



T
155.963
7747
c. 2

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar



**ANALISIS PRELIMINAR DE LA ESTRUCTURA DE UN
SUBMARINO DE SERVICIO TURISTICO EMPLEANDO
EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO NAVAL

Presentado por:

Patrick Roger Townsend Valencia

Guayaquil - Ecuador

1993

D E C L A R A C I O N

E X P R E S A

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual que contiene la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL ".

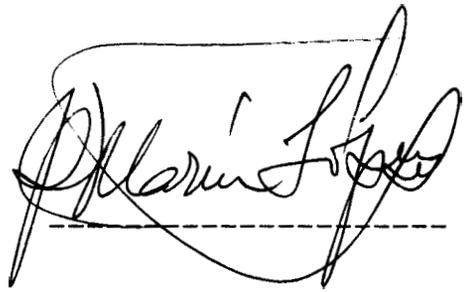
(Reglamento de Exámenes y Titulos profesionales de la ESPOL)



Patrick Townsend Valencia



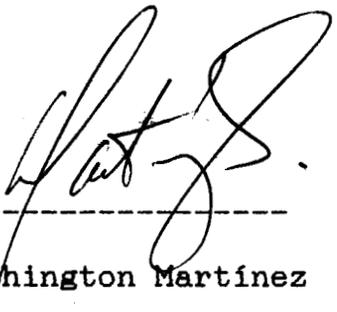
Ing. Néstor Alejandro O.
Presidente del Tribunal



José Marín., Ph. D.
Director de Tesis



Ing. Raúl Coello
Miembro Principal



Ing. Washington Martínez
Miembro Principal

A G R A D E C I M I E N T O

A todas las personas que me ayudaron durante mis estudios, y muy en especial al DR. JOSE MARIN que hizo posible la culminación de este trabajo, y a mi Hermano José que me facilitó su computador.

D E D I C A T O R I A

**A mis PADRES, quienes
incondicionalmente siempre
me brindaron todo su apoyo.**

R E S U M E N

La presente Tesis desarrolla el análisis de la estructura de un submarino de servicio turístico, diseñado para operar en las Islas Galapagos. Se emplea el Método de Elementos Finitos, MEF, en tres niveles: global, modular y local, utilizando el programa SAP80 ("Structural Analysis Program 80"), cuya librería incluye elementos cuadrilateros planos, longitudinales y sólidos. Se tuvo la limitante de no disponer elementos triangulares muy necesarios en la discretización de sistemas tridimensionales.

La estructura ha sido sometida a la carga crítica de destrucción (profundidad de 100 metros), y, a las fuerzas dinámicas de impacto, generadas por un golpe de la estructura con el fondo. La nave bajo estas condiciones, sufre un "aplastamiento vertical" debido a que las fuerzas netas de compresión verticales son mayores a las horizontales, por la forma no circular del casco resistente. Los mamparos transversales absorben este aplastamiento, presentándose la mayor deformación en los compartimientos entre mamparos con escotillas. Se ha llegado únicamente a determinar que el colapso en los mamparos se produce, a la profundidad de destrucción, debido a que la estructura se vuelve

inestable, al alcanzar la carga crítica de pandeo.

Del análisis modular, se concluye que el aplastamiento del forro se incrementa por el impacto, de tal forma que a la profundidad de destrucción, la ruptura se produce hacia el forro interior en la unión con las cuadernas. El análisis local muestra principalmente la influencia de los aligeramientos sobre la superficie de las cuadernas, los cuales disminuyen los esfuerzos compresivos del anillo, lo que afecta al forro interior.

INDICE GENERAL

	Pág
RESUMEN	VII
INDICE GENERAL.....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE TABLAS	XIII
INTRODUCCION.....	1
I. GENERALIDADES.....	4
1.1. Descripción de los elementos estructurales de un submarino.....	4
1.2. Fuerzas actuantes sobre la estructura de un submarino.....	11
1.3. Fallas típicas en la estructura de un submarino.....	12
1.4. Detalle estructural del submarino a analizar.....	15
II. ANALISIS GLOBAL DE LA ESTRUCTURA.....	19
2.1. Desarrollo del modelo.....	19
2.2. Cálculo de las cargas sobre la estructura.....	29
2.3. Discusión de resultados.....	42
III. ANALISIS MODULAR.....	57
3.1. Descripción de los módulos.....	57
3.2. Definin de las condiciones de trabajo.....	71
3.3. Comentario sobre los resultados.....	75
IV. ANALISIS LOCAL.....	94
4.1. Modelización de los elementos.....	94
4.2. Definin de las condiciones de frontera.....	107
4.3. Discusión de resultados.....	113
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	124
APENDICES.....	131
BIBLIOGRAFIA.....	143

INDICE DE FIGURAS

	Pág
FIGURA 1: Diferentes formas de la sección media...	6
FIGURA 2: Tipos de casco resistente de acuerdo a la posición de los tanques de lastre....	7
FIGURA 3: Tipos de mamparos transversales.....	9
FIGURA 4: Diferentes tipos de torreta.....	10
FIGURA 5: Fallas típicas en la estructura de un submarino.....	14
FIGURA 6: Modelo global.....	24
FIGURA 7: Detalle de la sección de proa.....	25
FIGURA 8: Detalle del cuerpo medio paralelo.....	27
FIGURA 9: Detalle de una cuaderna típica.....	28
FIGURA 10: Aplicación de las fuerzas estáticas en una sección típica.....	30
FIGURA 11: Generación de la fuerza de impacto.....	33
FIGURA 12: Distribución de pesos.....	37
FIGURA 13: Fuerza de impacto.....	40
FIGURA 14: Esfuerzo axial de la viga submarino.....	44
FIGURA 15: Cuerpo paralelo deformado.....	45
FIGURA 16: Cuaderna típica deformada.....	46
FIGURA 17: Niveles de esf. en una fibra del forro..	50
FIGURA 18: Efecto de las cargas sobre los mamparos.	52
FIGURA 19: Niveles de esfuerzo en un mamparo sin escotilla.....	53
FIGURA 20: Niveles de esfuerzo en un mamparo con escotilla.....	55

	Pág
FIGURA 21: Módulo 1 (Vista general).....	62
FIGURA 22: Módulo 1 (Vista frontal).....	63
FIGURA 23: Módulo 2 (Vista general).....	65
FIGURA 24: Detalle de la discretización de las ventanas.....	67
FIGURA 25: Detalle de la modelización de las ventanas.....	68
FIGURA 26: Detalle de los refuerzos y ventanas.....	69
FIGURA 27: Zonas y fibras del forro exterior a con- siderar para la trans. del impacto.....	77
FIGURA 28: Transmisión transversal del impacto.....	78
FIGURA 29: Efectos de la transmisión del impacto...	79
FIGURA 30: Transmisión global de la Fuerza de impacto.....	84
FIGURA 31: Mamparo con escotilla deformado.....	87
FIGURA 32: Niveles de esfuerzo en el mamparo con escotilla.....	88
FIGURA 33: Niveles de esfuerzo en una fibra del fo- rro que incluye una ventana.....	90
FIGURA 34: Esfuerzos críticos en una cuaderna entre ventanas.....	92
FIGURA 35: Elemento local 1 (vista general).....	97
FIGURA 36: Elemento local 1 (plano de la cuaderna).	99
FIGURA 37: Elemento local 2 (vista general).....	101
FIGURA 38: Elemento local 2 (plano de la vagra transversal).....	102
FIGURA 39: Elemento local 3 (vista general).....	104
FIGURA 40: Elemento local 3 (detalle de los ele- mentos constitutivos).....	105

	Pág
FIGURA 41: Consideraciones para establecer las restricciones de los elementos locales 1 y 3.....	108
FIGURA 42: Consideraciones para establecer las restricciones del elemento local 2.....	110
FIGURA 43: Elemento local 1 (Deformado).....	115
FIGURA 44: Niveles de esfuerzo sobre la cuaderna del elemento local 1.....	116
FIGURA 45: Elemento local 2 (Deformado).....	118
FIGURA 46: Niveles de esfuerzo sobre la base de Mbquinas.....	119
FIGURA 47: Elemento local 3 (Algunos elementos constitutivos deformados).....	121
FIGURA 48: Niveles de esfuerzo en la ventana.....	122
FIGURA 49: Direcciones locales usadas por los diferentes elementos del programa SAP80.....	132
FIGURA 50: Consideraciones sobre el modelo aproximado.....	135
FIGURA 51: Cblculo del ancho efectivo.....	137

INDICE DE TABLAS

	Pág
TABLA I: Dimensiones principales.....	15
TABLA 11: Dimensiones estructurales.....	16
TABLA 111: Distribucidn de pesos (en inmersión)...	36

INTRODUCCION

En Ingenieria Naval, una de las herramientas más útiles para el análisis de estructuras tridimensionales es el Método de Elementos Finitos, MEF. Con la posibilidad futura de que nuestros astilleros desarrollen la construcción de nuevos diseños, como submarinos turísticos por ejemplo, los métodos clásicos resultarían insuficientes debido a la complejidad de las formas estructurales empleadas. Esta deficiencia, fácilmente la superaría el uso del MEF, aún no muy usado extensamente en nuestro medio. De manera que, como primer objetivo, la difusión del uso de este método es altamente justificable.

El MEF toma la ecuación diferencial que modela matemáticamente una estructura cualquiera, la discretiza y la convierte en un sistema de ecuaciones algebraicas. La solución de este sistema produce las deformaciones del sistema discretizado, y a través de las derivadas de las relaciones asumidas para la función deformación, estima los esfuerzos. Con estos resultados se puede comprobar si el diseño de la estructura es el más adecuado, o si responderá satisfactoriamente a las condiciones de trabajo reales.

La presente Tesis propone desarrollar el análisis de la estructura de un submarino empleando el método de Elementos Finitos. Para este fin se utiliza la estructura de un submarino de servicio turístico, diseñado a nivel preliminar para operar en las Islas Galdpagos, [9]. Está compuesta su estructura básicamente por un forro exterior calculado para resistir hasta un promedio de 100 metros de profundidad. El análisis propuesto se desarrollará en tres niveles, [6], como se explica a continuación:

i) El análisis global, que es un estudio de la estructura completa a nivel primario. Se consideran todas las partes estructurales para la aplicación de las siguientes cargas: Presión hidrostática y golpes con el fondo.

ii) Modular, donde se plantean módulos o bloques definidos por casco y cuadernas, o cuadernas y mamparos, entre otros. De acuerdo a las condiciones de frontera y a las cargas aplicadas, se obtiene una definición de esfuerzos más específica de la zona estructural escogida.

iii) Y, local, que es básicamente el estudio de una

consola o un refuerzo entre otros. Estos se consideran como zonas de concentración de esfuerzos, siendo lo más importante la deducción de los tipos de apoyos (Condiciones de frontera) a considerar.

Para el análisis propuesto, se emplea el programa: SAP80 ("Structural Analysis Program 80"), [10]. Dicho programa dispone de elementos "FRAME" o vigas, elementos, "QUAD" o planchas, y "SOLID" o sólidos, para ser usados en la modelización del sistema.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. Descripción de los elementos estructurales de un submarino.

Los submarinos poseen una estructura similar a los buques. Su estructura incluye partes como: doblefondo, mamparos, escuadras, refuerzos longitudinales, quilla interior, cuadernas, superestructura o torreta, y forro exterior. Sin embargo se deben considerar diferencias básicas en el diseño, como se describe a continuación.

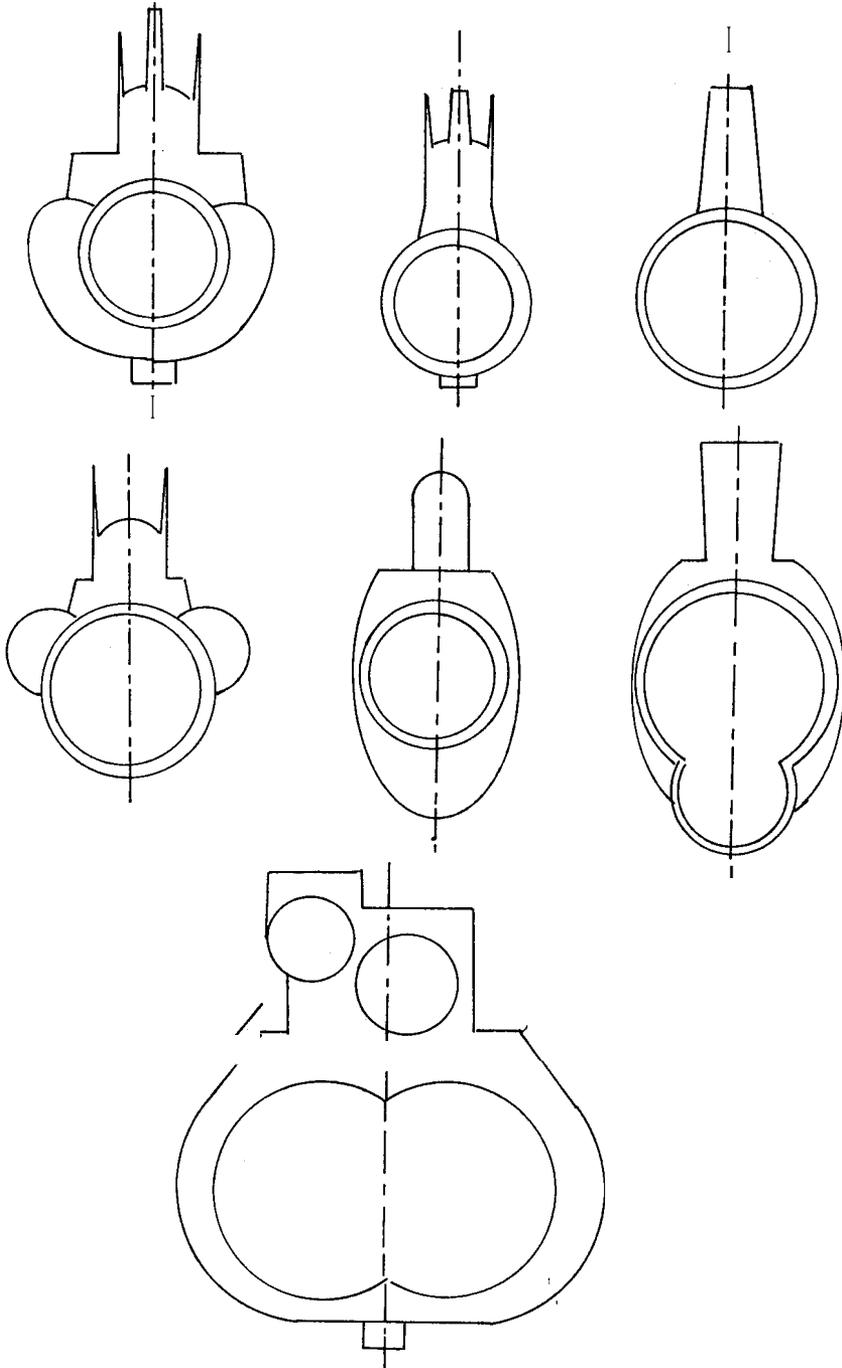
El casco resistente o forro exterior, que es la envoltura exterior de la nave, proporciona toda la estanqueidad, y absorbe casi la totalidad de los esfuerzos durante las condiciones de operación, [5]. Este elemento por regla general tiene forma cilíndrica en su sección media, véase Figura 1, y, cónica o de bulbo en sus extremos de proa y popa. Cabe resaltar que los tanques de lastre o de inmersión pueden situarse

tanto en el interior, como en el exterior del casco resistente, como se muestra en la Figura 2.

De acuerdo a la forma de construcción del forro, se puede diferenciar entre submarinos unicasco y doble casco. Si tienen una envoltura única que absorbe un gran porcentaje de los esfuerzos, se considera unicasco o de un solo casco; los submarinos con doble casco son lo que poseen aparte del casco resistente, un forro interior que contribuye en buena forma a resistir los esfuerzos generados durante las condiciones de operación.

Generalmente los submarinos de forma cilíndrica poseen una cubierta angosta no estanca, sobre el casco resistente para circulación del personal. Se considera no estanca porque los espacios entre el casco y la cubierta son espacios de inundación libre. Siendo un espacio de inundación libre, "aquel espacio dentro de la carena que no es estanca y donde el agua puede circular libremente", [5].

