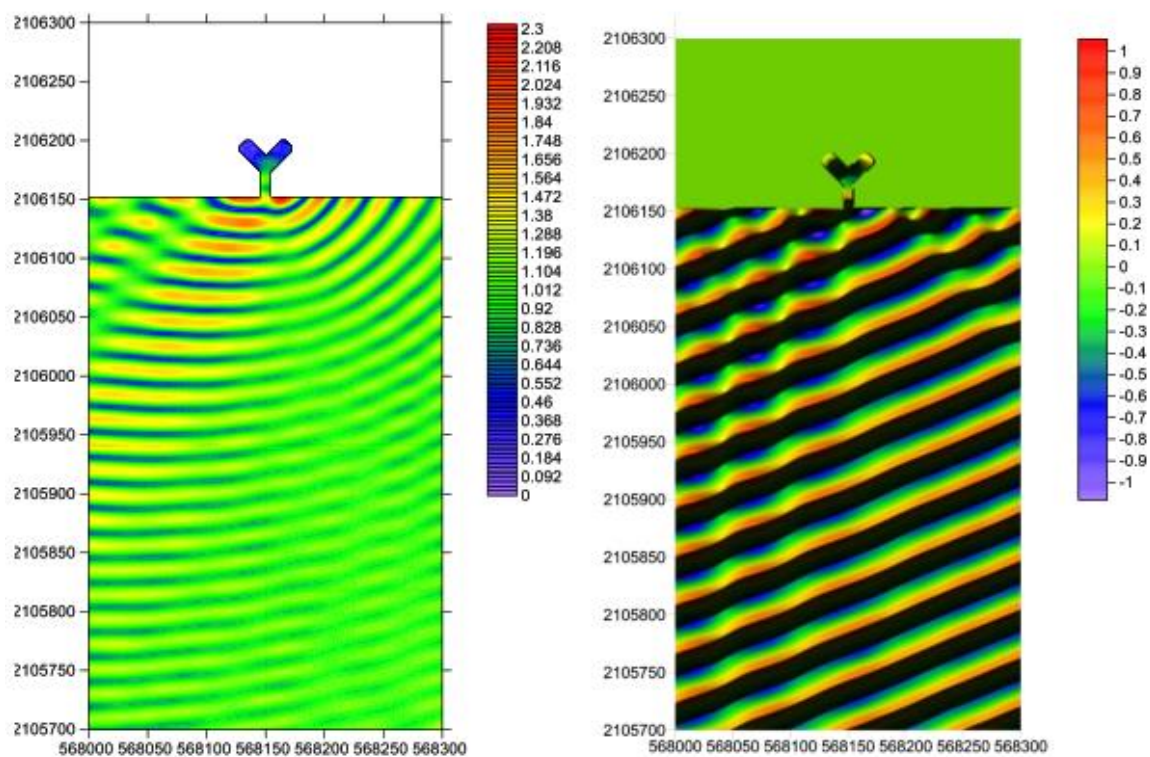
Caso 122 (R)



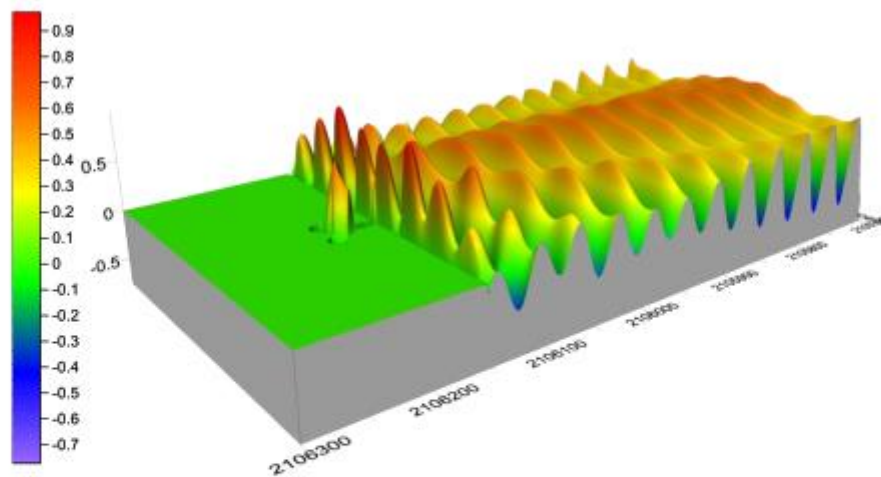
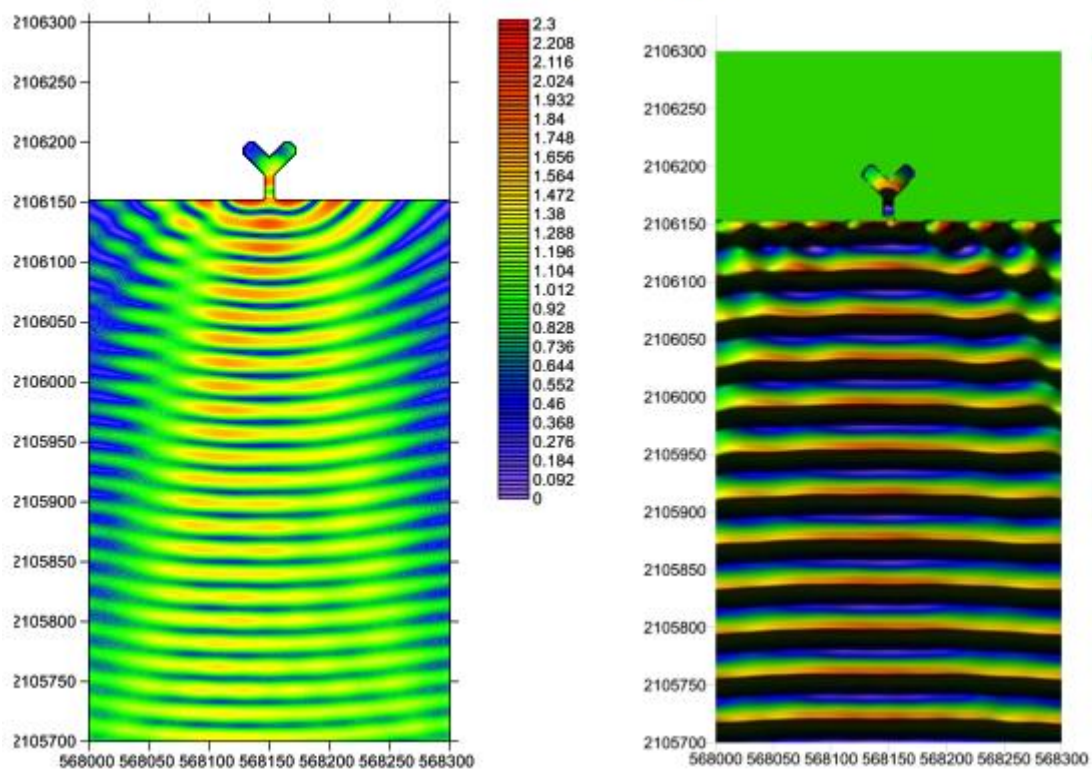
Caso 123 (R)



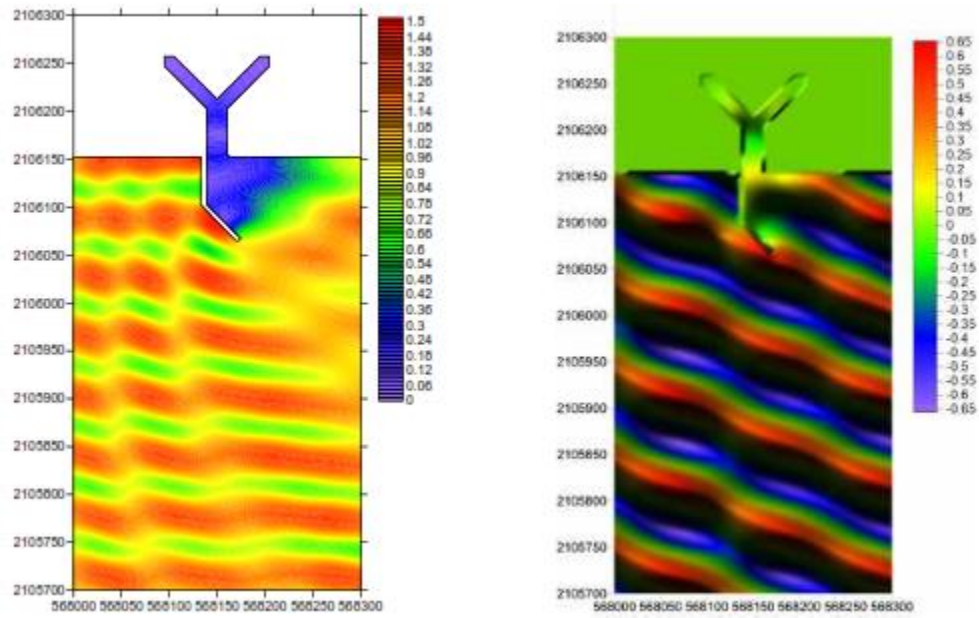
Caso 124 (R)