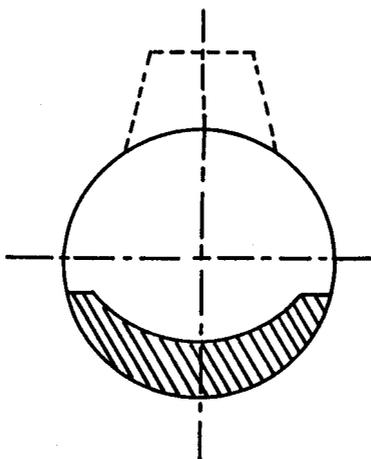
**DIFERENTES FORMAS DE
LA SECCION MEDIA**



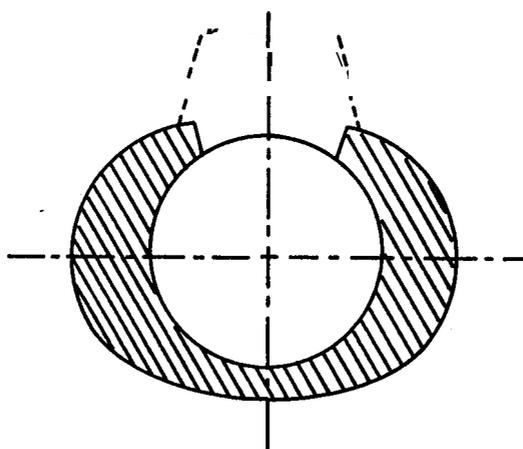
FIG, No.1

(Referencia 5)

TIPOS DE CASCO RESISTENTE DE ACUERDO
A LA POSICION DE LOS TANQUES DE LASTRE



Unicasco



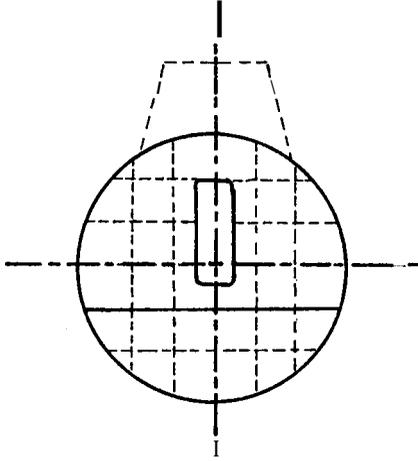
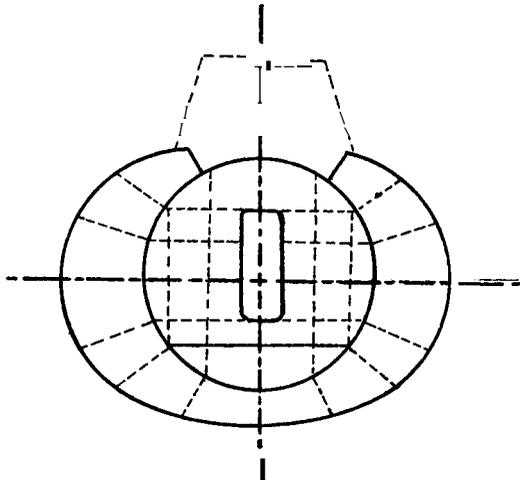
Doblecasco

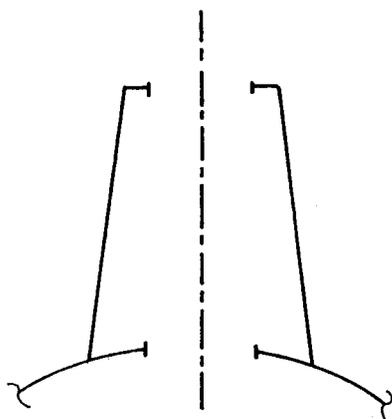
//// Volumen de
lastre

En cuanto a los mamparos transversales, Figura 3, están diseñados para resistir la presión de destrucción exterior, para la que se diseñó el casco resistente del submarino. Esto se debe a que al darse una condición de emergencia por inundación de un compartimiento, soportarán los mamparos la presión exterior del mar.

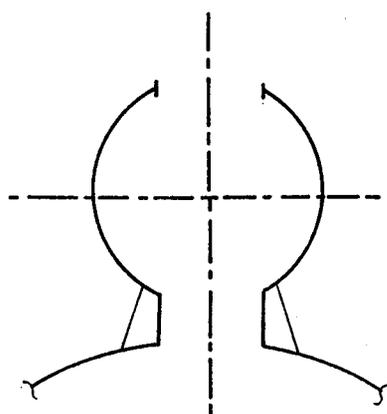
Los mamparos más esenciales son los de colisión, y estancos de proa y popa. Los demás mamparos compartimentan el submarino, teniendo entre estos, los mamparos de sala de máquinas y cuarto de escape.

La superestructura es conocida con el nombre de Torreta, y su finalidad es "permitir la salida seca de los tripulantes, debido al escaso francobordo del submarino en superficie", [5]. En la cubierta de la torreta se encuentra la escotilla superior, y entre el casco resistente y la misma, está la escotilla central. En los submarinos pequeños la torreta es de forma elíptica, y en los grandes, generalmente es construida de un cilindro horizontal, como se muestra en la Figura 4.

TIPOS DE MAMPAROS TRANSVERSALES**Unicasco****Doblecasco**

DIFERENTES TIPOS DE TORRETA

**Torreta de
dos chapas**



**Torreta de
cilindro
horizontal**

FALLAS TÍPICAS EN LA ESTRUCTURA DE UN SUBMARINO

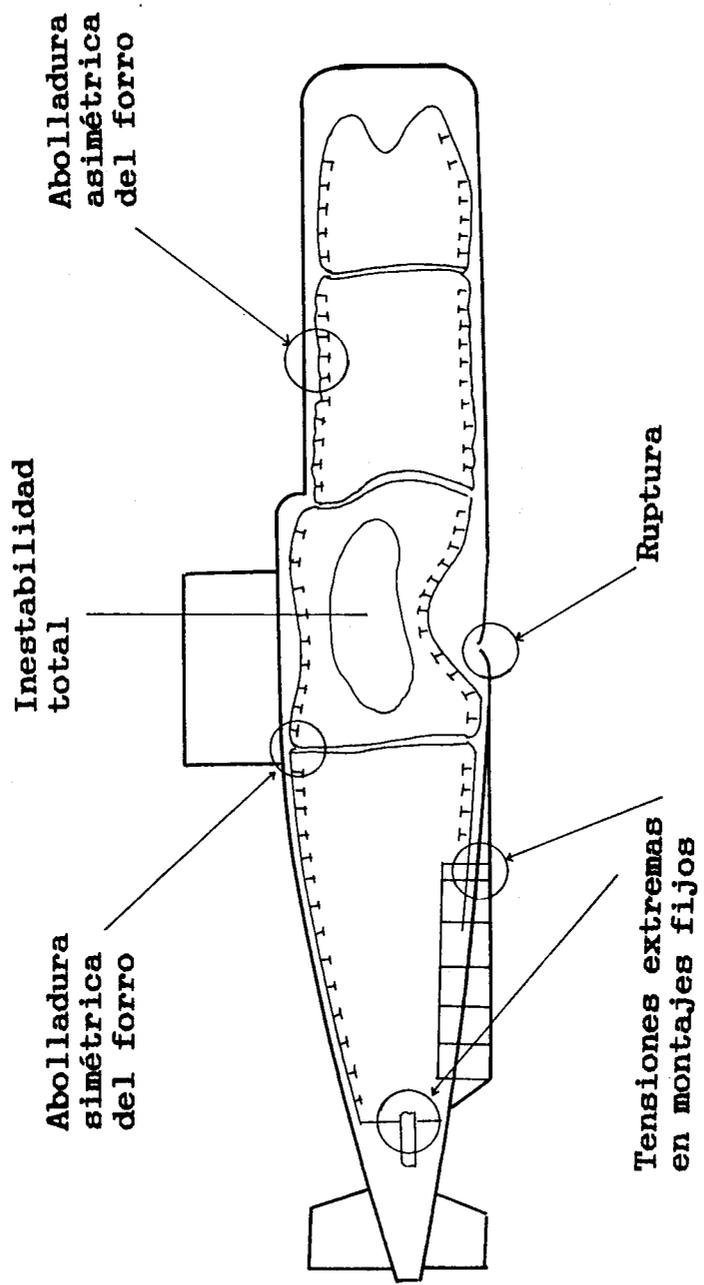


FIG. No.5

(Referencia 5)

1.2. Fuerzas actuantes sobre la estructura de un submarino.

Para el diseño de un submarino, se deben considerar dos principales fuerzas actuantes durante su operación:

i) La presión del mar, debida al peso de la columna de agua sobre el cuerpo sumergido. La profundidad de inmersión es una premisa esencial en la construcción de un submarino, y es principalmente el casco resistente el que absorbe la presión exterior del mar. Su cálculo se debe hacer para una presión de destrucción, [5], que es básicamente la profundidad a la que va a fallar la estructura. Se considera la misma como un factor de seguridad, de acuerdo a la profundidad que debe operar la nave.

ii) Las cargas que resultan de los golpes con el fondo, muy importantes en el presente caso, debido a que deben navegar en aguas poco profundas, por lo tanto expuestos a mayor peligro de colisionar con las irregularidades del fondo marino durante la inmersión.

Para su cálculo, se debe considerar la cantidad de movimiento que tiene la nave antes y después del golpe para de allí estimar la fuerza de impacto. Hay que

tomar en cuenta en estos cálculos, que debido al movimiento del submarino, se producen aceleraciones inerciales de la masa del conjunto estructural, (Ver 2.2).

1.3. Fallas típicas en la estructura de un submarino.

Las fuerzas actuantes sobre el casco resistente a la mayor profundidad de diseño son extraordinariamente grandes produciéndose daños irreversibles en la estructura, o la destrucción del mismo", [5]. Este es el principio que se considera para establecer la profundidad de destrucción. Entre las fallas típicas debidas a esta condición encontramos: La primera se presenta cuando el forro es presionado más allá del límite elástico, dando lugar a que el mismo se encoja entre las cuadernas produciéndose una flexión local. Para evitar este **tipo** de abolladura se disponen cuadernas transversales a muy corta distancia entre sí. Generalmente este problema se produce entre las uniones del mamparo con el casco resistente, como se presenta en la Figura 5.

La segunda falla más común, es "la abolladura asimétrica del forro, producida al comprimirse el casco resistente", [5]. La presión normal hace que el forro

se abolle sinuosamente entre las cuadernas y se produzcan ondulaciones hacia afuera y hacia adentro, sin embargo, debido a la presión, las abolladuras hacia afuera son contenidas en el transcurso de la deformación dando lugar a la forma asimétrica, (Figura 5).

La tercera forma de falla ocurre cuando se dobla la estructura, es decir el forro con las cuadernas en toda su longitud se deforman. Si existen mamparos transversales o bulócamas se doblan dando lugar a una inestabilidad del conjunto estructural, mostrada en la Figura 5. En un casco resistente construido para una presión de destrucción, "Comienza el daño al encogerse el forro entre las cuadernas, después se forman las abolladuras entre las cuadernas y finalmente se produce la ruptura entre mamparos".

Cabe mencionar que se producen otros tipos de fallas en la estructura, así las tensiones extremas en montajes fijos generalmente en la base de máquinas, [5]. Todos estos tipos de fallas se muestran en la Figura 5.

1.4. Detalle estructural del submarino a analizar.

En la presente tesis, se va a proceder a analizar la estructura del submarino turístico CETACEO, [9], que presenta las siguientes dimensiones principales:

DIMENSIONES PRINCIPALES

Eslora total	21.9	m.
Eslora entre perpendiculares	20.0	
Manga moldeada	3.0	
Puntal moldeado	2.4	
Puntal en la superestructura	3.5	
Calado en superficie	2.0	
Desplazamiento en superficie	95.0	ton.
Desplazamiento en inmersión	106.7	
Capacidad de pasajeros	36	P.
Potencia a diesel (SHP)	215	HP
Potencia eléctrica (SHP)	100	
Velocidad de diseño en superficie	10	Nudos
Velocidad de diseño en inmersión	5	
Tiempo máximo de inmersión	2.0	Horas

TABLA I

El diseño fue desarrollado para operar en las Islas Galápagos a una profundidad media de 50 metros. La profundidad de destrucción, con un factor de seguridad de 2.0, [5], se ha tomado de 100 metros de profundidad.

Su estructura, descrita en el plano 1, es de tipo unicasco. Posee doblefondo y forro interior para los tanques de lastre, con el dobleforro soportado por las

cuadernas y los mamparos transversales. En la Tabla II se presenta un resumen de los escantillones de la embarcación mencionada.

DIMENSIONES ESTRUCTURALES

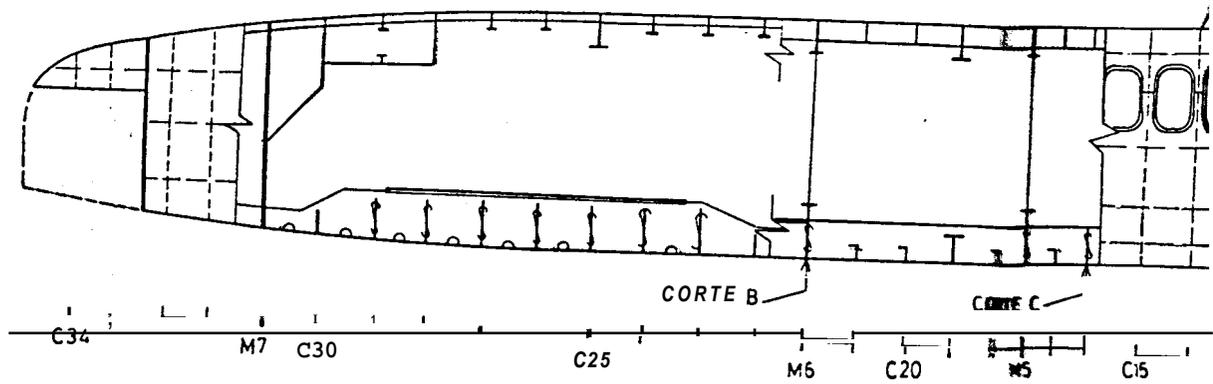
Forro exterior	12.0	mm.
Cuadernas	150x6	
Vagras	5.0	
Longitudinales del casco	60x30x4	
Mamparos transversales	12.0	
Ref. vertical de los mamp.trans.	60x30x4	
Espaciamiento entre ref.vert.mamp.	360.0	
Ref. horiz. de los mamp.trans.	40x20x4	
Espaciamiento entre ref.horiz.mamp.	360.0	
Doblefondo	5.0	
Longitudinales de doblefondo	30x4	
Transversales de doblefondo	40x20x4	
Quilla	10.0	
Forro interior	3.0	
Forro de torreta	12.0	
Espaciamiento entre cuadernas	550.0	
Espaciamiento entre longitudinales	600.0	

TABLA II

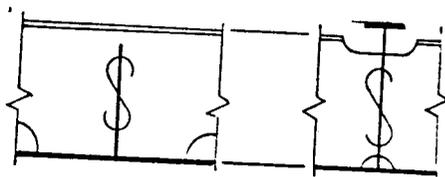
Del plano 1, se puede observar que la estructura posee 7 mamparos transversales: Colisión de proa y popa, división del bulbo, proa y popa de sala de maquinas, y divisiones del compartimiento de pasajeros. El doblefondo se encuentra en los compartimientos de pasajeros y la sala de maquinas, apoyado en las vagras transversales, la quilla y los miembros longitudinales.

El compartimiento de operación o sala de

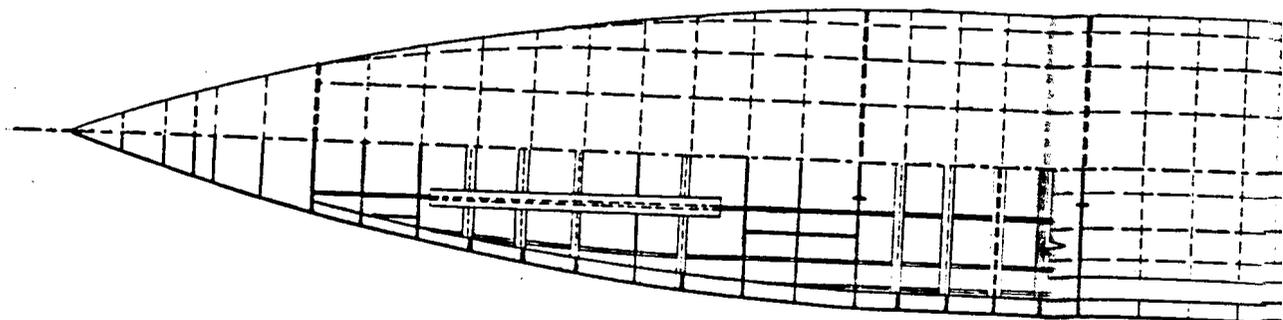
navegación, no posee doble fondo, compensado por un incremento en el escantillonado de los longitudinales. Dicha disposición es para permitir un mayor espacio para la instalación de los equipos de navegación. Cabe destacar la presencia de las ventanas para observación, las cuales están dispuestas en los costados del compartimiento de pasajeros. Estas se encuentran empotradas en el casco resistente, y apoyadas en el dobleforro, para absorber la compresión del forro exterior.



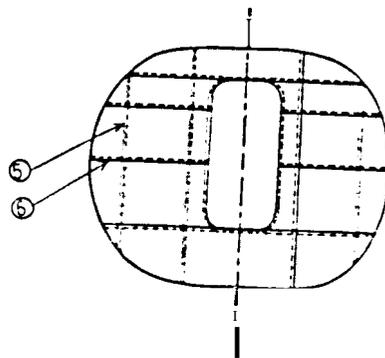
VISTA LONGITUDINAL



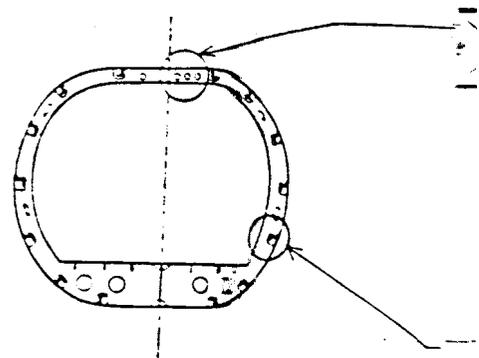
DETALLE DE LA
BASE DE MAQUINAS



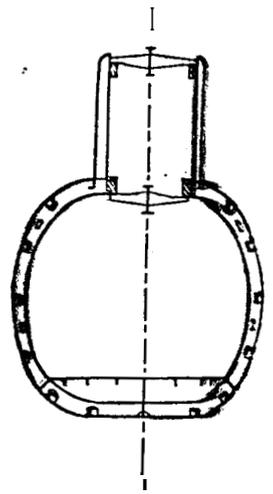
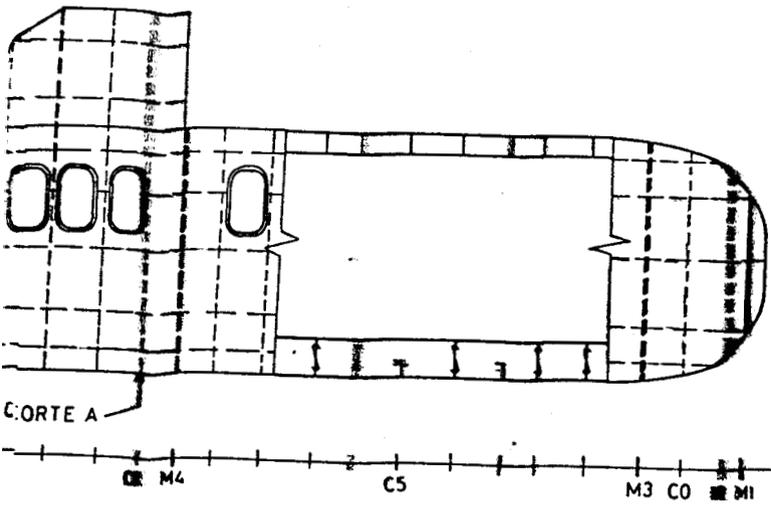
VISTA DE PLAN



CORTE B

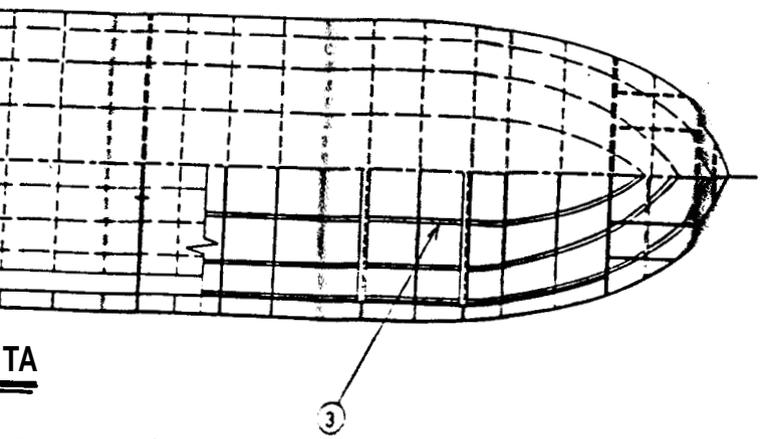
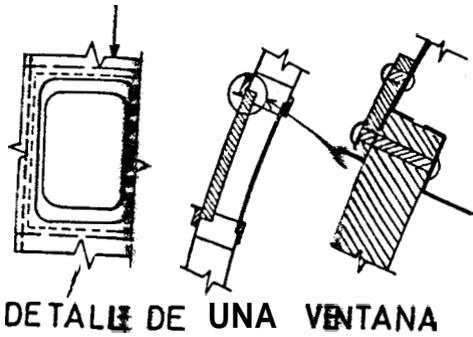


CORTE C



CORTE A

DINAL



- ① FIBRO EXTERIOR 12 mm
- ② CORDERNAS 150x6 mm
- ③ LONG. DEL CASCO 60x304 mm
- ④ MAMP. TRANSVERSALES 8mm
- ⑤ REF. VERT. MAMP. 60x304 mm
- ⑥ REE. HORIZ. MAMP. 40x204 mm
- ⑦ DOB. FONDO 5mm
- ⑧ LONG. DE. DF. 30x4 mm
- ⑨ TRMS. DE. DF. 40x20x4 mm
- ⑩ QUINA 10 mm
- ⑪ FONDO INTERIOR 3mm

TA



		S/I T CETACEO	
1:50	PLAN ESTRUCTURAL		

CAPITULO II

ANALISIS GLOBAL DE LA ESTRUCTURA

Para poder efectuar un estudio lo más completo posible de la estructura del submarino, es necesario empezar el análisis del conjunto global, haata considerar las regiones locales donde se producen concentraciones de esfuerzos. El andlisis de toda la estructura es el que se va a desarrollar en este capítulo 11, considerando las cargas globales que actúan sobre el submarino. Con estos resultados obtendremos una mejor idea sobre los conjuntos particulares (Módulos y elementos locales) que deberán de analizarse, y discutir su comportamiento con mayor detalle en los poateriores capitulos.

2.1. Desarrollo del modelo.-

En el análisis global, se considera la estructura completa del submarino turistico (ver plano estructural), a ser modelados con elementos finitos. En

la confección del modelo, se generará un archivo de datos para ser leído por el programa SAP80. Se presenta una mejor descripción del programa SAP80 en el apéndice 1 y en las referencias [10] y [11].

En primera instancia se debe definir el sistema de referencia global de la estructura, tomado de la siguiente forma: X , en dirección popa-proa; Z vertical, y Y lateral de acuerdo a la regla de la mano derecha. Con estas direcciones, en cuanto a la confección del modelo, se convino lo siguiente:

i) Definición de los elementos viga.-

En la formación del modelo se ha empleado elementos "FRAME", que se denominarán elementos viga. Son básicamente miembros estructurales largos, que resistan flexión en los dos planos, torsión y carga axial. En cada uno de ellos se definirán los ejes locales, [10], que servirán para establecer las direcciones y sentidos de los esfuerzos locales en el análisis de resultados.

En el cálculo de las inercias de las secciones, se ha considerado el ancho efectivo, $C31$, de la plancha que va a ser rigidizada por el refuerzo. El cálculo de esta

influencia se realizó de la forma mostrada en el Apéndice 2. En el mismo, se pretende modelar el dobleforro y la cuaderna como una viga empotrada de canto en el casco resistente. Del cálculo se tiene un ancho de plancha efectivo, que trabaja al igual que si se modelara el dobleforro con elementos plancha. Esta simplificación, realizada también con los demás elementos, ahorra tiempo computacional y número de nodos en el modelo.

Se han considerado como elementos viga en el modelo global, a los siguientes miembros de la estructura:

- Cuadernas del casco resistente.
- Longitudinales del casco resistente.
- Refuerzos transversales del doble fondo.
- Refuerzos longitudinales del doble fondo.
- Quilla en el compartimiento de operaciones.
- Refuerzos de los mamparos.
- Refuerzos en la torreta.
- Puntales.

ii) Definición de los elementos plancha.-

Elemento plancha, es el nombre adoptado como traducción de "QUAD". Estos son elementos planos definidos por 4 nodos, que pueden soportar flexión y

efecto de membrana, [10], esto es, cargas en el plano.

Para la modelización de los elementos plancha, se han definido como tales las siguientes partes estructurales:

- Casco resistente.
- Doblefondo de máquinas y compartimiento de operaciones.
- Mamparos transversales, con las correspondientes aberturas de las escotillas.
- Mamparo longitudinal del bulbo de proa.
- Mamparo horizontal del bulbo de proa.
- Torrete.
- Vagras transversales.
- Quilla que soporta el doblefondo.
- Ventanas, definiéndolas como una plancha del material correspondiente al diseño, [9].

Se debe resaltar que los elementos plancha deben tener sus 4 nodos de definición en un mismo plano en el espacio, consideración que en muchos casos no se cumple en el modelo y puede ser fuente de error en los resultados. Así mismo, la razón de aspecto no debe alejarse de 1.0 (cuadrado), para evitar errores numéricos, [4].

Como última consideración, para la confección del modelo, se incluirá solo la mitad longitudinal del submarino, debido a las condiciones de simetría de la estructura y las cargas. Con todo esto, en la confección del modelo resultaron los siguientes totales:

484 nodos.

582 elementos viga.

461 elementos plancha,

que está dentro de los números limitantes del programa, "71, [10].

El modelo global, con todas estas consideraciones, se muestra en la Figura 6, donde se puede observar todas sus partes constitutivas como casco, mamparos, torreta y doblefondo. En la Figura 7, se tiene un detalle de la sección de proa. En 61 se destaca el mamparo del compartimiento de pasajeros, el mamparo longitudinal, y el mamparo de colisión. Se puede apreciar que algunos elementos plancha no tienen sus cuatro extremos en un mismo plano, siendo posible fuente de error.

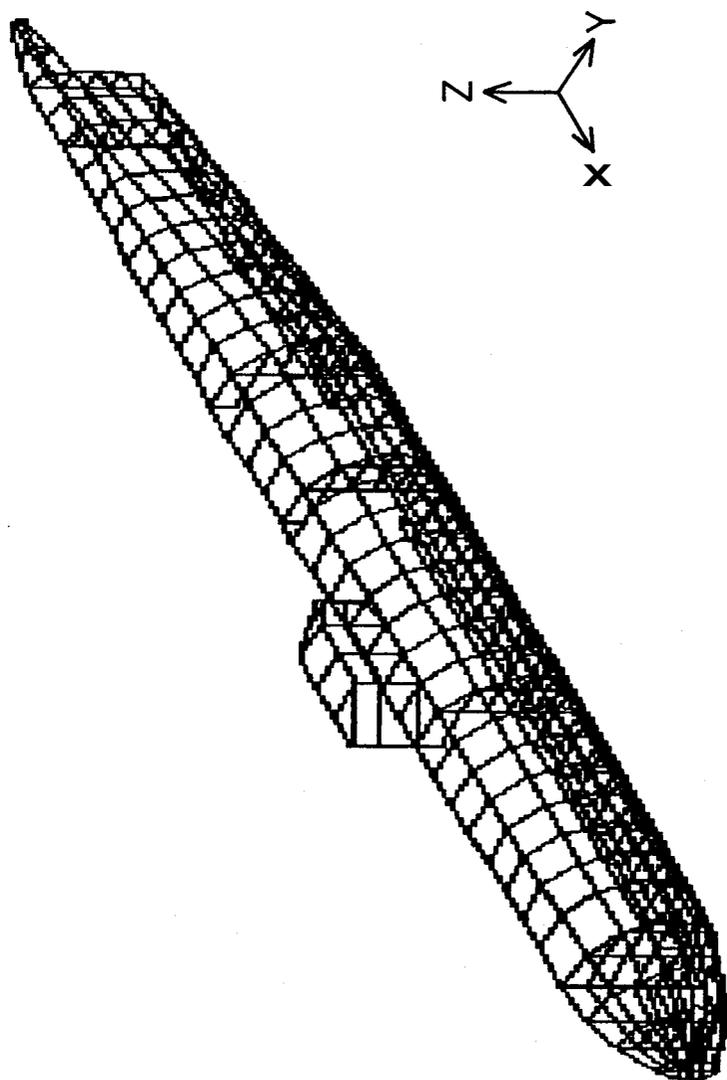


FIG. No.6 Modelo Global

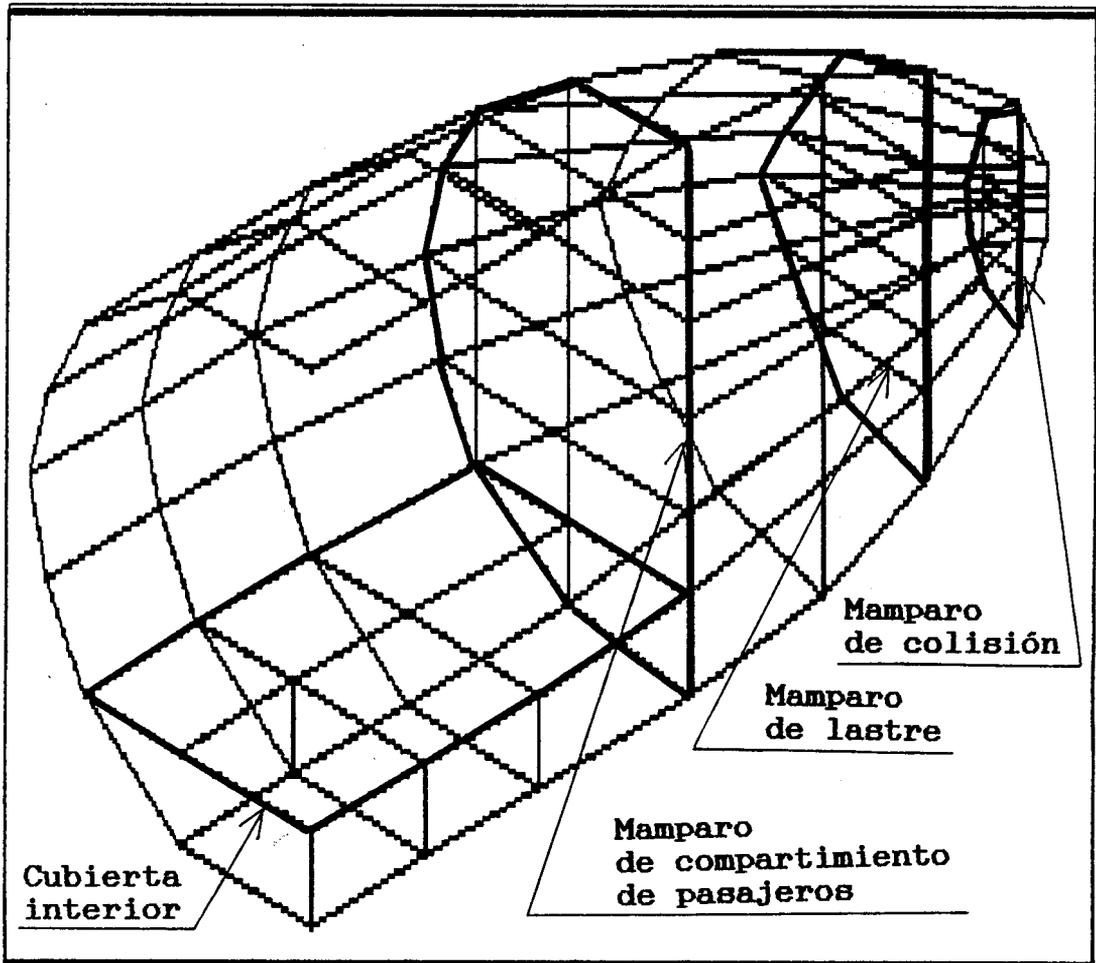


FIG. No.7 Detalle de la sección de proa

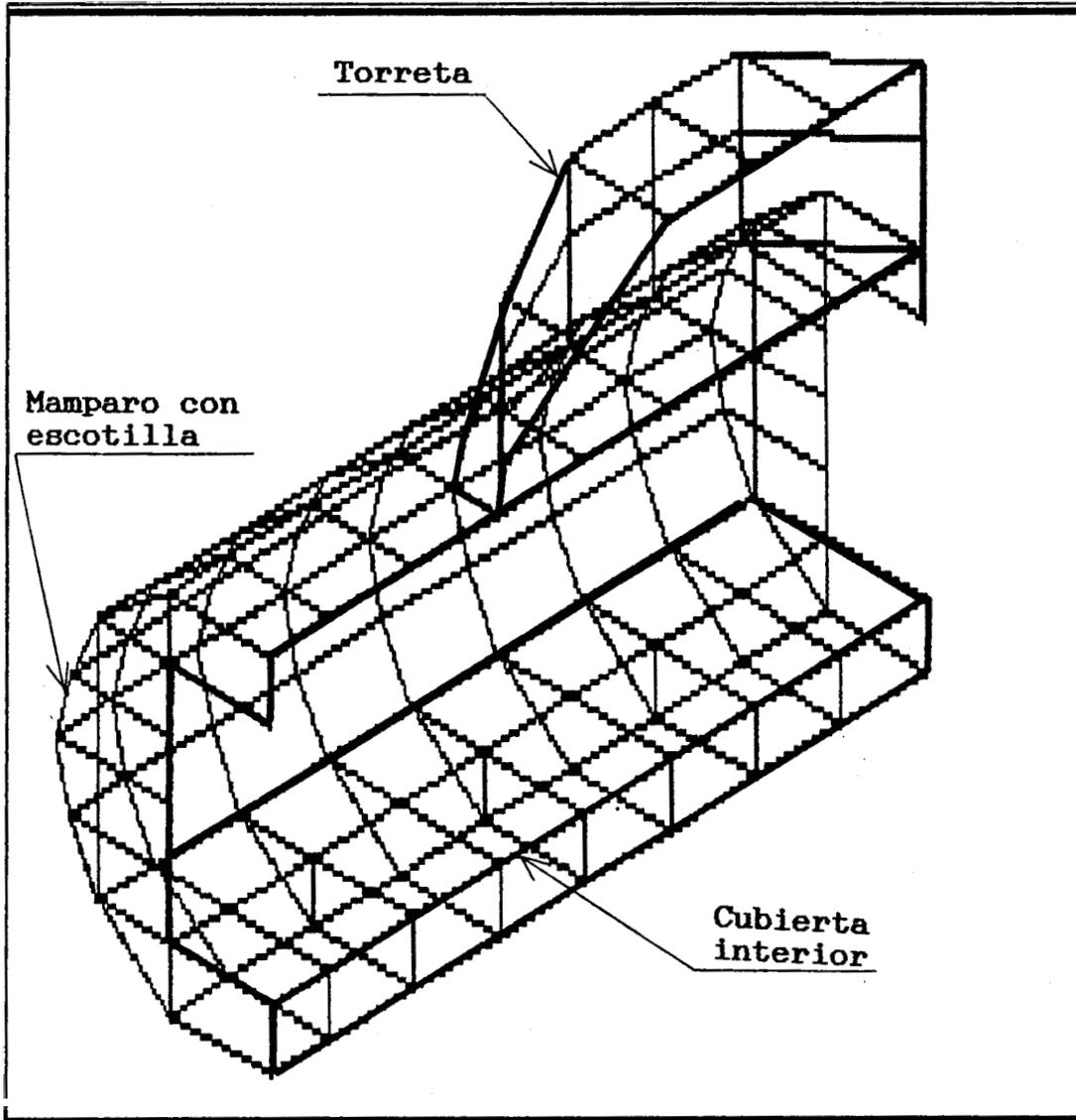


FIG. No.8 Detalle del cuerpo medio paralelo

En otro detalle, Figura 8, observamos más claramente el cuerpo medio paralelo y la torreta. En la torreta se aprecia una falla en su parte superior, debido a que no existen elementos triangulares en el menú del programa SAP80.

Finalmente en la Figura 9, se destaca una cuaderna típica con sus elementos viga, y la vagra transversal modelada con elementos plancha. Se presenta en éste el problema mencionado anteriormente por la inexistencia de elementos triangulares.