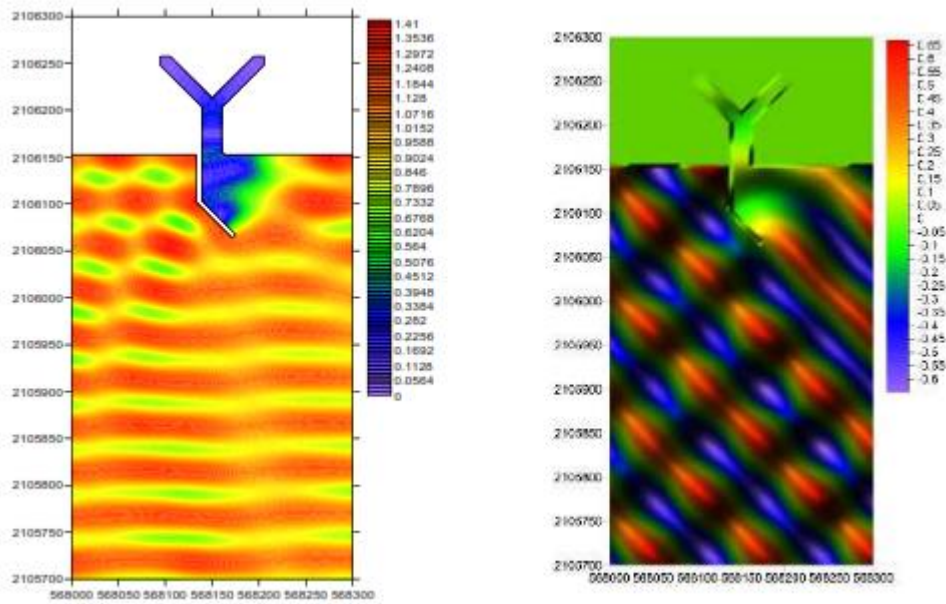
Caso 125 (R)



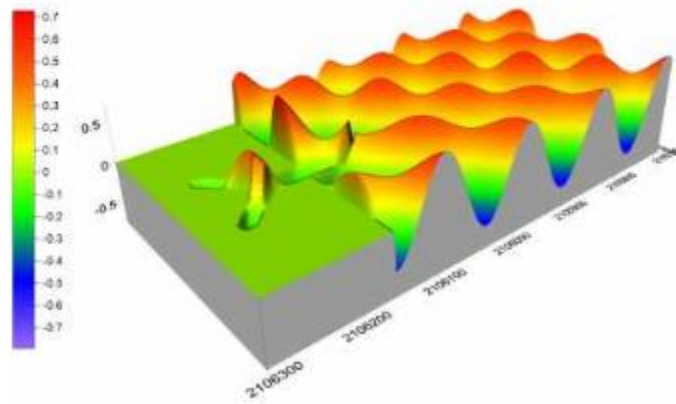
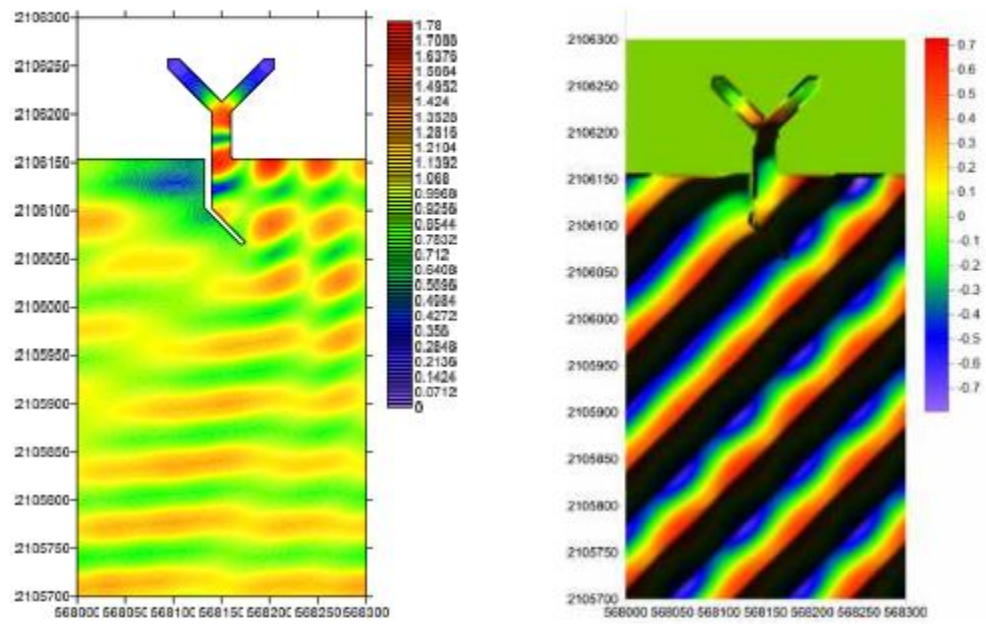
Caso 126



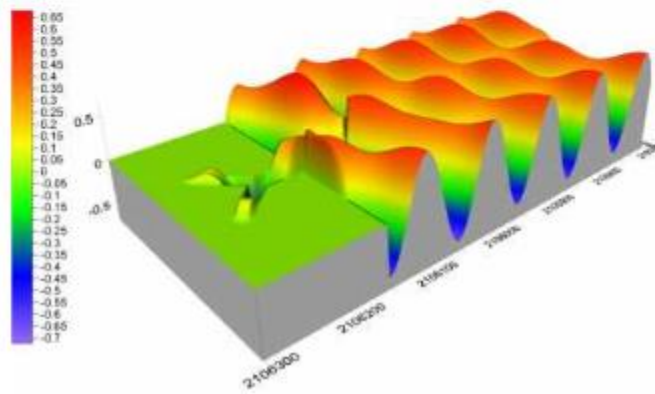
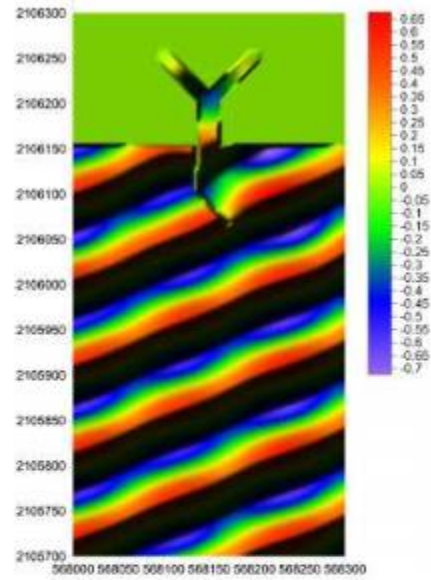
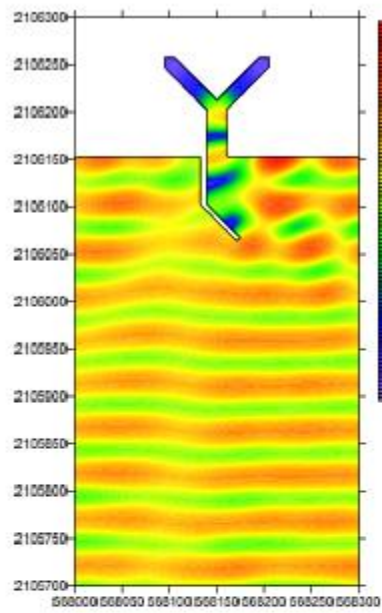
Caso 127



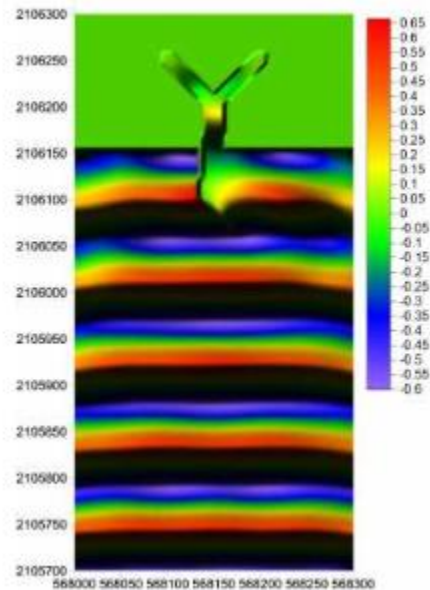
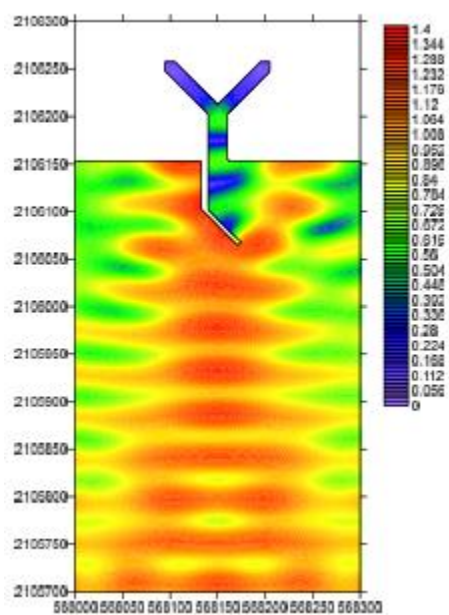
Caso 128 (R)