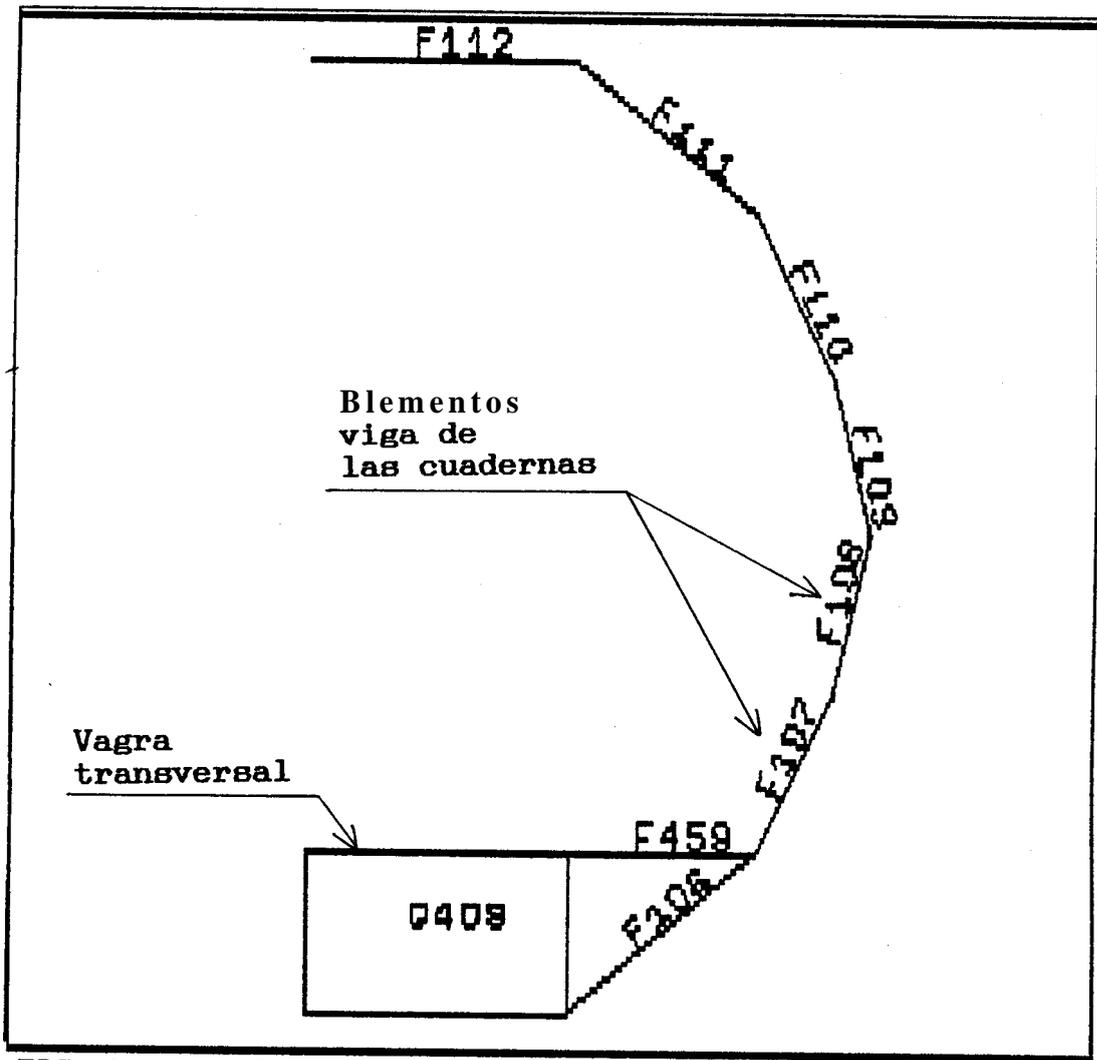


FIG. No.9 Detalle de una cuaderna típica

2.2. Cálculo de las cargas sobre la estructura.

La estructura del submarino ha sido diseñada esencialmente para soportar la presión hidrostática del agua de mar, por lo tanto, es esta la primera condición de trabajo que debe considerarse. Sin embargo, debido al fin para el que fue construido, navegar en aguas no muy profundas, la estructura está también sujeta a otros tipos de cargas. En la presente tesis, se va considerar una de estas cargas: los golpes con el fondo, que son básicamente una fuerza de impacto sobre el conjunto global que deformará la estructura y le producirá concentración de esfuerzos. **Los cálculos** desarrollados fueron los siguientes:

1) Determinación de las cargas estáticas.-

Para determinar las cargas estáticas, se considera en primera instancia la presión hidrostática del mar. Para dicho efecto se ha aplicado en la estructura una presión de destrucción de una altura de 100 m de agua, que representa un factor de seguridad en el dimensionamiento estructural, [9]. Esta presión va a ser aplicada como carga uniformemente distribuida, sobre cada uno de los elementos plancha del casco resistente, como vemos en la Figura 10.

De acuerdo a la distribución de boyantez alrededor

APLICACION DE LAS FUERZAS ESTATICAS EN UNA
SECCION TIPICA

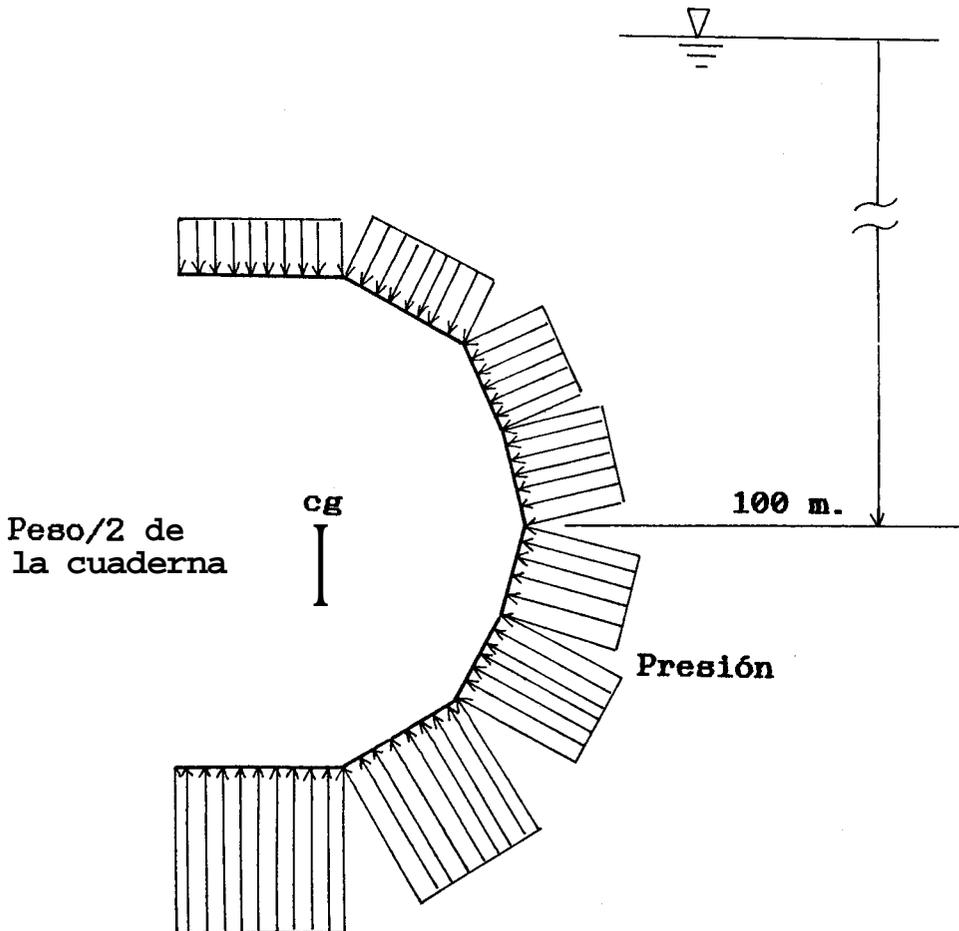


FIG. No.10

del casco, se produce una carga neta, que llamaremos ΔB , la cual debe ser compensada por el peso de la estructura W , que viene a ser la segunda carga estática a considerar en la estructura, (Figura 10), de tal forma que se cumpla que:

$$\Delta B - W = 0$$

Y esta primera premisa satisface la condición estática del problema.

ii) Cargas por golpes con el fondo.-

Al problema de la compresión del casco, se le incluye una fuerza externa por el golpe de la nave con el fondo marino. Esta influencia es básicamente dinámica, y está dada por la aceleración que experimenta el cuerpo durante el impacto. Esta cantidad de movimiento genera una fuerza de golpe sobre la estructura, que debe ser absorbida por los refuerzos y el planchaje de la nave.

Para establecer esta condición de trabajo, se sigue el procedimiento que vemos en la Figura 11. Este considera al submarino como un sistema dinámico donde se calcula el valor de la fuerza de impacto mediante el Principio de impulso y cantidad de movimiento.

Partiendo de este principio se tiene que:

$$\mathbf{C.m.i + Imp. = C.m.f}$$

donde :

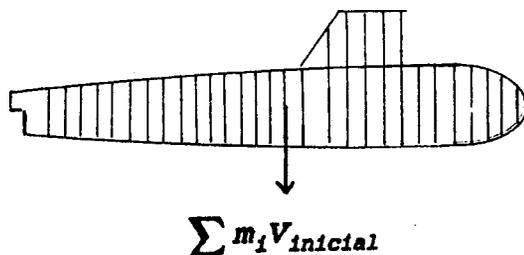
C.m.i : Cantidad de movimiento inicial del cuerpo rigido.

Imp. : Impulso producido por el impacto.

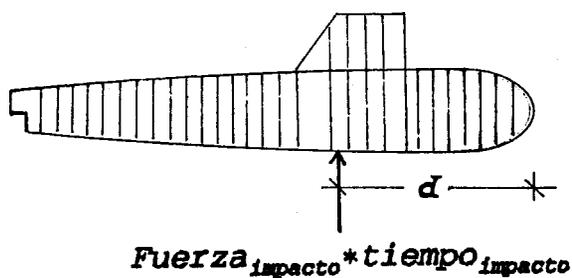
C.m.f: Cantidad de movimiento final.

GENERACION DE LA FUERZA DE IMPACTO
(Condición dinámica del problema)

(a) Cantidad de movimiento inicial:



(b) Impacto ($v/\Delta t = \text{aceleración}$):



(c) Cantidad de movimiento final:

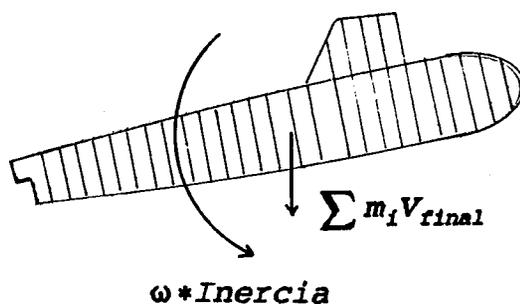


FIG. No.11

La cantidad de movimiento inicial (Figura 11-a), está dada por la velocidad v vertical hacia abajo que tiene la masa de cada sección antes del impacto. El submarino colisiona con el fondo (Figura 11.b), y recibe una fuerza F de impacto vertical hacia arriba, aplicada a una distancia d desde proa. Este impacto se dá durante un tiempo Δt (seg) muy pequeño, donde la velocidad v y el tiempo se relacionan en la forma $v/\Delta t$, dando lugar a la influencia de la aceleración del sistema en el instante del golpe. Finalmente, Figura 11.c, luego del golpe el submarino experimenta una rotación con respecto al punto de impacto, produciéndose la cantidad de movimiento final en el sistema. Participa en este momento, la inercia de cada sección como influencia en el movimiento final.

Desarrollando una sumatoria de fuerzas verticales, y sumatoria de momentos respecto a proa, se obtiene la expresión matemática (1) que es la fórmula de la fuerza de impacto sobre la estructura:

$$F = \frac{V}{\Delta t} * [\sum m_i - ((\sum m_i d_i)^2 / \sum m_i d_i^2)] \quad (1)$$

donde :

- F: Fuerza de impacto en Kilogramos.
- V: Velocidad vertical del submarino en metros/segundos.
- At: Tiempo de duración del impacto en segundos.
- m: Masa total de una estación en kilogramos.
- d: Distancia desde proa donde se aplica la fuerza de impacto en metros.
- i: subíndice indicativo de la i cuerdas de la estructura.

Esta fórmula en el modelo global, es equivalente a considerar al modelo como un cuerpo rígido restringido en sus tres direcciones, aplicada una fuerza igual a la fuerza de impacto más las cargas dinámicas producidas por el movimiento de la estructura.

Para aplicar los valores de la masa en la fórmula (1), se ha considerado la mitad de la distribución de pesos. Los valores empleados en los cálculos, se

muestran en la tabla 111, tomada de la referencia [9]. Con estos valores se puede proceder a graficar la distribución de pesos versus las cuadernas consideradas en el modelo global, como se muestra en la Figura 12.

Est. Item:	Peso(ton)
AP-0 Estructura, lastre, aire, maquinillas.	8.99
0-1 Estructura, lastre, aire, acondicionam. de pasajeros, tanques de oxígeno, tuberías,	10.80
1-2 " " " "	10.98
2-3 " " " "	10.48
3-4 Estructura, torreta, lastre, aire, acondic. de pasajeros, tanque de AA.SS y AA.PP.	12.22
4-5 Estructura, lastre, aire, tuberías, tanques de oxígeno y acond.	8.32
5-6 Estructura, aire, tuberías, baterías, equipo de navegación.	8.75
6-7 Estructura, tanques de aceite, combustible, aire y oxígeno; compresores, tubería.	8.17
7-8 Estructura, motor a diesel, lastre, tanques de oxígeno, extintores.	9.99
8-9 Estructura, motor eléctrico, lastre, paneles eléctricos.	9.27
9-FP Estructura, tanque de aceite, diario, pala, eje, hélice, servo motor, prensa.	8.37
TOTAL	106.34

TABLA III

Cabe mencionar, que los **pesos** mostrados corresponden a la condición de inmersión, con las siguientes características:

- Tanques de lastre llenos.
- Tanques de combustible al 85% de contenido.

DISTRIBUCION DE PESOS

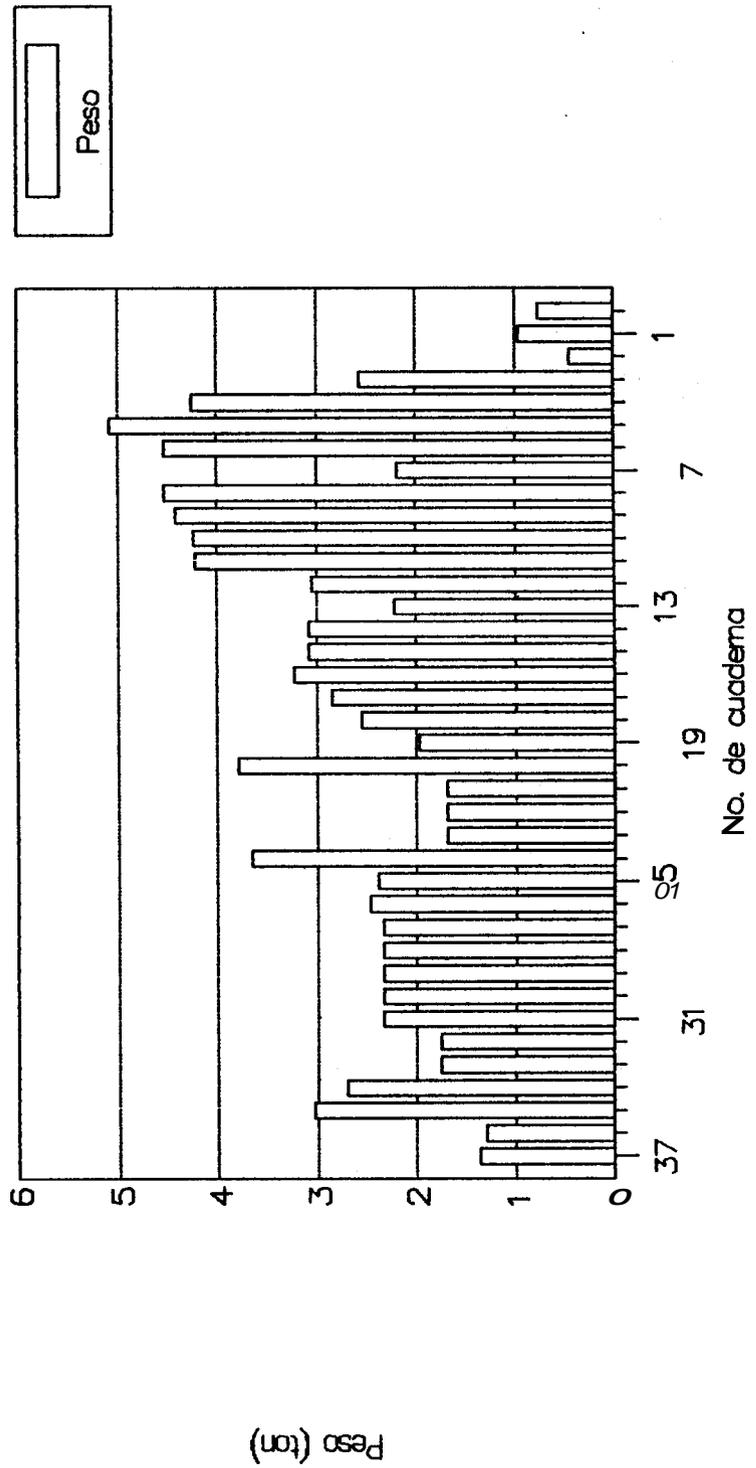


FIG. No. 12

Con la expresión (1), para buscar una condición crítica de la fuerza de impacto, lo más cercano a la real, se propone la Figura 13. En dicha figura se han considerado diferentes tiempos de impacto, para una velocidad vertical en largada de **0.25 m/seg**. Se ha tomado **0.25 m/seg**, debido a que el movimiento ondulatorio del submarino en navegación produce una velocidad alrededor del **4%** de la velocidad de inmersión, [9].

Como se puede observar en la Figura 13, la fuerza de impacto es máxima hacia los **10** metros de distancia con respecto a proa, por efecto de la inercia de masas que tienen su mayor braxo en los extremos. **Los** valores calculados son aceptables considerando que se debe incluir la aceleración que se produce sobre el sistema luego del impacto.

Con todas las cargas estimadas, se ingresaron los datos al archivo de datos de **SAP80** de la siguiente forma:

- La mitad de la fuerza de impacto a un tiempo de impacto promedio de **0.010** seg, se considera como una carga concentrada en un nodo de crujía. Este nodo se localiza en la parte inferior del casco resistente, en

la cuaderna 22 situada 10.1 metros de proa.

- La presión hidrostática como carga distribuida normal sobre cada uno de los elementos plancha del forro exterior, con la distribución mostrada en la Figura 10.
- Los pesos de la estructura se han considerado como carga concentrada en los nodos, sumado el incremento por la aceleración del sistema. Para obtener estos valores se afecta la masa del sistema de acuerdo a los siguientes datos: velocidad vertical de la nave de 0.25 m/seg, y un tiempo de impacto promedio de 0.010 seg. De esto se obtiene:

Aceleración por impacto $v / \Delta t =$	25 m/seg ²
Aceleración de la gravedad =	9.81 m/seg ²
Aceleración total del sistema =	<div style="border-top: 1px solid black; display: inline-block; width: 100%;"></div> 34.81 m/seg ²

FUERZA DE IMPACTO

Golpe a diferentes tiempos de impacto

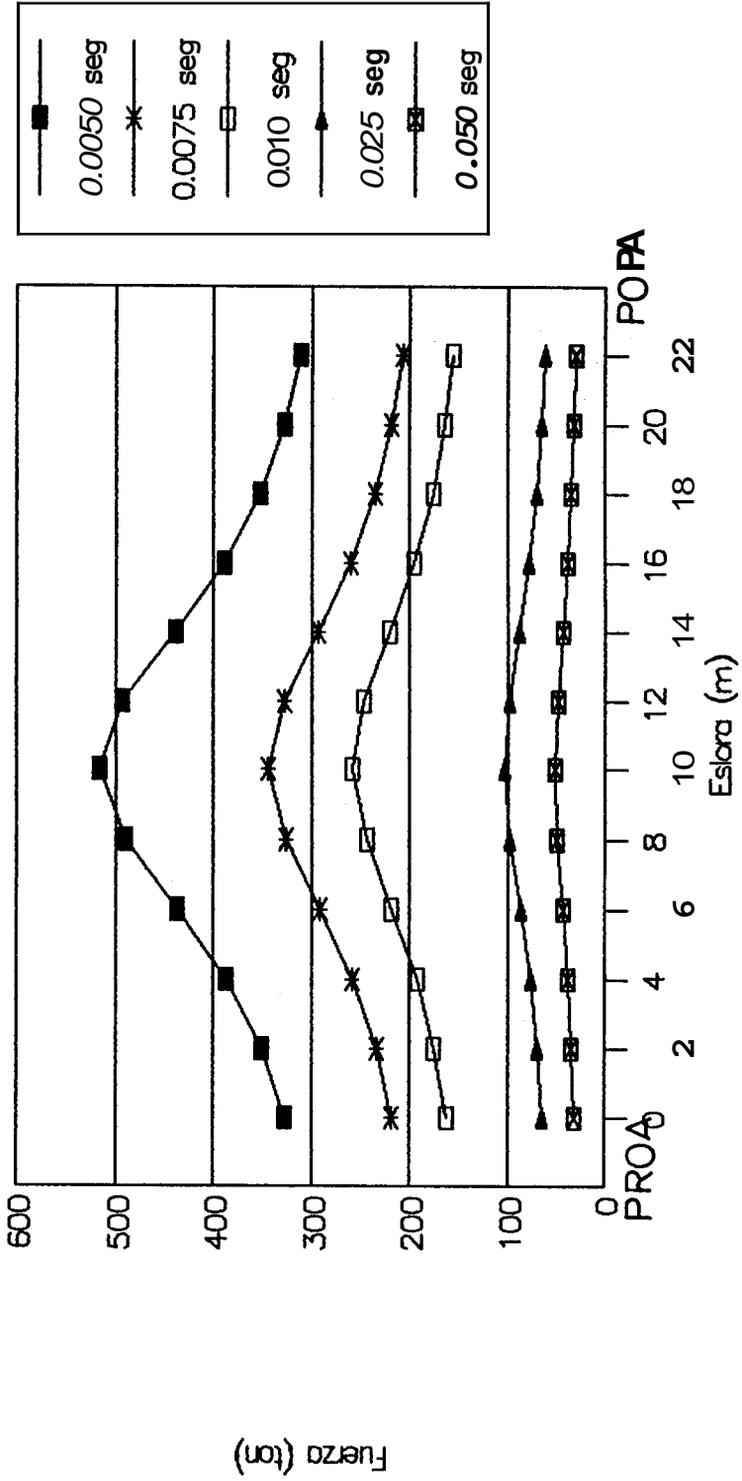


FIG. No. 3

Una vez definidas las cargas, se proceden a seleccionar las restricciones de la estructura:

- Como se modela únicamente la mitad del submarino, se deben definir restricciones para que el modelo trabaje como si estuviera completo. Tomando la Figura 6, (que incluye las direcciones globales), se puede ver que deben restringirse la traslación en dirección X y la rotación con respecto a X , en todos los nodos del plano de simetría XZ .
- Para evitar la traslación vertical Z , los nodos de la estructura que se conectan con los alerones laterales de navegación (ver plano 1), se restringen en dicha dirección. Esta condición se aplica porque el movimiento vertical de la nave está controlado por dichos alerones horizontales de proa y popa, [9].
- Y, debido a que la estructura experimenta compresión longitudinal, en el extremo de popa del submarino se restringe la dirección X para producir la compresión de los espaciadores entre las cuadernas.

Con estas condiciones de frontera, el sistema puede resolverse en forma única.

2.3. Discusión de resultados.-

Al modelo se le aplicaron las cargas críticas de impacto y presión hidrostática de destrucción, por consiguiente, la estructura va a presentar zonas críticas, con diferentes niveles de esfuerzo, analizados en tres etapas:

- i) Compresión axial del casco.
- ii) Compresión transversal del forro exterior.
- iii) Compresión en mamparos con y sin escotilla.

- i) Compresión axial del casco.

El submarino por efecto de la fuerza hidrostática, en sus extremos experimenta compresión axial en el forro exterior. Esta compresión produce la flexión de las planchas del casco resistente entre las cuadernas.

De los cálculos de la Referencia [9] sobre la compresión axial del panel de cuadernas, el esfuerzo permisible es de 1052 kg/cm². Este valor es aceptable y se **usa** de referencia para los niveles de compresión axial mostrados en la Figura 14. En la gráfica el Esfuerzo Axial se plotea versus Número de cuadernas en dos fibras longitudinales de elementos plancha: superior e inferior del forro. La curva del esfuerzo axial

muestra claramente, que alrededor de la cuaderna 19 la influencia de la fuerza de impacto está presente. El golpe produce flexión hacia arriba de la viga submarino, disminuyendo el esfuerzo de compresión en la fibra superior, pero aumentando el mismo en la inferior. Este efecto combinado eleva el esfuerzo axial del forro más allá del esfuerzo permisible, pero no llega a producir rotura.

La Figura 15 muestra la flexión longitudinal de la viga buque, producido por el impacto, que debido a la excesiva presión alrededor del casco, se mantiene local. Por esto, la transmisión de la misma a través de la estructura del casco corresponde al análisis modular.

Se presenta el caso particular de que siendo un submarino de sección no circular, la carga hidrostática neta vertical es mayor que la horizontal. La Figura 16 muestra claramente este problema de diseño: El planchaje del forro superior e inferior se flectan transversalmente hacia el interior, de tal forma que el planchaje del costado se deforma hacia afuera. Este defecto nos lleva a un análisis de las cuadernas en la estructura global.

ESFUERZO AXIAL

Compresion axial de la viga submarino

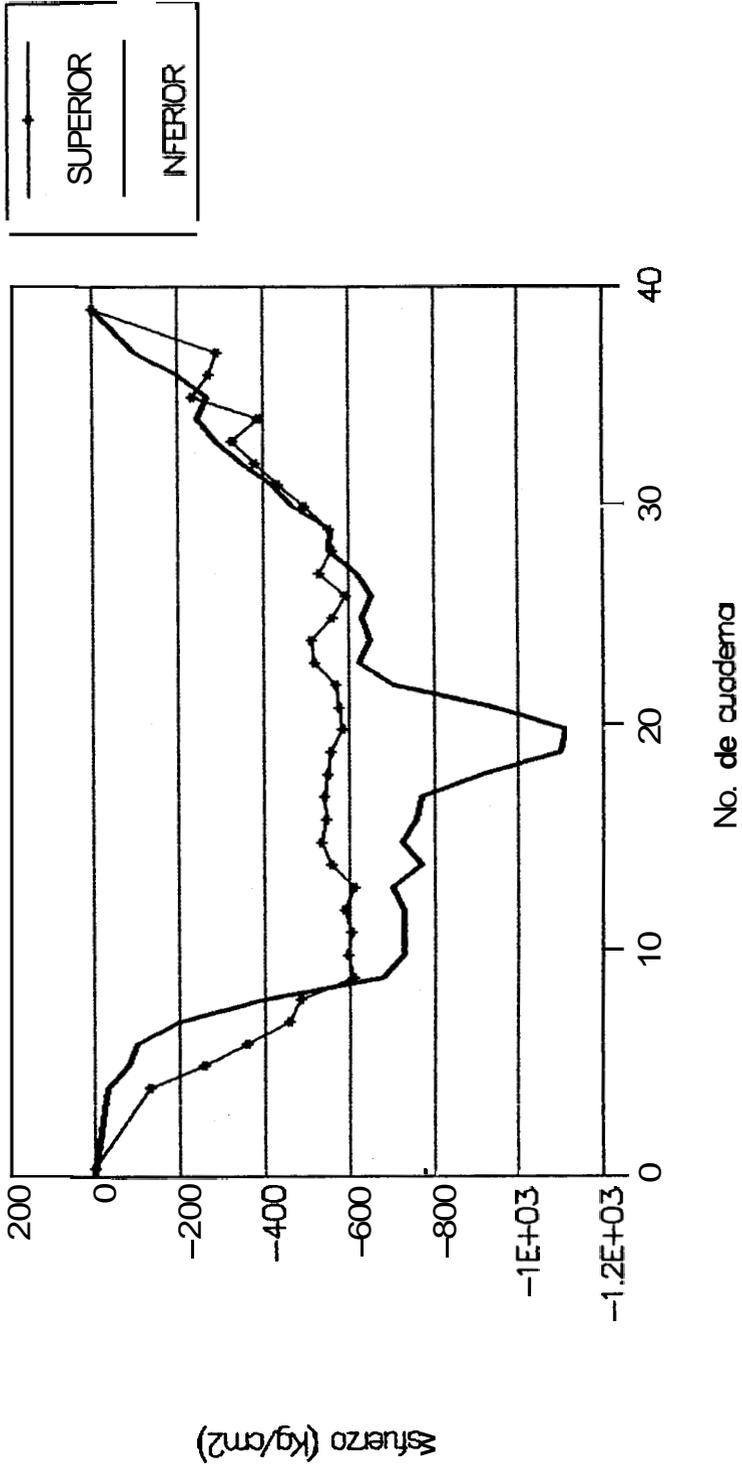


FIG. No. 14

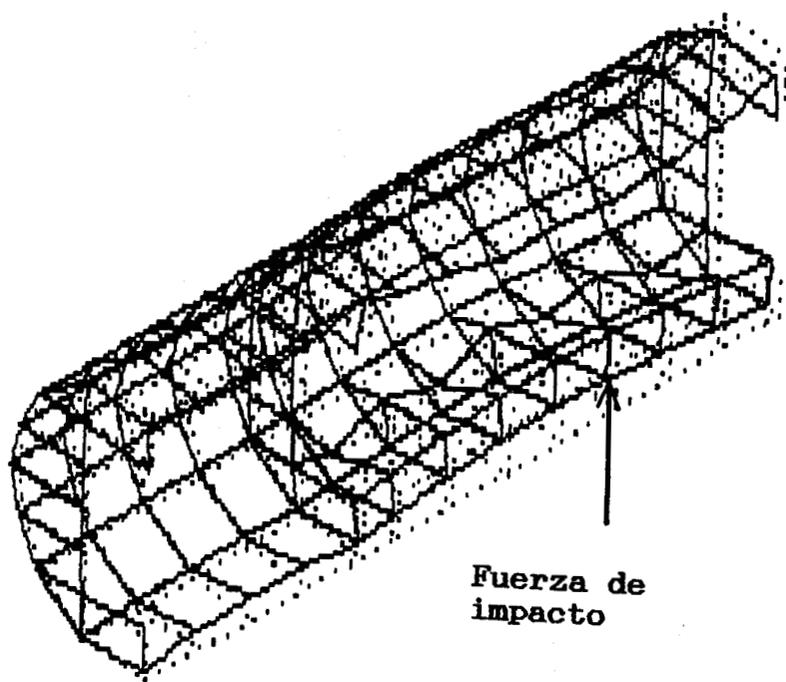


FIG. No.15 Cuerpo paralelo deformado

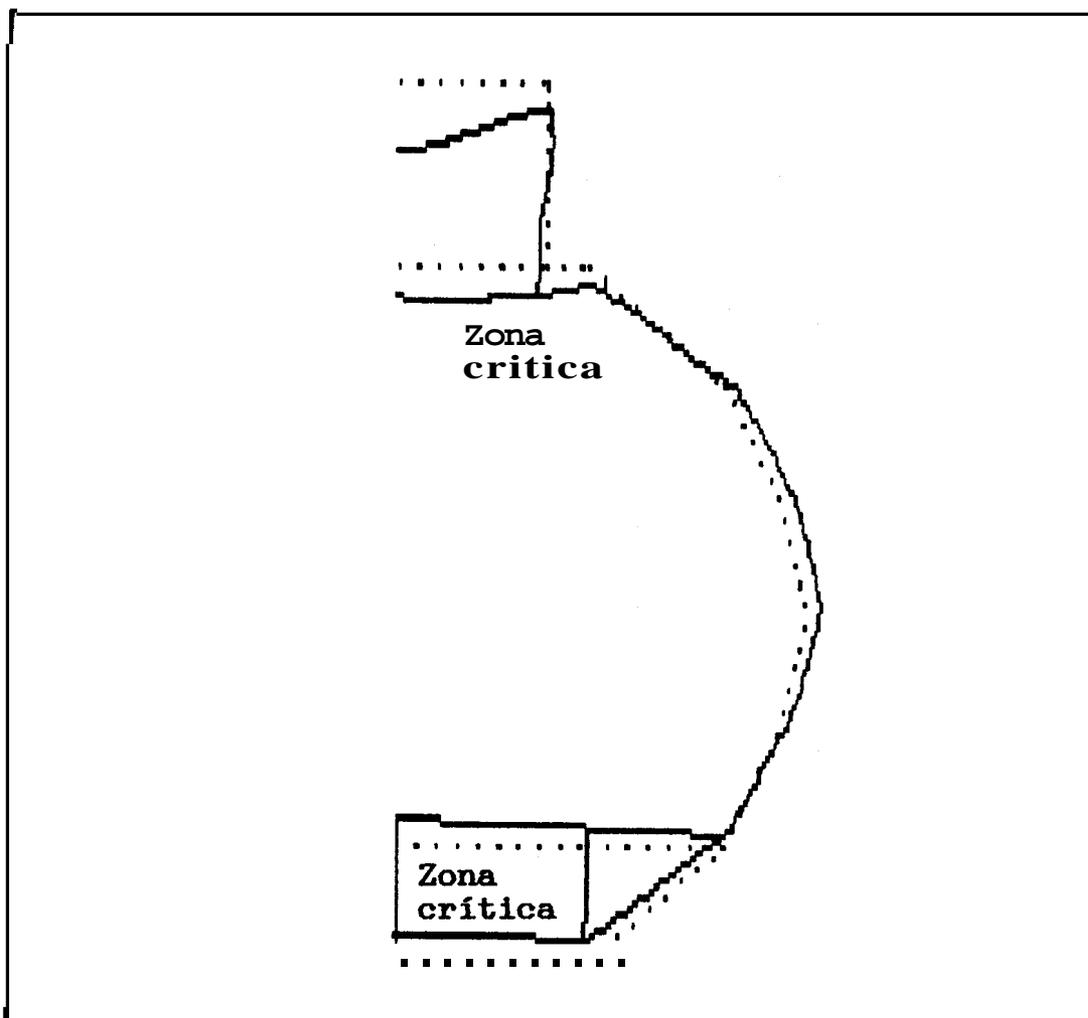


FIG. No.16 Cuaderna típica deformada

ii) Compresión transversal del forro exterior.

Debido a la presión normal del agua, se produce flexión transversal en el forro exterior. El forro entre mamparos se "aplasta" en la zona superior e inferior del anillo, mientras que las fibras laterales, tienden a abrirse. Este comportamiento de la estructura da lugar a dos zonas críticas en el casco, mostradas en la Figura 15. La deformación que tiene lugar por este defecto estructural, produce esfuerzos cortantes en ambos sentidos sobre el forro exterior. Se presenta en este caso, el **tipo** de deformación asimétrica como se mencionó en el Capítulo I, numeral 1.3: "La presión normal hace que el forro se abolle sinuosamente entre las cuadernas **y** se produzcan ondulaciones hacia afuera y hacia adentro, **pero** debido a la presión, las abolladuras hacia afuera son contenidas en el transcurso de la deformación dando lugar a la forma asimétrica", véase también la Figura 5.

En la Figura 17 se presenta como ejemplo los valores del esfuerzo cortante **y** del esfuerzo de compresión en los bordes de los elementos plancha. Estos valores corresponden a una fibra de elementos plancha del forro, en la zona del cuerpo medio paralelo.

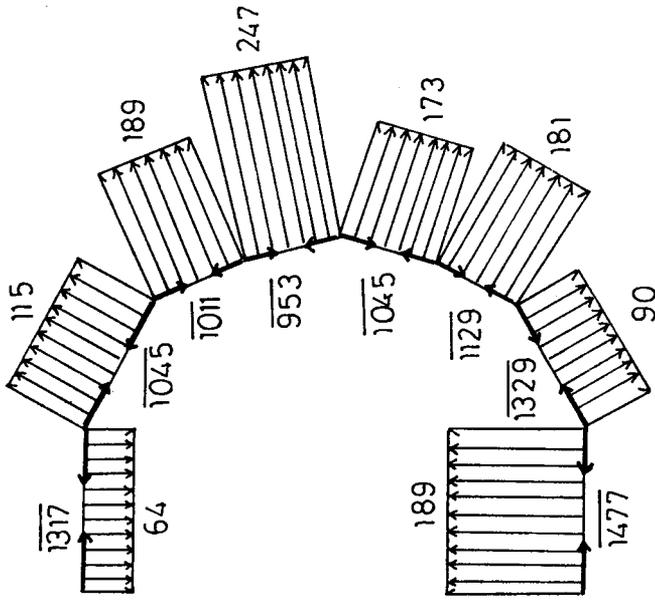
En ella vemos que los elementos plancha superior e inferior del anillo tienden a flectarse hacia el interior, mientras que los restantes tienden a flectarse hacia el exterior del anillo.