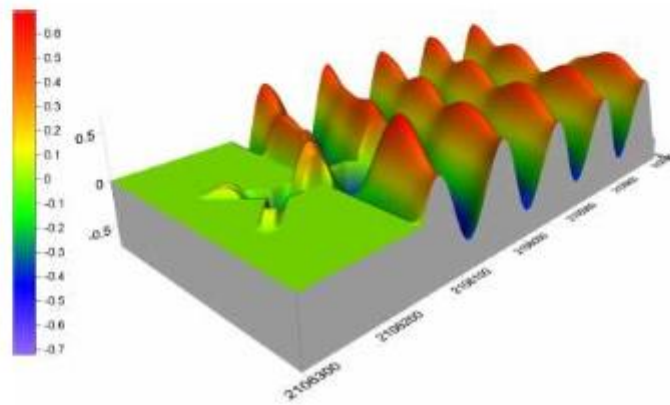
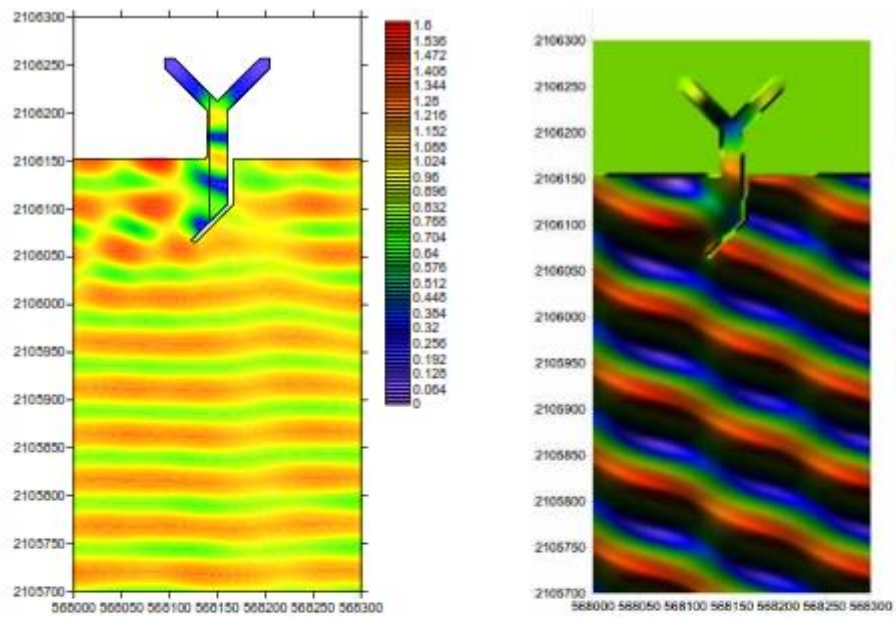
Caso 129 (R)



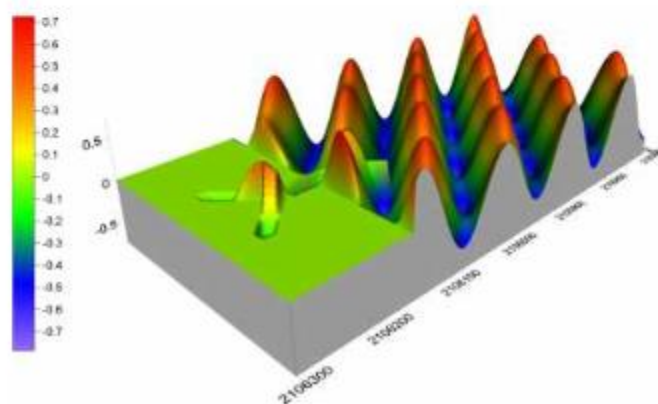
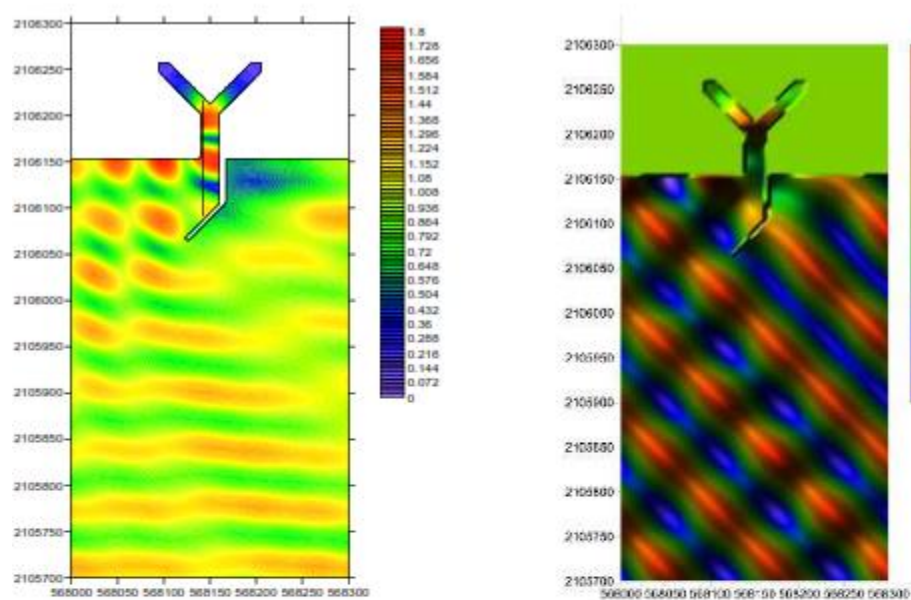
Caso 130



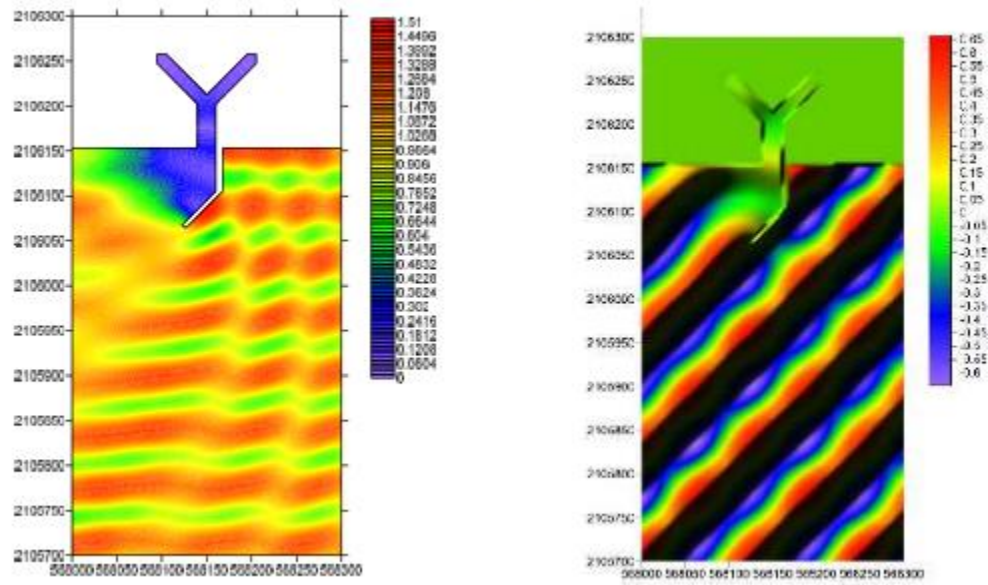
Caso 131 (R)



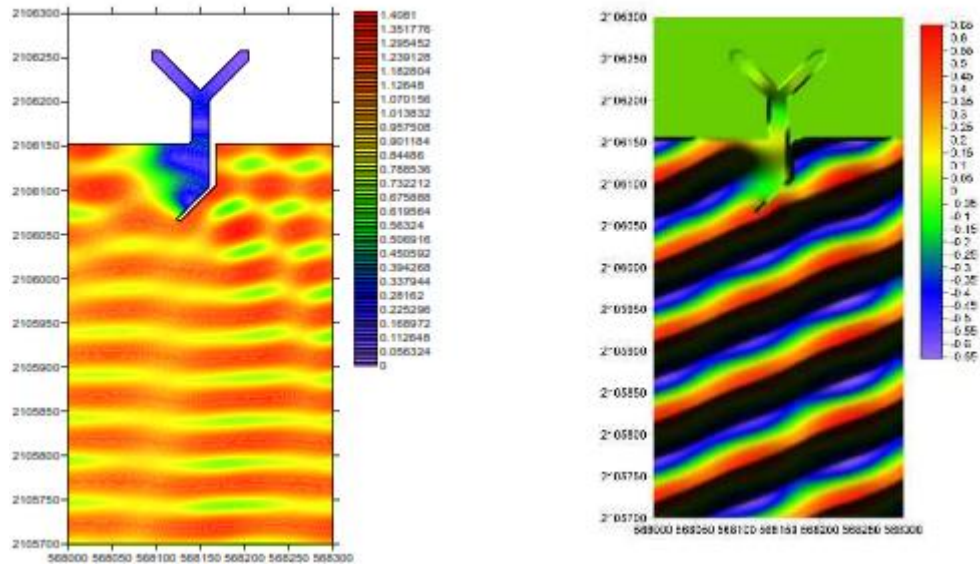
Caso 132 (R)