En cuanto a valores que excedan los límites de permisibilidad, más significativo que el esfuerzo cortante, es el esfuerzo de compresión en los bordes de los elementos. De la Referencia [9], se tiene que 1225 kg/cm^2 es el esfuerzo permisible a la compresión en los bordes del panel reforzado por las cuadernas. Las zona superior e inferior del anillo soportan la compresión lateral del casco, dando lugar a que el esfuerzo en esas zonas exceda el nivel permisible (Zonas críticas). El esfuerzo del forro en las zonas críticas disminuye hacia los mamparos sin escotilla, en mayor grado que hacia los mamparos con escotilla. Los mamparos absorben el esfuerzo global de la estructura en diferente forma, lo cual es explicado en el punto iii).

Una mejor idea del comportamiento del forro puede obtenerse con el uso de módulos, mejorando la discretización del mismo. Este análisis se desarrollará en el siguiente capítulo.

En cuanto a la influencia de los elementos internos a la compresión transversal, las zonas esquinadas como la unión de la quilla con el doblefondo presentan concentración de esfuerzo. **Pero** debido a lo pobre de la discretización por las limitaciones explicadas en el numeral 1.2, un estudio detallado, correspondería al análisis local. A este mismo caso corresponden los elementos estructurales como vagras y refuerzos de la base de máquinas.

NIVELES DE ESFUERZO EN UNA FIBRA DEL FORRO



953: Esfuerzo en los bordes.

247: Esfuerzo cortante
Ambos en unidades de Kg/cm²

FIG. No.17

iii) Compresión en mamparos con y sin escotilla.

De la referencia [3], la resistencia al pandeo de un panel reforzado sometido a carga axial, en este caso los mamparos transversales, no deben exceder el siguiente nivel permisible de esfuerzo:

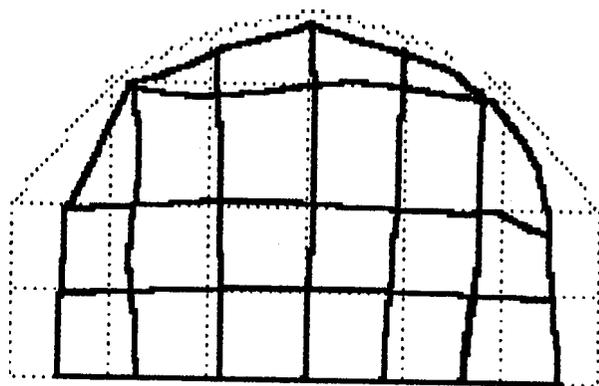
$$\sigma \text{ compresión} = 1420 \text{ kg/cm}^2$$

Considerando primero un mamparo sin escotilla, como vemos en la Figura 18, por acción de las cargas este experimenta una compresión en todos los puntos de su superficie. Los valores de estos esfuerzos se muestran en la Figura 19, considerando el mamparo de proa del compartimiento de pasajeros. Estos valores se muestran críticos hacia la zona de la intersección del mamparo con el doblefondo y la quilla, pero ningún valor excede el permisible, de tal modo que el mamparo trabaja bien aún a la presión de destrucción de la nave.

Las zonas críticas del forro, mencionadas en el punto ii), producen un incremento en la compresión del mamparo sin exceder de igual forma el valor crítico.

EFECTO DE LAS CARGAS SOBRE LOS MAMPAROS

Deformacion del mamparo sin
escotilla



Deformacion del mamparo con
escotilla

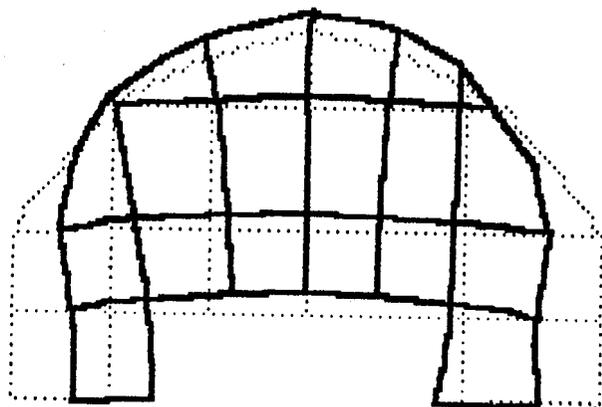
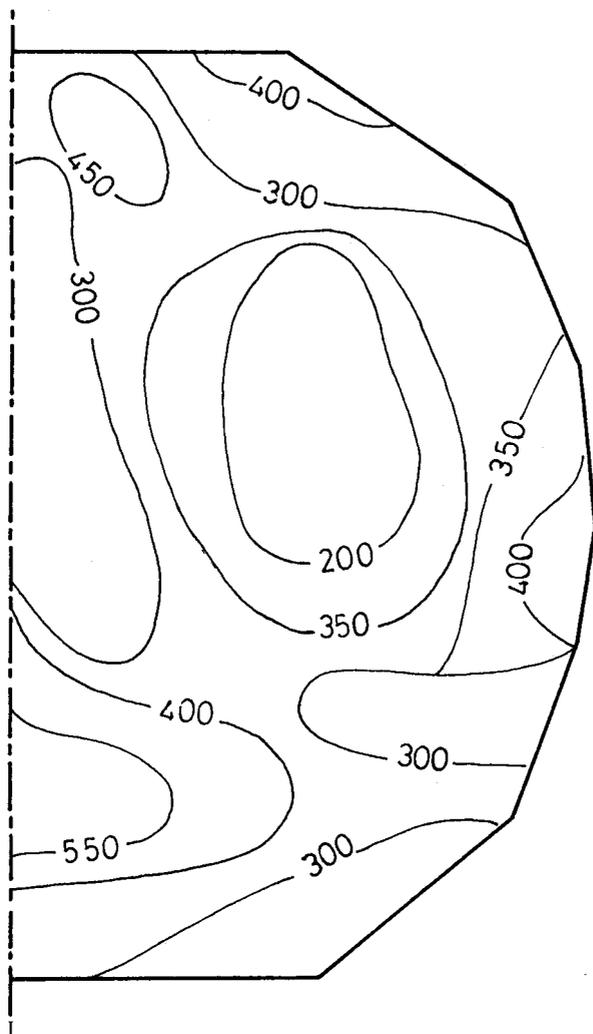


FIG. No.18

NIVELES DE ESFUERZO EN UN MAMPARO SIN ESCOTILLA

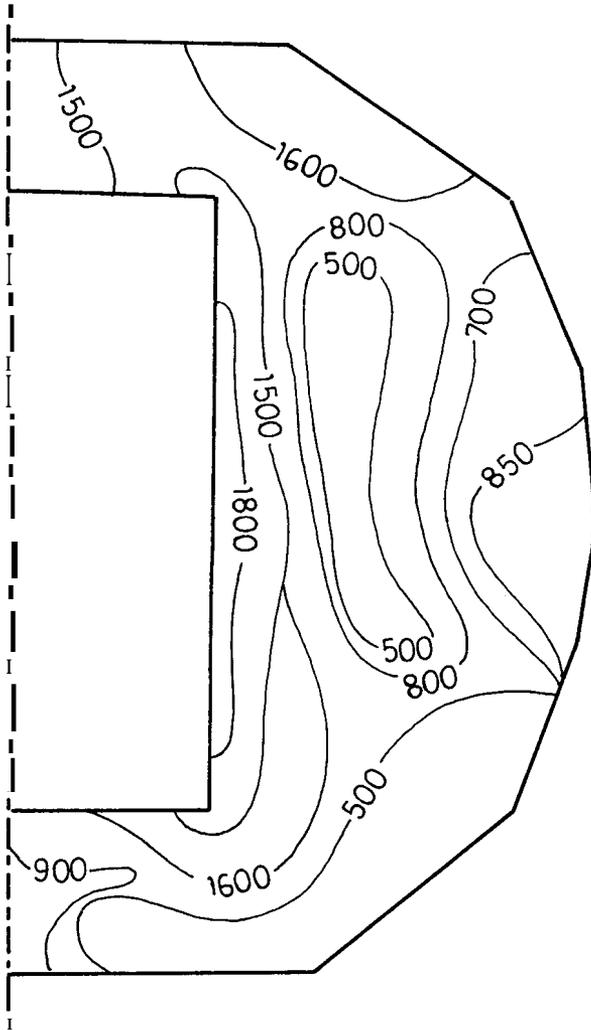
Esfuerzo en unidades
de Kg/cm²

FIG. No.19

Con la presencia de la escotilla como se aprecia en la Figura 18, se favorece el aplastamiento vertical de la estructura global, mencionado en el punto ii).

En la Figura **20** se muestra la distribución de los esfuerzos sobre la superficie del mamparo, siendo mayor **del** permisible en la zona de la escotilla, lo que indica que la estructura ya ha colapsado, encontrándose en inestabilidad estructural, sin llegar a ruptura. La abertura disminuye la resistencia vertical a la compresión.

Cabe destacar que extremo lateral por el aplastamiento global del forro soporta una concentración de esfuerzos, al igual que las uniones del mamparo en **las** zonas críticas. Este valor de compresión deberá ser menor o mayor en el análisis modular, ya que la escotilla modelizada es más grande que la de diseño, generando menos colaboración a la resistencia vertical y horizontal de la estructura. Este es un problema de discretización, que se ha presentado en la etapa de análisis de resultados globales, y que es fuente de error de los mismos.

NIVELES DE ESFUERZO EN UN MAMPARO CON ESCOTILLA

**Esfuerzo en unidades
de Kg/cm²**

FIG, No-20

Los resultados presentados en este capítulo II, son buenos en forma global, aunque es necesario realizar un estudio a través de módulos. Los módulos darán una mejor idea del comportamiento transversal de la estructura, resultado que por lo pobre de la discretización y por la asunción de considerar al forro interior como elemento viga, puede tener una notable variación.

CAPITULO III

ANALISIS MODULAR

El análisis global del capítulo anterior, nos proporciona una idea completa del comportamiento de la estructura bajo las cargas consideradas. Pero para aquellas zonas "especiales", donde se desea conocer la resistencia de la estructura bajo la acción de estas fuerzas en una forma más detallada, es necesario el análisis de las mismas a través del uso de módulos, como el que se desarrolla en el presente capítulo.

3.1. Descripción de los módulos.

Se definen como módulos a los bloques o conjuntos estructurales obtenidos del modelo global, [8]. Los módulos, tienen como ventaja el que se puede realizar una mejor discretización de la estructura y evitar fallas como las presentadas en el capítulo II, donde la librería del programa mantiene un máximo de nodos limitando la discretización del modelo. En cambio

presenta la desventaja de la introducción del estudio mas detallado de las condiciones de frontera, para lograr que el módulo se conecte con la estructura global de una forma lo más real posible. Con estas consideraciones, los módulos a analizar en el presente capitulo son los siguientes:

- i) El mamparo de la sección media con la influencia de los forros interior y exterior, y doblefondo, al que se denominará módulo 1.
- ii) Módulo 2, que incluye el forro exterior entre dos ventanas, con la influencia del forro interior, los longitudinales y la cuaderna.

El proceso desarrollado para la discretización y modelización es el siguiente:

- i) Módulo 1.-

Como se vio en el numeral 2.2, los mamparos son los que resisten la compresión transversal de la estructura global en gran proporción. Pero los mismos presentan una discretización pobre, al igual que las cuadernas, cuyas características físicas incluyen la presencia del dobleforro a través del ancho efectivo. En este módulo

en mención se va a lograr una mejor discretización del mamparo con una porción del casco resistente, considerando como elementos físicos propios las cuadernas y el dobleforro.

Algunos detalles de este módulo son:

- El mamparo de la sección media con su correspondiente escotilla.
- Para la porción del casco resistente, de lo expresado en el numeral 2.3., se incluye una longitud de 1.5 metros a cada lado del mamparo.
- Discretizar la mitad de la estructura, por condiciones de simetría.
- En lo posible mantener la razón de aspecto cercana a 1.0 para los elementos plancha.
- Las direcciones globales y locales son las mencionadas en el numeral 2.1.

De esto, se ha considerado como elementos plancha a los siguientes miembros estructurales:

- Forro exterior.
- Forro interior.
- Cuadernas.
- Doblefondo.
- Quilla.

- Vagras transversales.
- División longitudinal lateral y superior de los tanques de lastre.
- Mamparo.

Con los correspondientes escantillones, mencionados en la tabla II.

Además, se han modelado como elementos viga las siguientes partes de la estructura:

- Longitudinales del forro exterior.
- Longitudinales del doblefondo.

Con las inercias y áreas seccionales consideradas para el numeral **2.2.**, de acuerdo al cálculo del apéndice 1.

Con todo esto se han empleado en el módulo:

371 nodos.

140 elementos viga.

412 elementos plancha,

El mismo que se presenta en las Figuras **21** y **22** en una vista general, y en una vista frontal donde se puede apreciar una mejor discretización del mamparo. El tamaño de la escotilla es el real, para obviar el

problema mencionado a este respecto en el capítulo 11,
numeral 2.3.

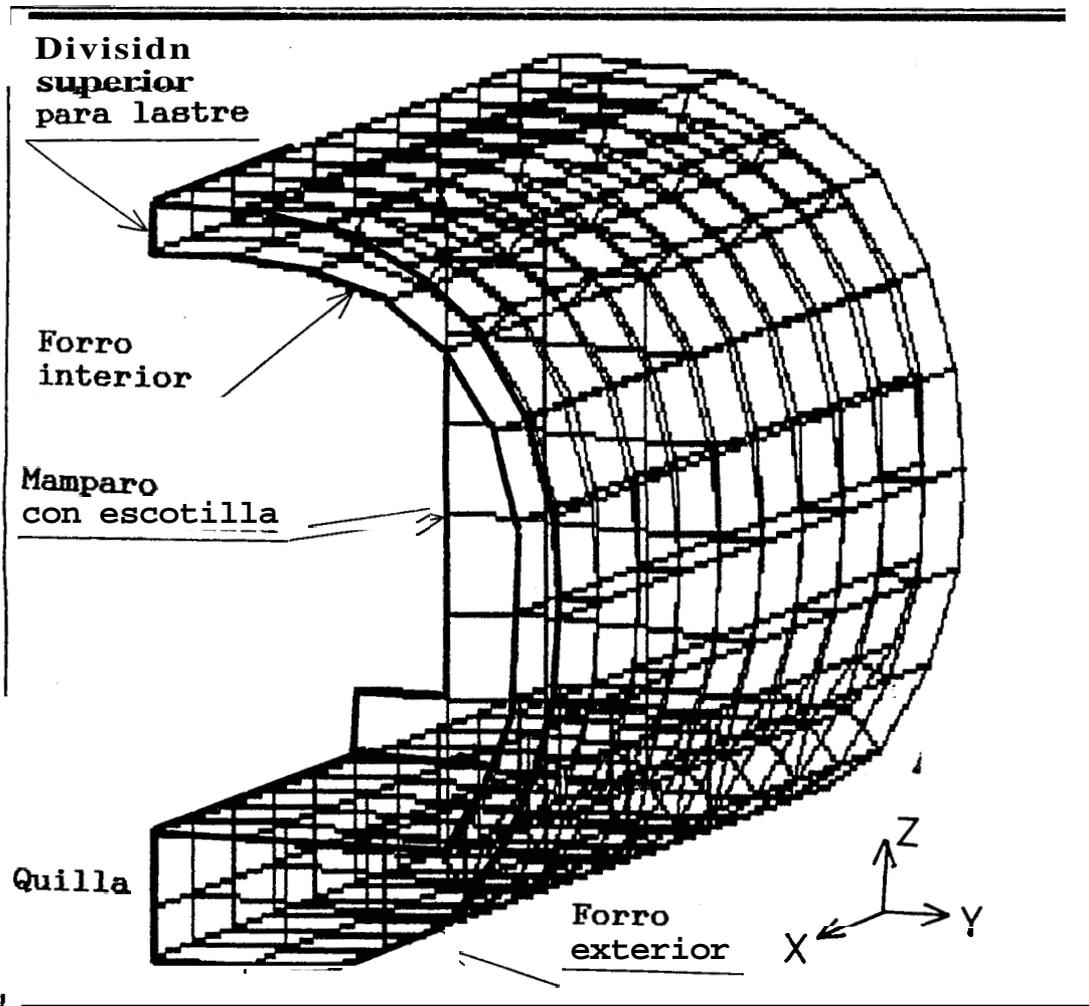


FIG. No.21 Módulo 1 (vista general)

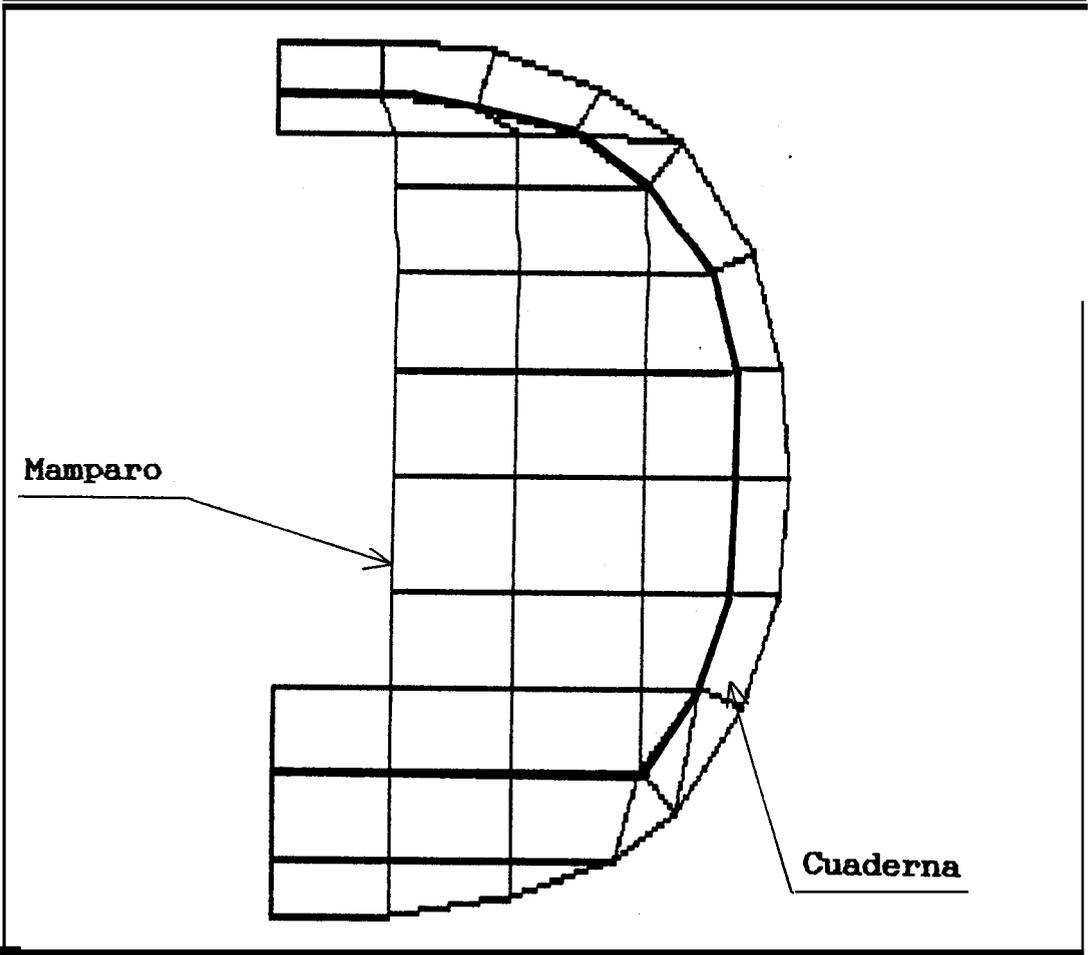


FIG. No.22 Módulo 1 (vista frontal)

ii) Módulo 2.-

Siendo un submarino de fines turísticos, resulta interesante efectuar un estudio más detallado sobre el efecto de las ventanas laterales en el forro exterior a la presión de destrucción. Por esto se plantea el módulo 2 como una porción entre dos ventanas como vemos en la Figura 23.

Para la confección del mismo se tiene lo siguiente:

- Forro interior y forro exterior como elementos plancha soportados **por** una cuaderna modelada con el mismo tipo de elemento.
- Doble fondo formado **por** elementos plancha, soportado por la vagra transversal y la quilla, modelados ambos también con el mismo tipo de elementos.
- **Los** longitudinales tanto del forro como del doble fondo se confeccionan de elementos plancha, al igual que la división de los tanques de lastre con los de fondo.
- Considerar dos semiventanas, una a cada lado de la cuaderna como se las presenta en la referencia [9].
- Cuidar en la discretización, que la razón de aspecto de los elementos sea lo más cercano a 1.0.
- Modelar la mitad de la sección empleando condiciones de simetría.

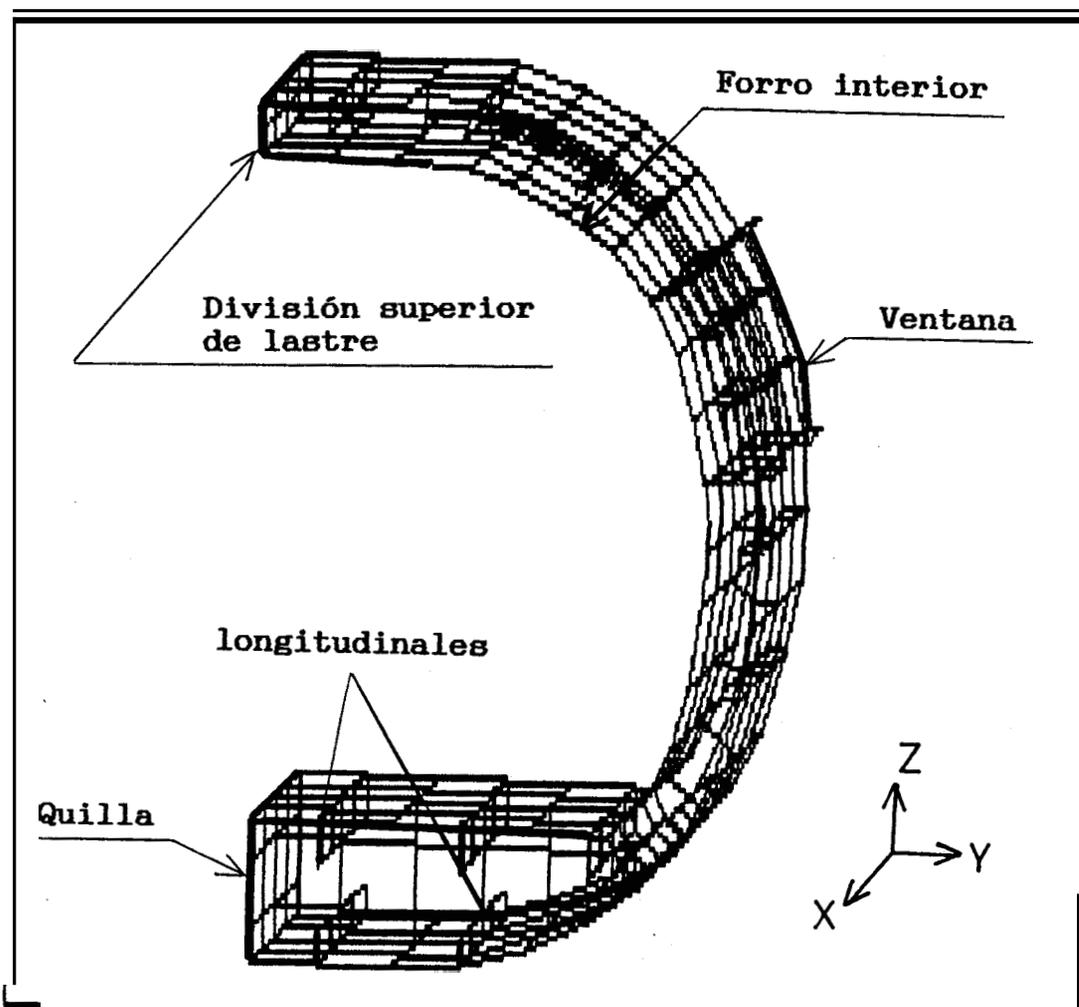


FIG. No.23 Módulo 2 (vista general)

En **cuanto** a las ventanas, han sido modeladas como se las presenta en la Figura 24, donde se ha destacado la platina de protección y refuerzo de las mismas sobre el casco. Las ventanas básicamente están conformadas con el criterio mostrado en la Figura 25, la cual considera:

- En base al diseño que poseen las ventanas, la placa exterior transparente, por ser de gran espesor se la modela con elementos "SOLID", a los que denominaremos elementos sólidos.
- La placa interior transparente, por ser de pequeño espesor, se la modela con elementos plancha apoyados en el forro interior.
- La platina de acero que encierra el conjunto sólido-plancha, se la modela con elementos plancha para darle continuidad con los elementos del forro.

Con todo esto se han empleado en el módulo:

371 nodos.

317 elementos plancha.

6 elementos sólido.

A modo de resumen de los refuerzos modelados, se presenta la Figura 26.

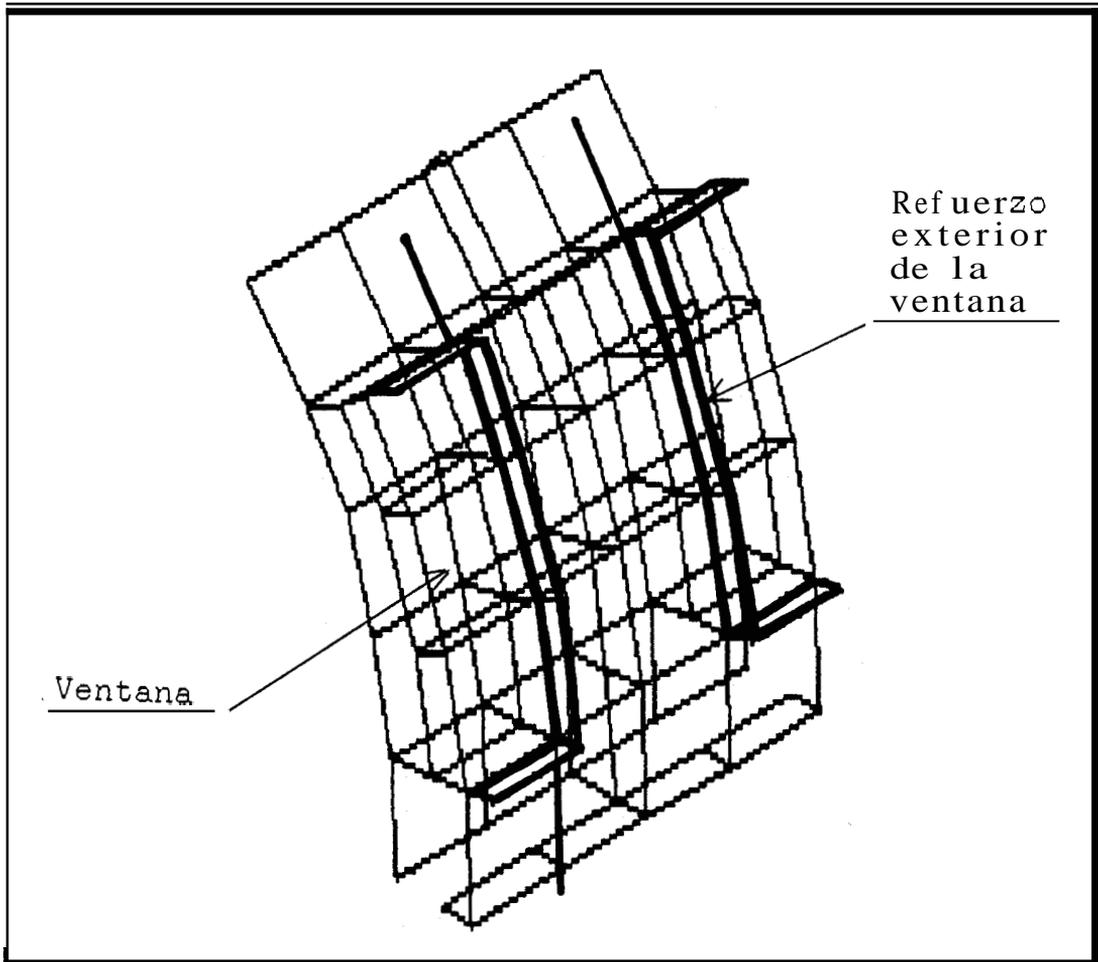


FIG. No.24 Detalle de la discretización de las ventanas

DETALLE DE LA MODELIZACION DE LAS VENTANAS

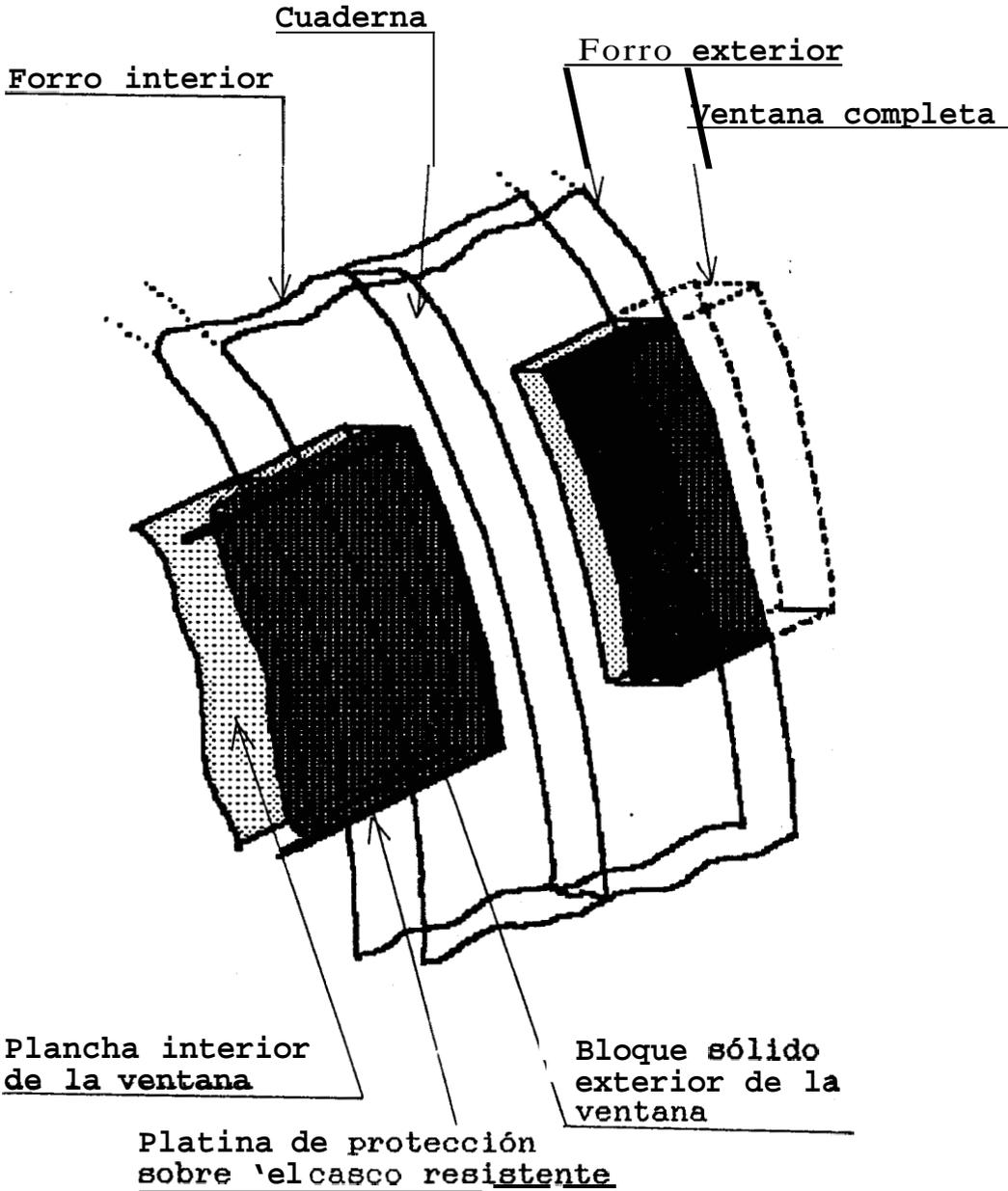


FIG. No.25

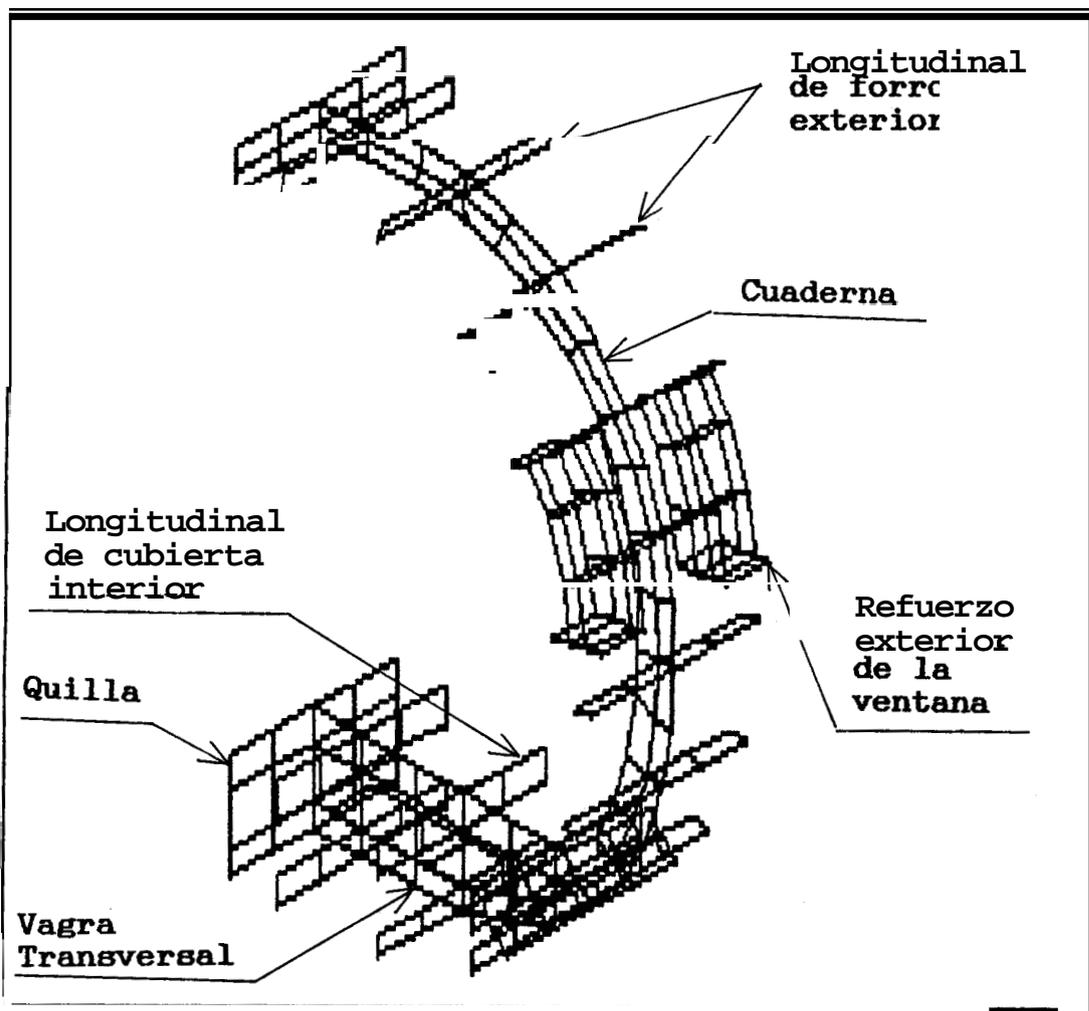


FIG. No.26 Detalle de los refuerzos y ventanas del módulo 2

Cabe destacar que a pesar de mejorarse la discretización, se presentan algunos problemas mencionados en el numeral 2.1. Entre estos tenemos la necesidad de elementos triangulares en el modelo, lo cual hace que queden espacios vacíos en el modelo.