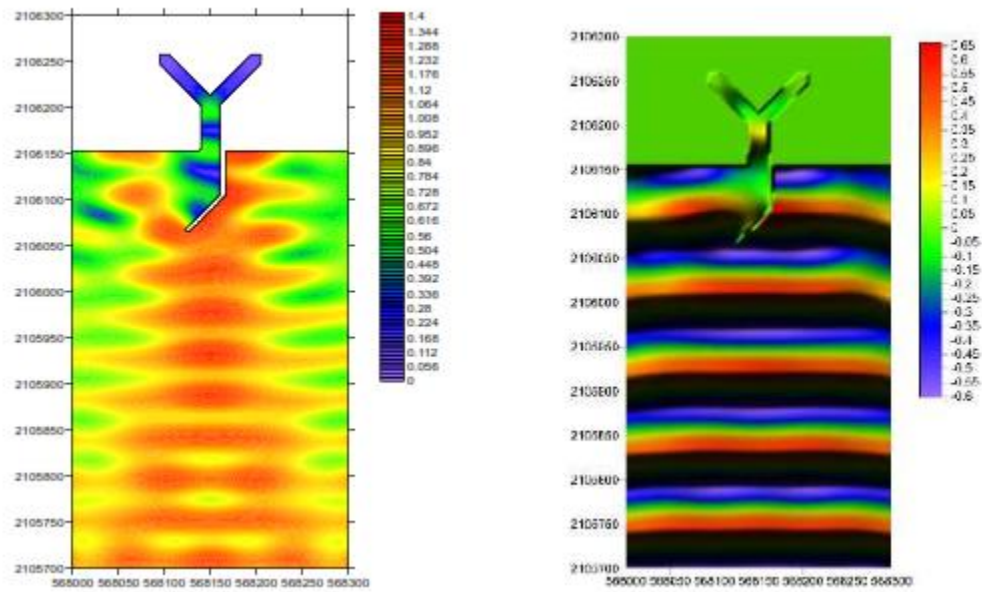
Caso 133



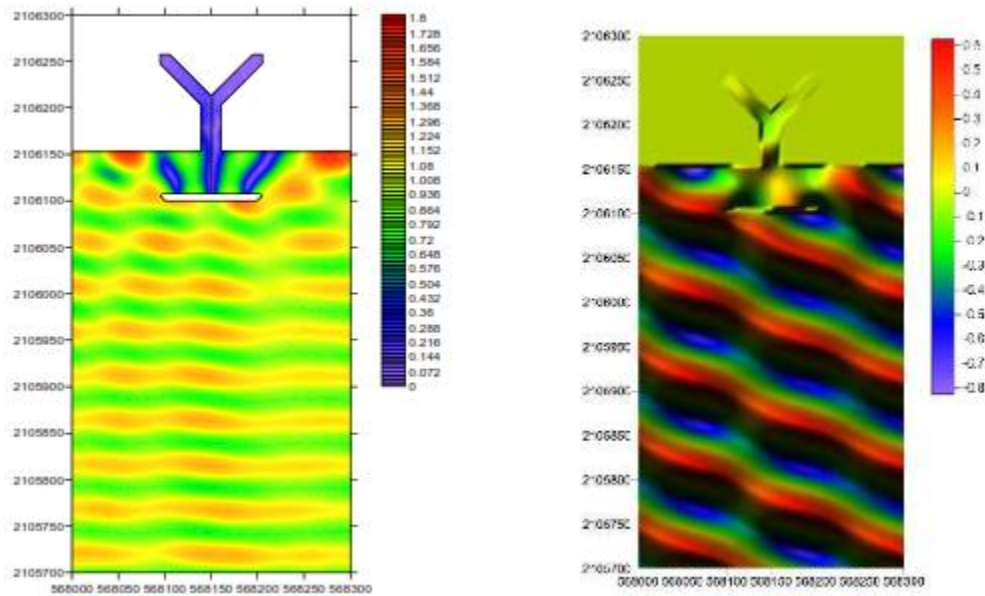
Caso 134



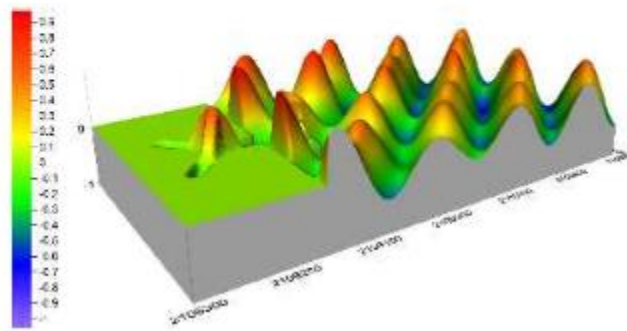
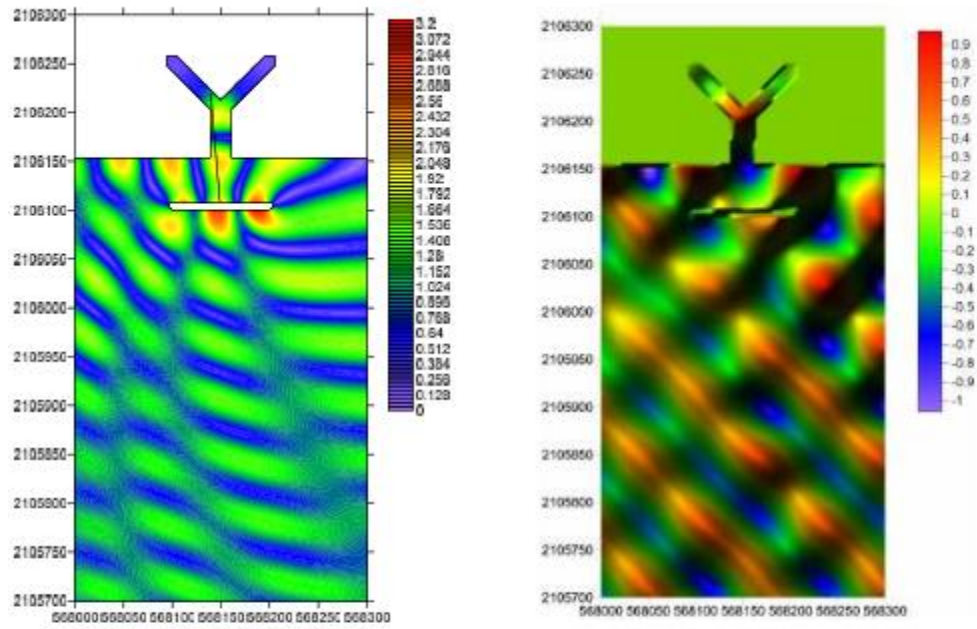
Caso 135



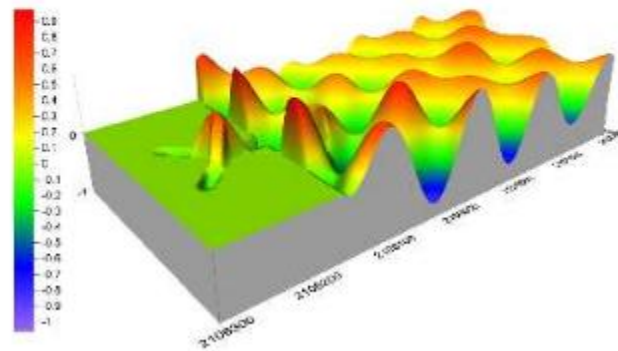
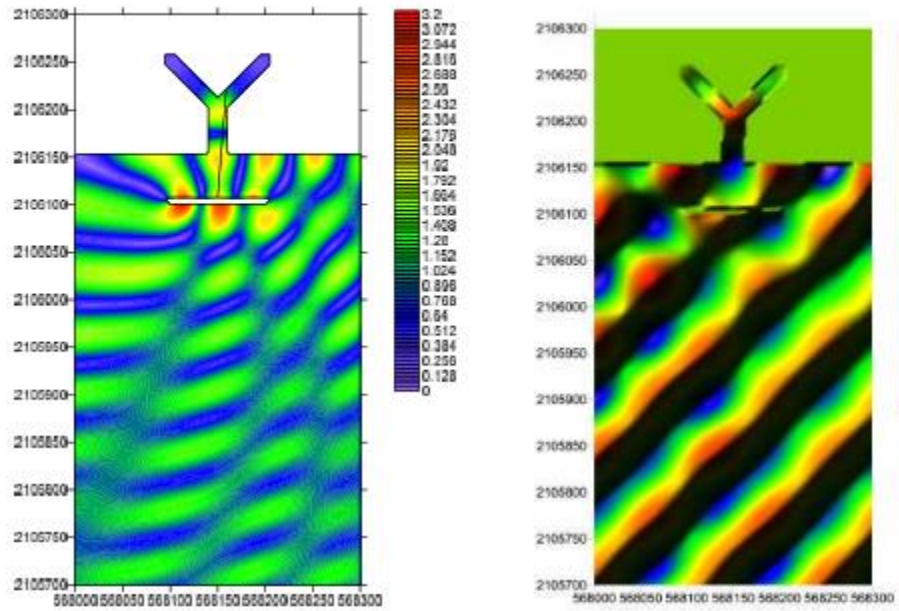
Caso 136



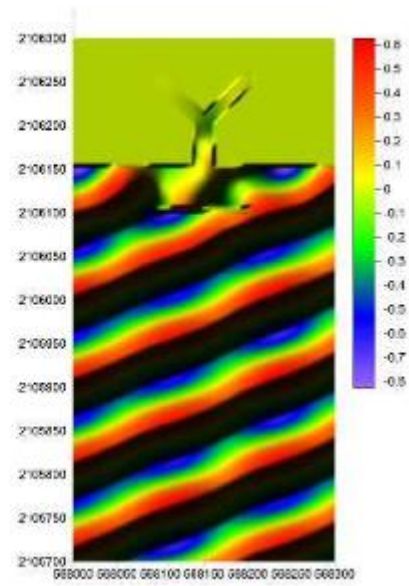
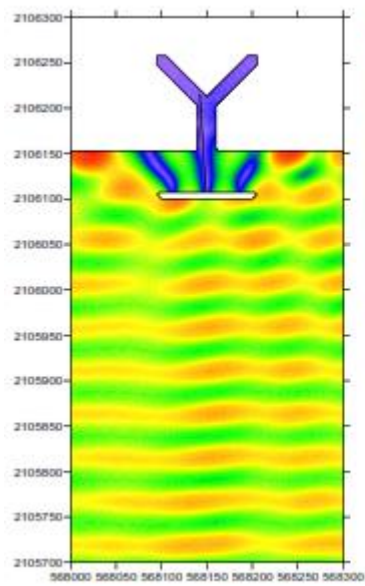
Caso 137 (R)



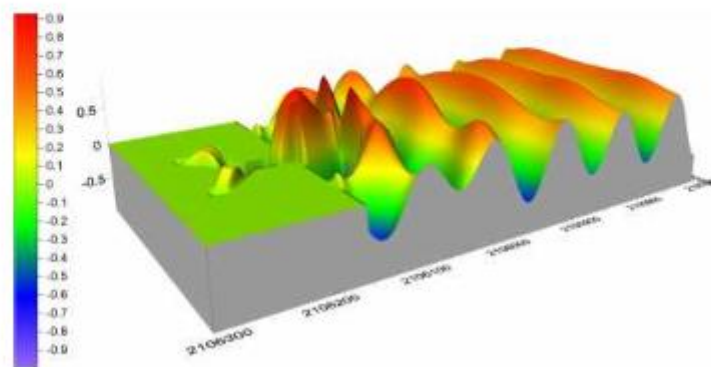
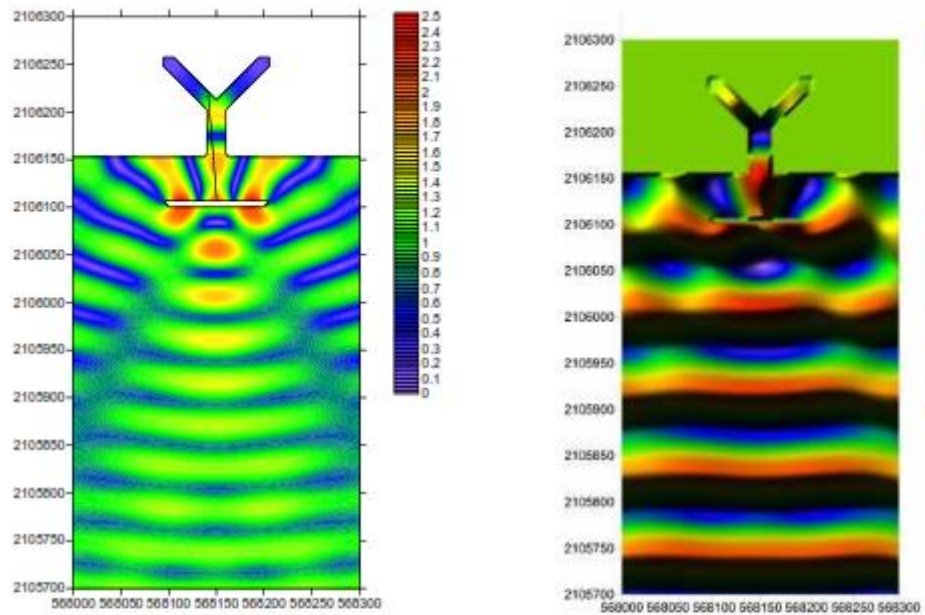
Caso 138 (R)



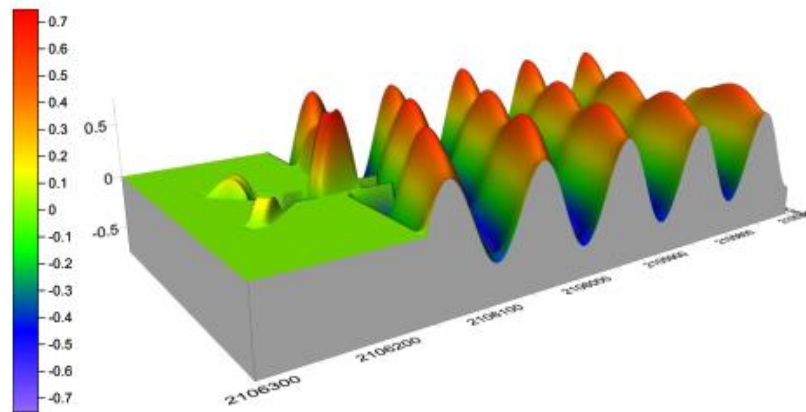
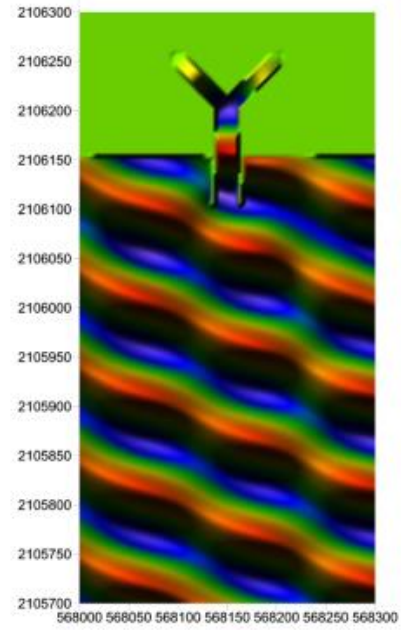
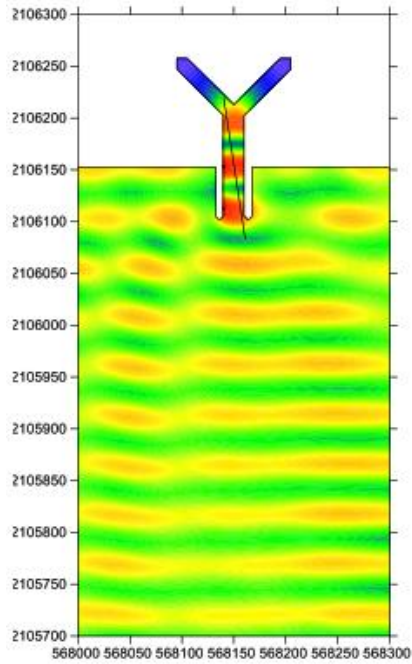
Caso 139



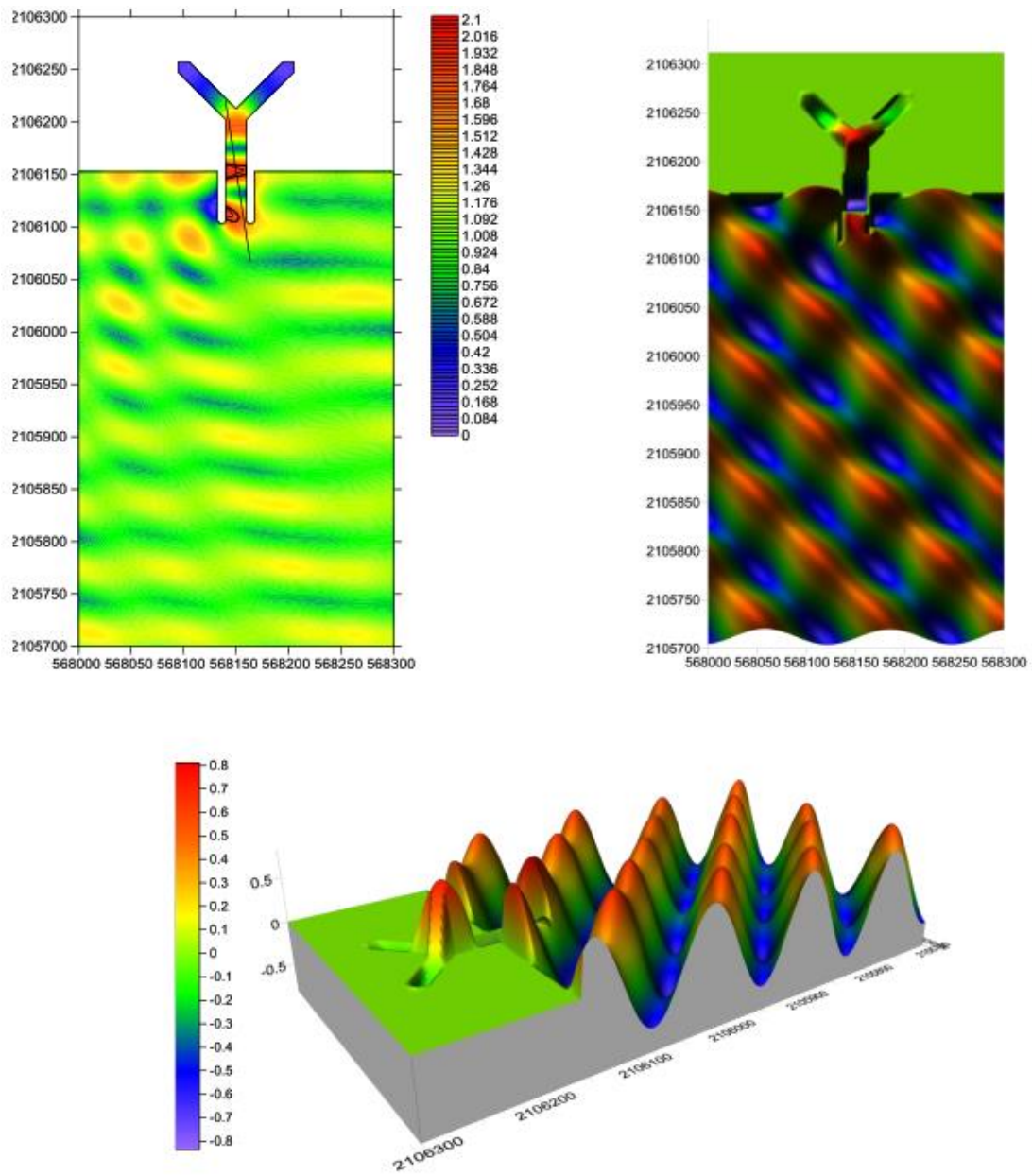
Caso 140 (R)



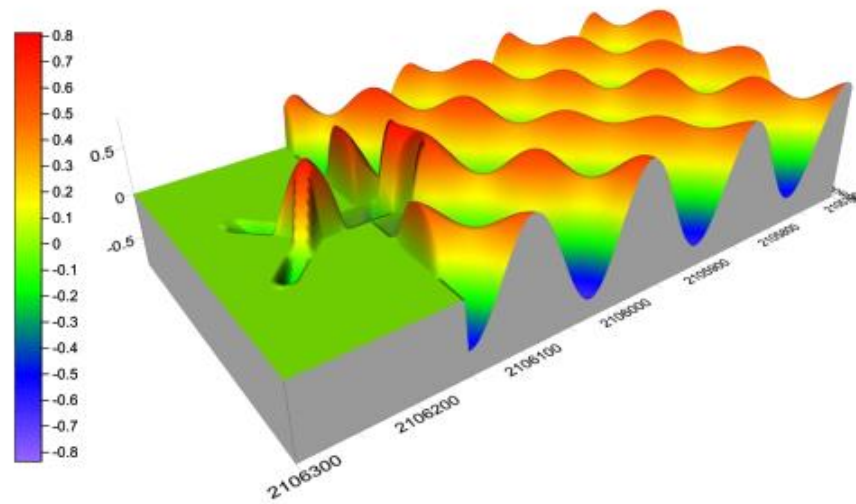
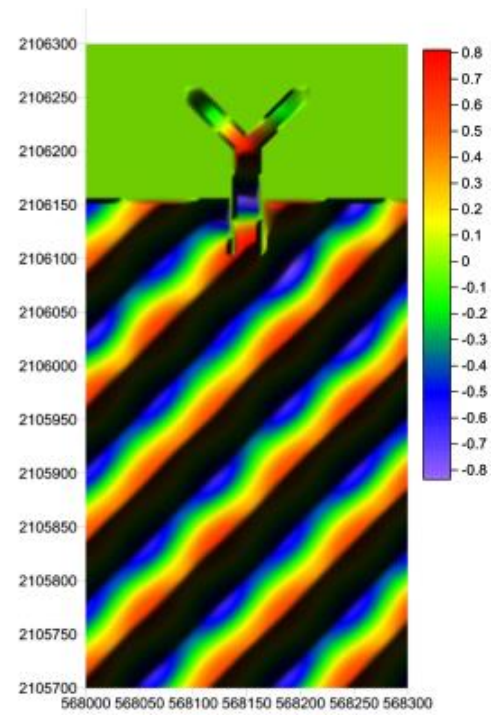
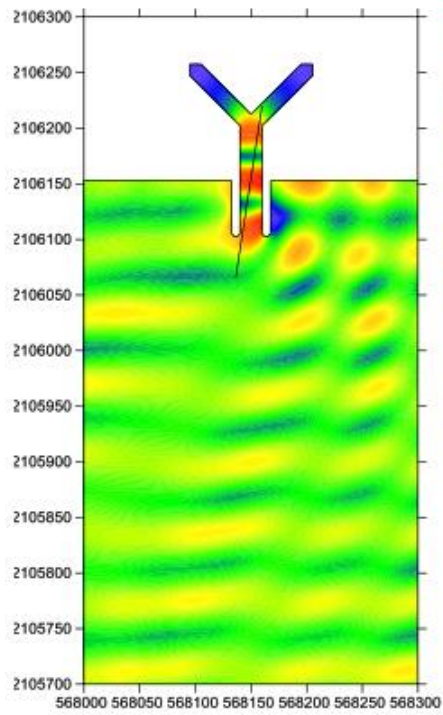
Caso 141 (R)



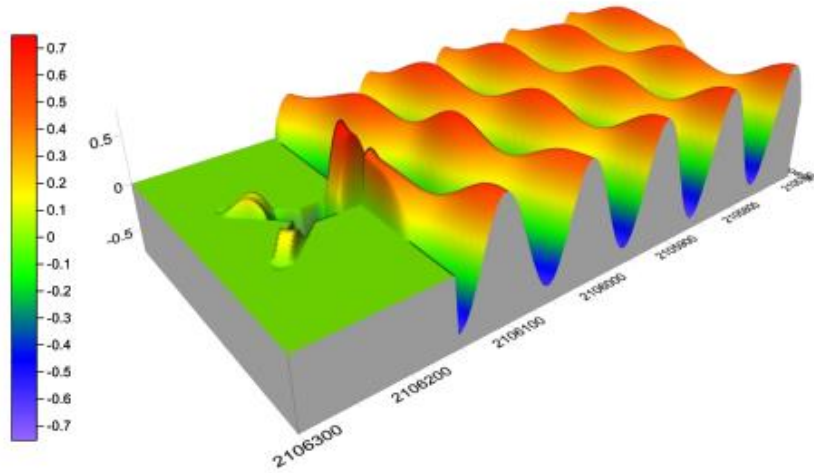
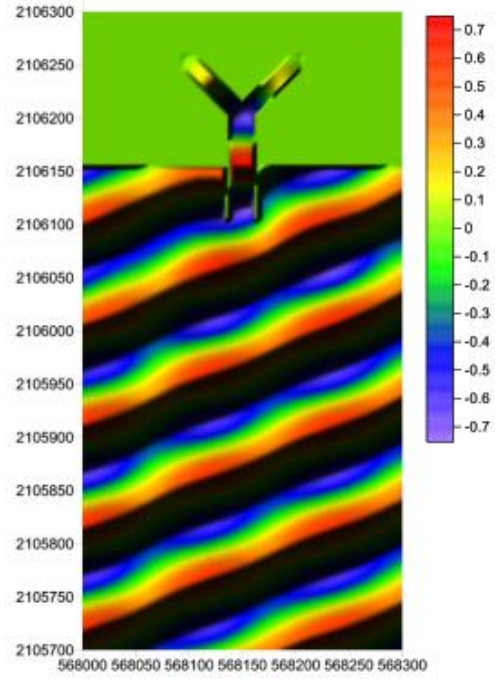
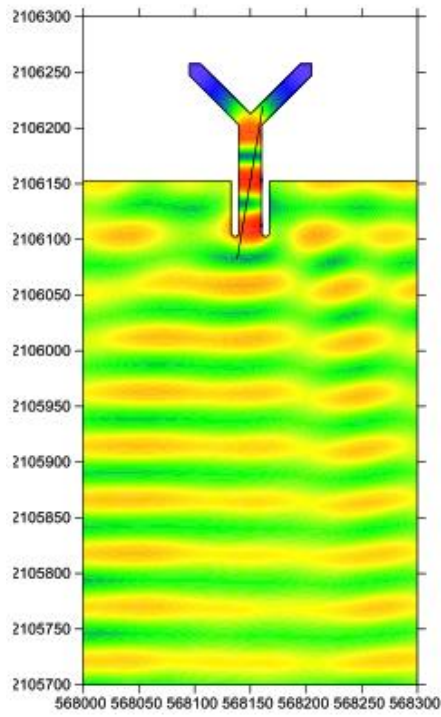
Caso 142 (R)



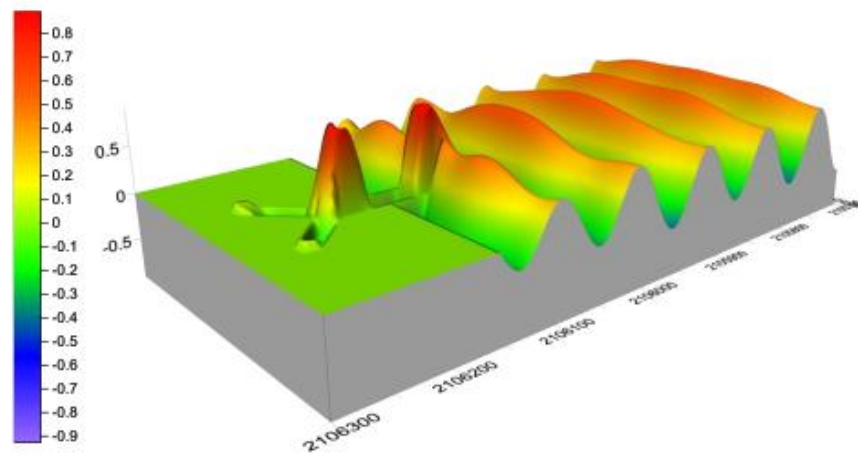
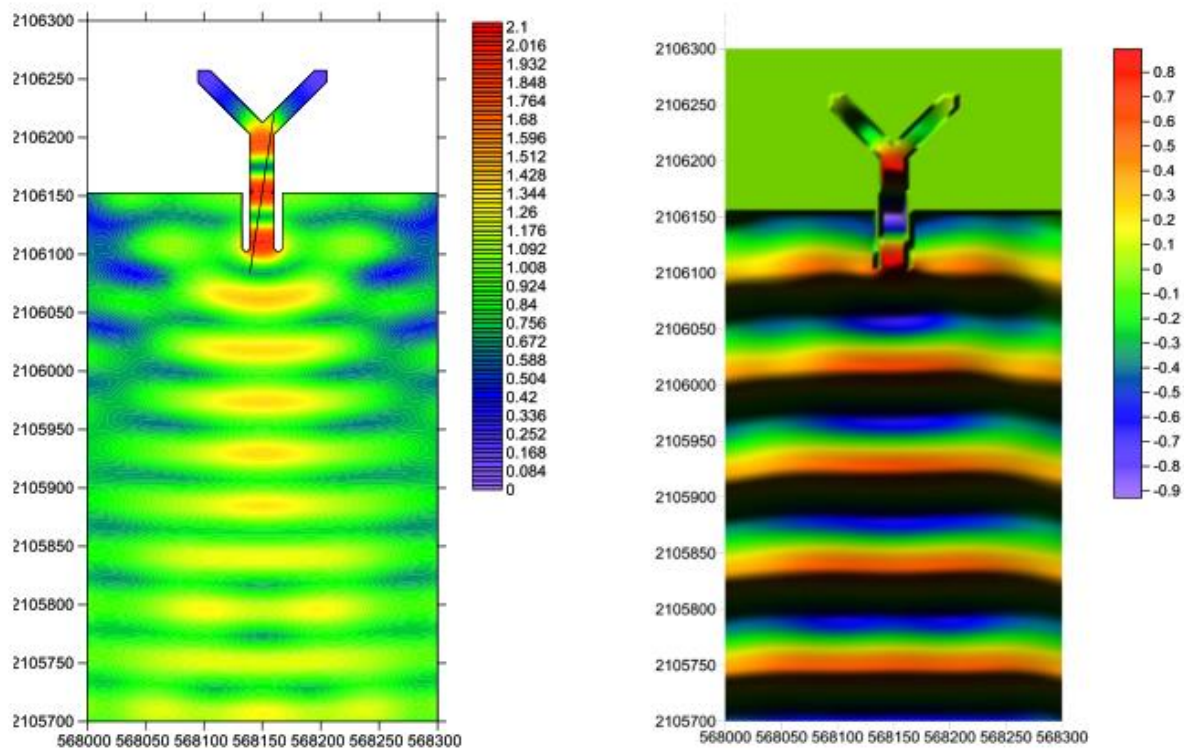
Caso 143 (R)



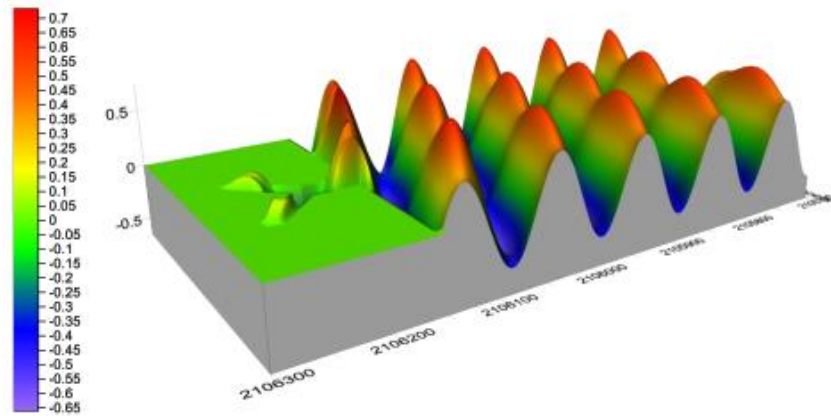
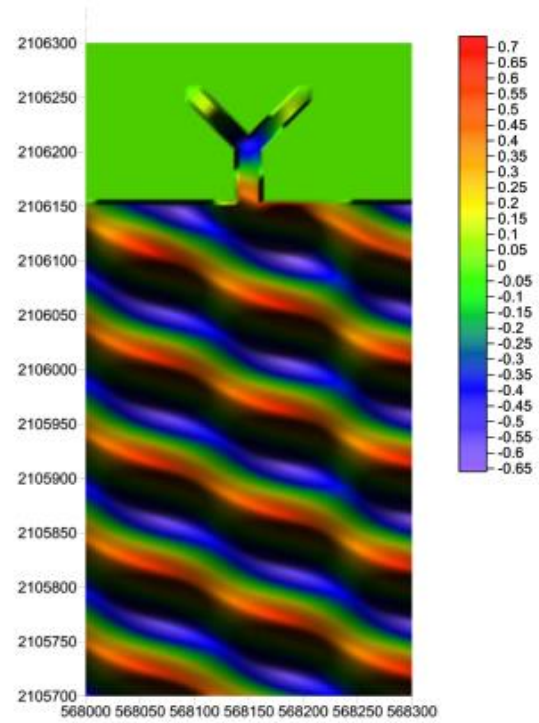
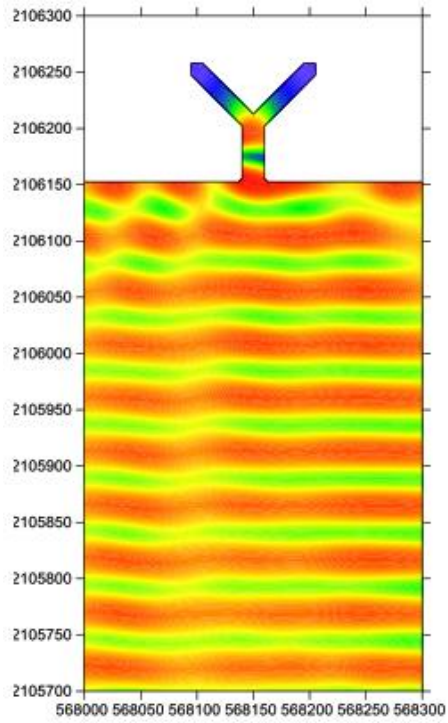
Caso 144 (R)



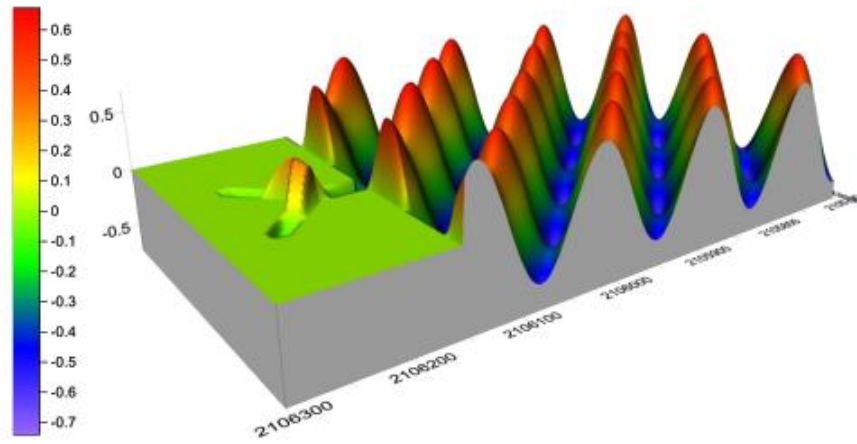
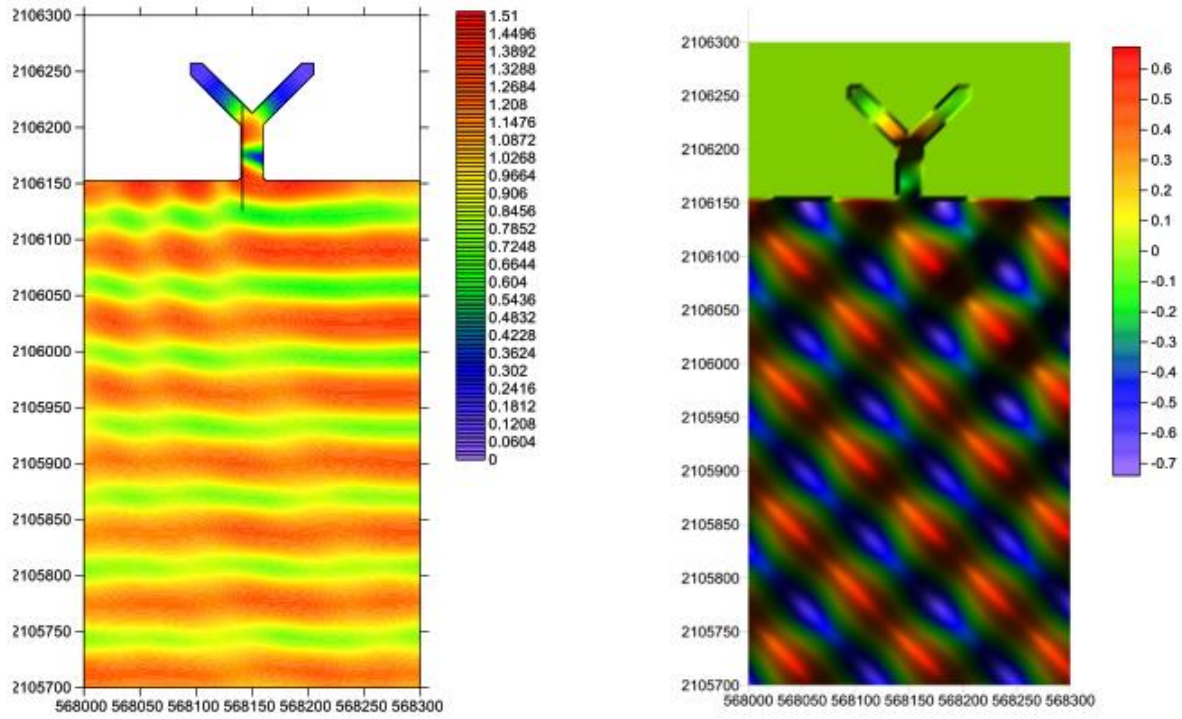
Caso 145 (R)



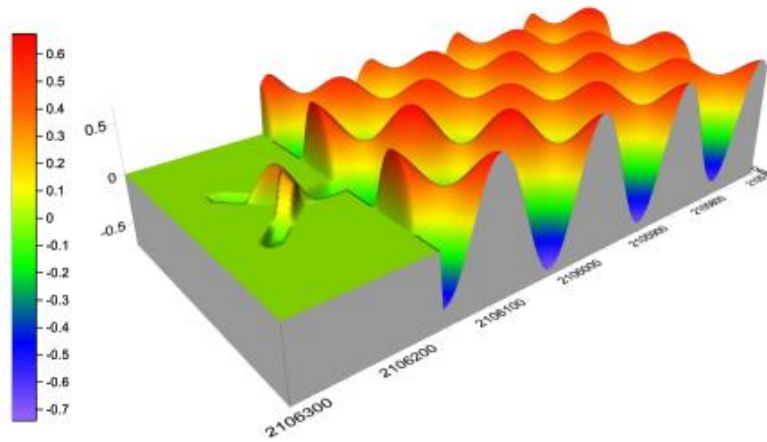
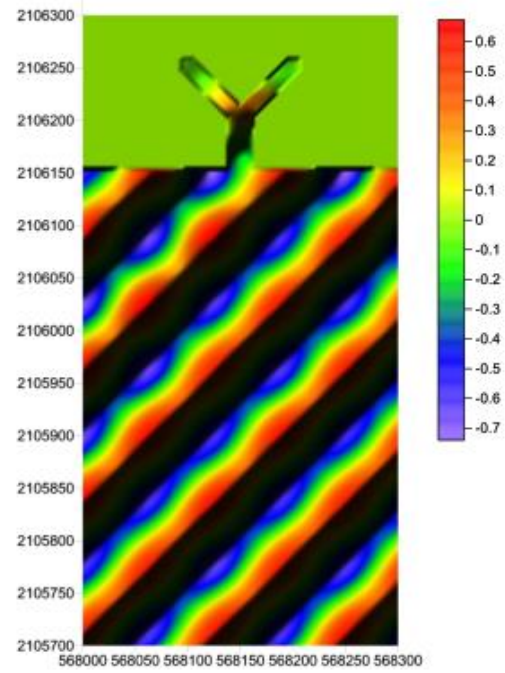
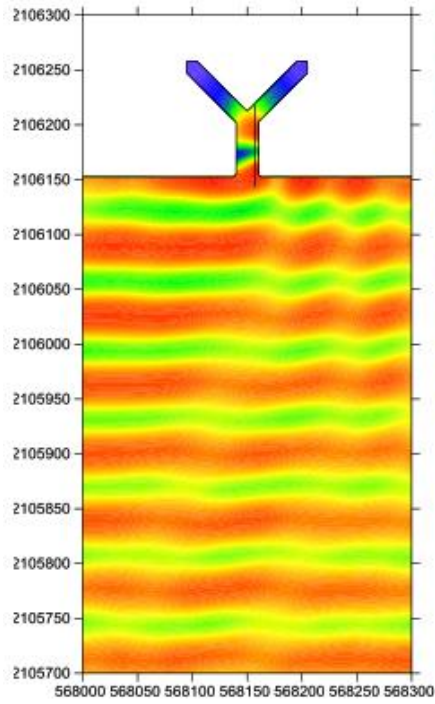
Caso 146 (R)



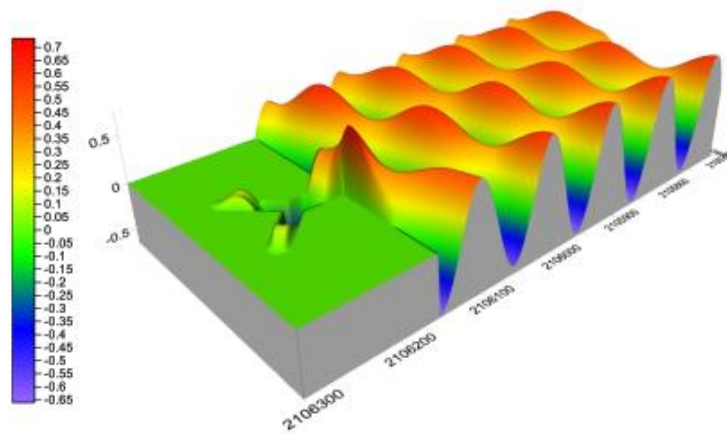
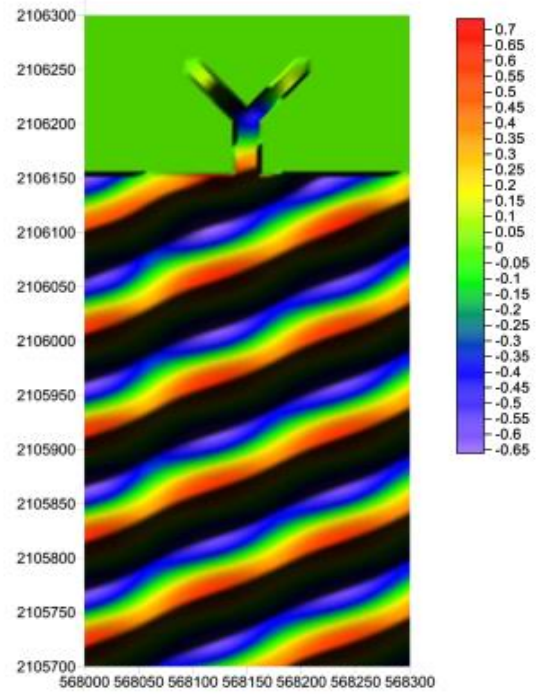
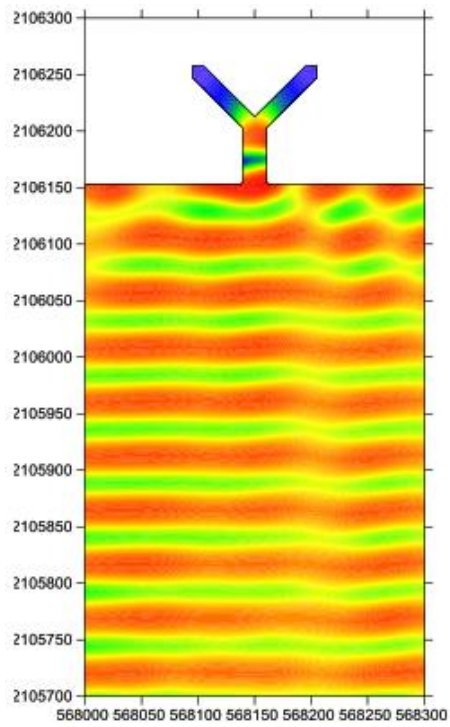
Caso 147 (R)



Caso 148 (R)



Caso 149 (R)



Caso 150 (R)