Es importante mencionar que al ser los módulos zonas del cuerpo paralelo de la estructura del submarino, ha desaparecido el problema de tener elementos plancha que no tengan sus cuatro extremos en un plano. Esto se debe a que en la superficie del casco resistente existe un solo sentido de curvatura del planchaje. Con todas estas consideraciones, los modelos están listos para recibir sus condiciones de frontera y las cargas a soportar.

3.2. Definición de las condiciones de trabajo.

El módulo 1 ha sido confeccionado para estudiar la transmisión de fuerzas a través de la estructura del submarino, y conocer los niveles de esfuerzo generados en el forro interior, exterior, cubierta interior y mamparo transversal.

El módulo 2 en cambio considera la premisa de que siendo un submarino con fines turísticos, posee ventanas, cuyo diseño debe considerar la influencia de la compresión y tensión del anillo del casco sobre las mismas. A esto se le suma la fuerza de impacto debido a que el punto crítico del golpe, mostrado en la Figura 13, se encuentra en el compartimiento de pasajeros. Con este fin, en el módulo 2 se analizará como las ventanas afectan a la distribución de esfuerzos del casco, (forro exterior y cuaderna).

El proceso desarrollado para la definición de las cargas, considera en ambos módulos lo siguiente:

- La aplicación de las cargas estáticas sobre la estructura, como se mencionan en el numeral 2.2. (Determinación de las cargas estáticas). Esto significa la aplicación de igual distribución de

boyantez (Figura 10), con los pesos correspondientes para la sección modelizada, (Figura 12).

- La fuerza de impacto con el valor crítico usado en el modelo global.

Además para cada uno de los módulos considera:

i) Módulo 1.-

Se ha mencionado en el numeral 3.1., que el módulo considera al mamparo de la sección media con una porción del casco resistente de 1.5 metros a proa y popa del mismo. Esto se debe a que la fuerza de impacto toma su valor máximo cerca de 1.5 metros hacia proa de la sección media, tendencia mostrada en la Figura 13. Por ello el módulo presenta la mitad de proa de la magnitud de la fuerza de impacto en un extremo, y se puede analizar como se transmite a través de la estructura, combinada con la presión hidrostática.

ii) Módulo 2.-

El módulo va a soportar la fuerza de impacto en el centro de la luz entre cuadernas, condición que permite analizar como las ventanas afectan a la distribución de esfuerzos sobre la estructura del casco.

Una vez definidas las cargas, se procede a definir las condiciones de frontera de la estructura discretizada. Para ambos módulos, por pertenecer al cuerpo medio paralelo, deben cumplir las siguientes restricciones:

- Como se modela únicamente la mitad longitudinal de la estructura del submarino, se deben definir restricciones para que el modelo trabaje como si estuviera completo. Considerando las Figuras 21 y 23, (Que incluyen las direcciones globales), se puede ver que deben restringirse la traslación en dirección Y y la rotación con respecto a X , en todos los nodos del plano de simetría XZ .

Para evitar el movimiento del cuerpo rígido en la dirección Z , se restringe el nodo de la sección media con la máxima manga, restricción que permite a la estructura comprimirse transversalmente despreciando los efectos de flexión longitudinal. Esta condición es debido a que el módulo no considera las cargas axiales generadas por la presión del mar y **por** la flexión producida por la fuerza de impacto sobre la estructura. La fuerza axial (Compresión longitudinal), es parte del problema global, no así la compresión transversal que puede analizarse mejor a través de los módulos.

- Con las consideraciones antes mencionadas, en el mismo nodo se restringe la dirección X .
- Debido a que los cortes en ambos extremos del módulo se hacen hasta la mitad de la luz entre cuadernas, la pendiente de la flexión en el borde debe ser cero. Por lo tanto se restringe la rotación alrededor de los ejes Y y Z , de los nodos situados en los bordes de **proa** y popa del módulo.

Con las tres direcciones restringidas y las cargas correspondientes, los módulos se encuentran en equilibrio estático y dinámico.

3.3. Comentarios sobre los resultados.

Para el análisis, los comentarios sobre los resultados se dividen de acuerdo a lo siguiente:

- Para el módulo 1:

- i) Transmisión del impacto en una fibra transversal.
- ii) Transmisión del impacto en forma global.
- iii) Esfuerzos en el mamparo transversal (Mejorado).

- Y, para el módulo 2:

- iv) Influencia de la ventana sobre el forro exterior.
- v) Esfuerzos en la superficie de una cuaderna.

i) Transmisión del impacto en una fibra transversal.-

Al módulo, de acuerdo a lo expresado en el numeral 3.2., se le aplicaron las cargas hidrostáticas y la carga crítica de impacto mostrada en la Figura 13. De los resultados, se observa que el impacto influye a través del forro exterior a los elementos estructurales al mismo. Por ello resulta más conveniente mostrar primero como **se** han incrementado los esfuerzos en una dirección, es decir en una fibra del anillo del forro exterior. Para conseguir los diferentes niveles del incremento **del** esfuerzo, se compara una fibra de elementos plancha no afectados por el de impacto con los elementos del anillo donde se aplicó la fuerza de impacto. Estos dos anillos o fibras transversales,

están indicados en la Figura 27, donde el incremento o disminución del esfuerzo en la fibra **del** impacto se obtendrá deduciendo los esfuerzos de ambas, o sea:

$$\Delta \text{Esf.} = \text{Esf.f.c.i.} - \text{Esf.f.s.i}$$

donde:

A Esf. = Incremento o disminución del
esfuerzo por el impacto.

Esf.f.c.i. = Esfuerzos en fibra con impacto,

Esf.f.s.i. = Esfuerzos en fibra sin impacto,

variación calculada para los elementos plancha tanto para esfuerzos cortantes, como para los esfuerzos de compresión en los bordes. De esto resulta la Figura 28, donde **se** grafican los incrementos **y** disminuciones de los esfuerzos para la fibra donde **se** produce el impacto.

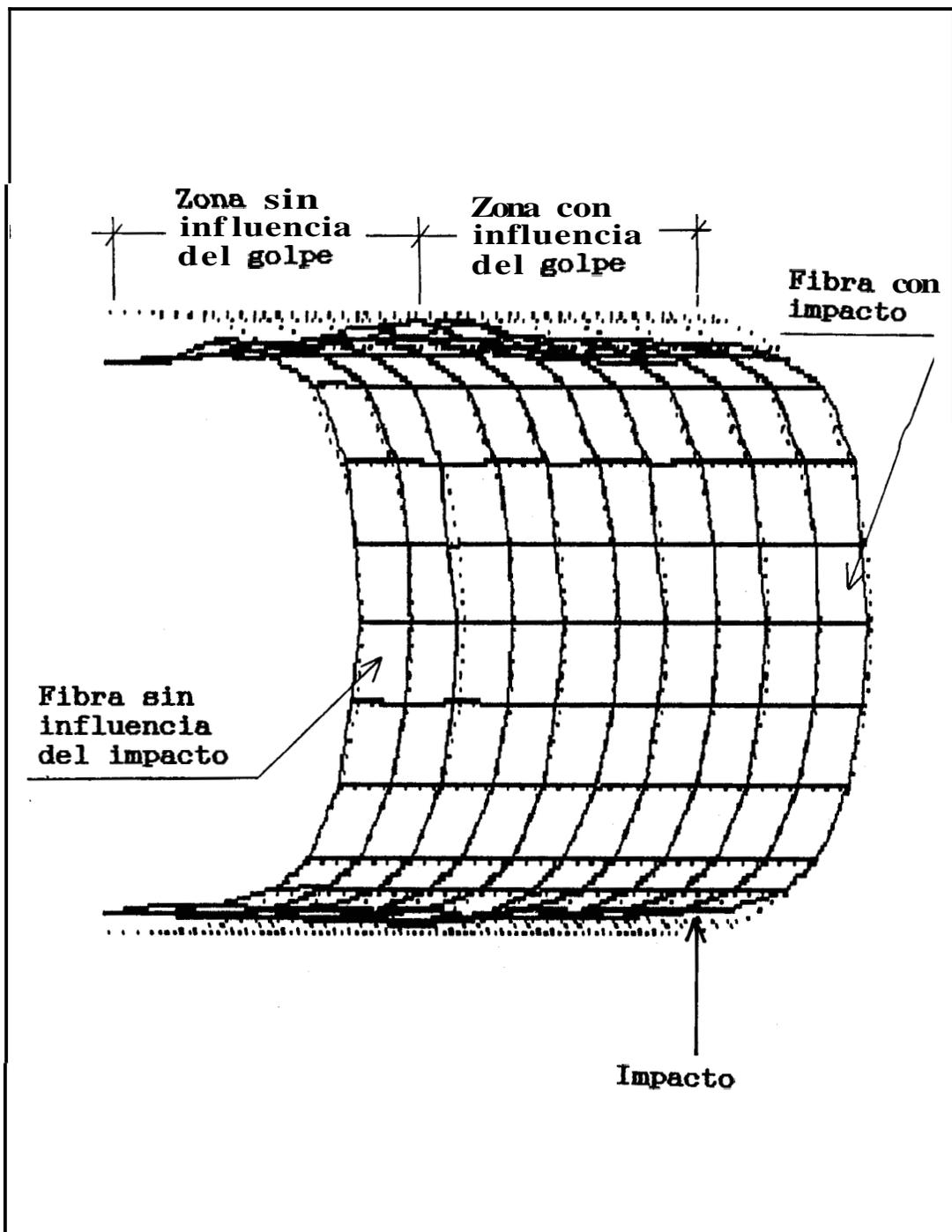


FIG. No.27 Zonas y fibras del forro exterior a considerar para la transmisión de la fuerza de impacto

TRANSMISION TRANSVERSAL DE LA FUERZA DE IMPACTO

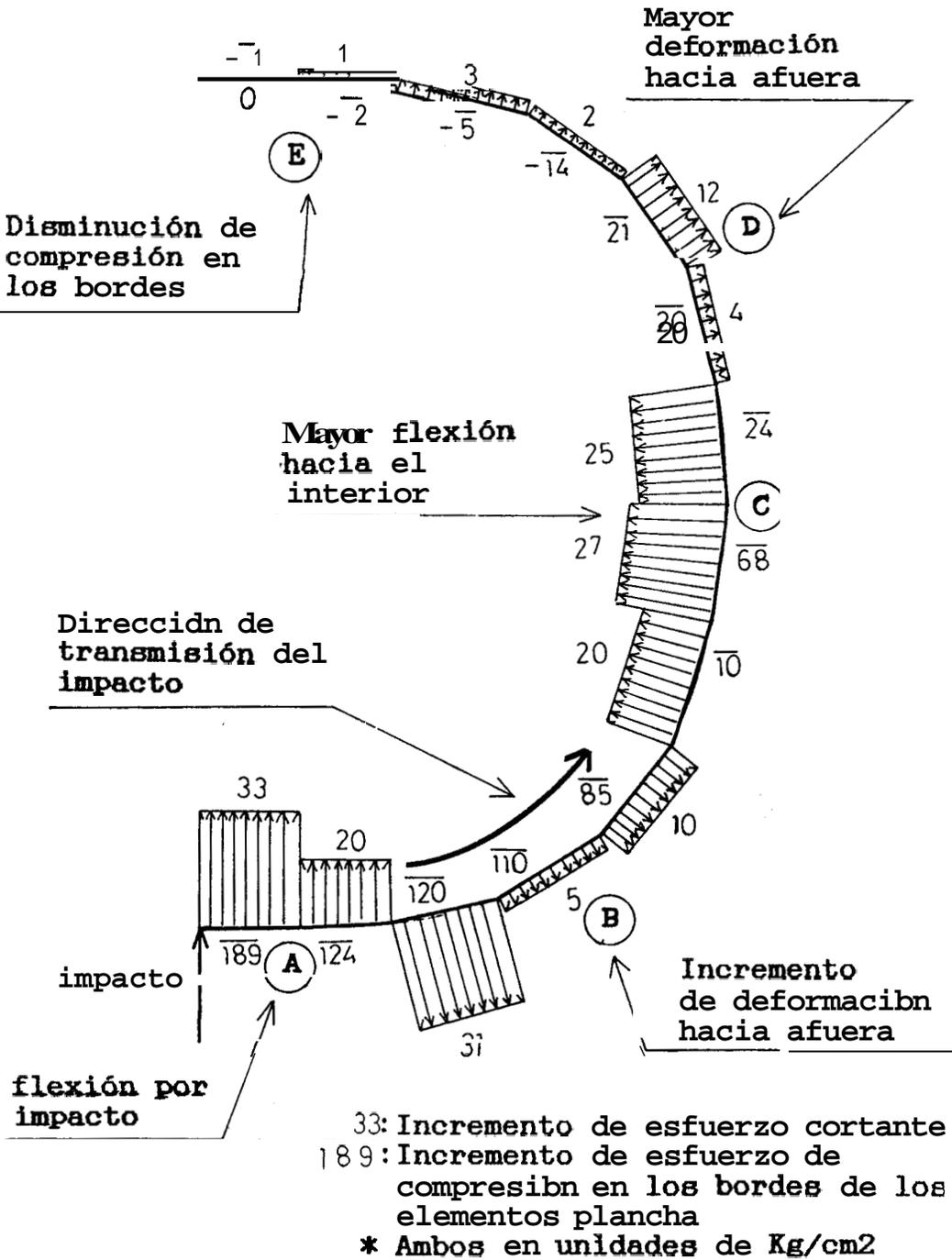
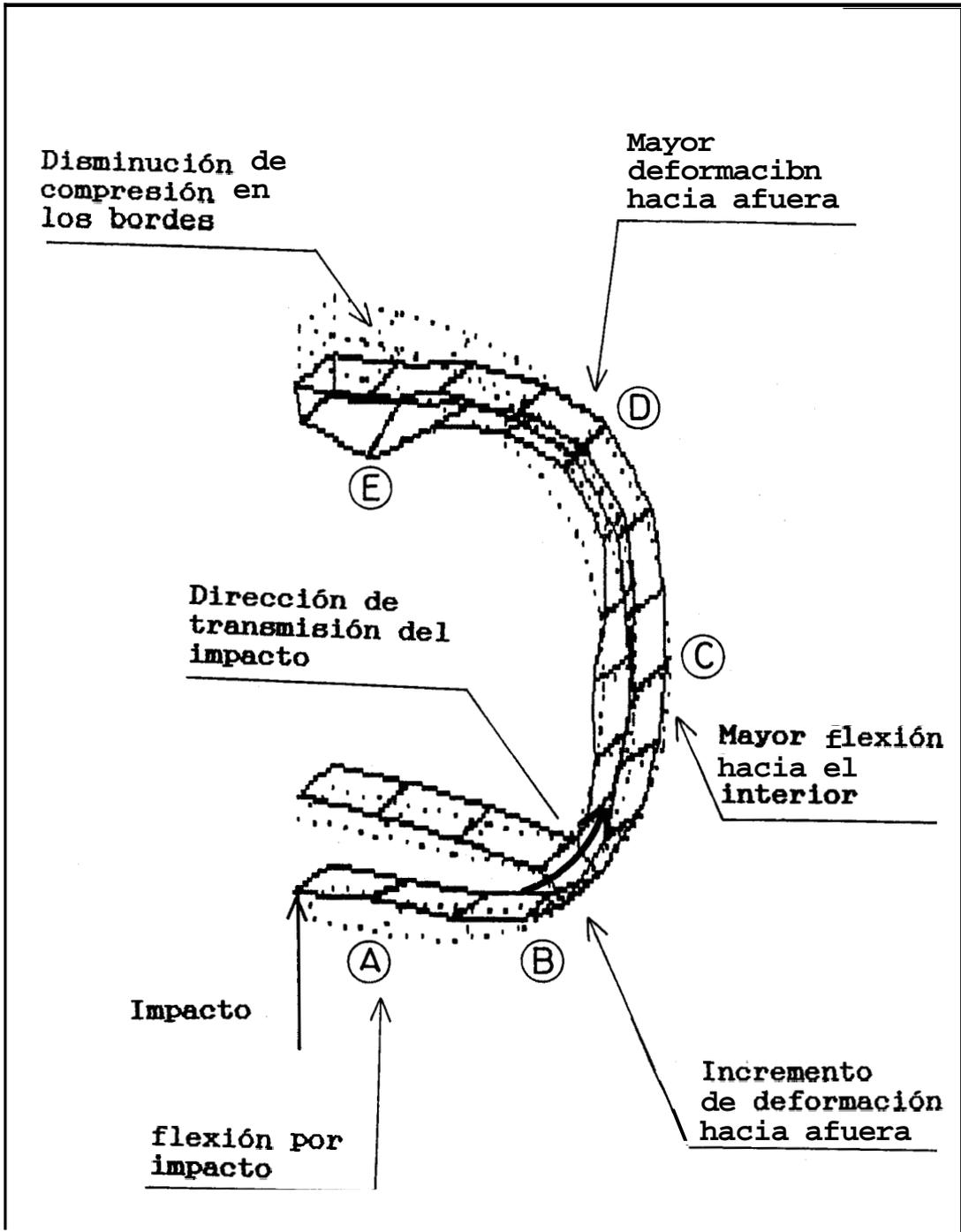


FIG. No. 28



IG. No.29 Efectos de la transmisión de la fuerza de impacto

La Figuras 28 explica la secuencia de la transmisión del impacto por zonas (A, B, C, D, E), mientras que la Figura 29, muestra la misma secuencia graficando las deformaciones producidas:

- Zona A: El golpe produce un incremento de flexión hacia el interior de la fibra, esto aumenta tanto el esfuerzo cortante, como el esfuerzo de compresión en los bordes de los elementos plancha. Esto se debe a que el impacto favorece a la carga hidrostática lateral, para que comprima más al anillo del forro.
- Zona B: Esta zona, es efecto de proceso anterior. La flexión hacia el interior de la zona A, produce flexión del forro hacia el exterior en la zona B.
- Zona C: El impacto como aumenta el aplastamiento vertical de la fibra del forro, favorece al aumento de flexión hacia dentro de la zona en mención. Debido a la flexión, se incrementa la magnitud del esfuerzo cortante en ésta zona de la fibra. El incremento de esfuerzo de compresión en los bordes de los elementos, es consecuencia del aplastamiento vertical del anillo.
- Zona D: Debido al aplastamiento vertical y lateral, en ésta zona se producen valores críticos incrementados por el impacto. La flexión hacia el interior del anillo de las zonas C y E, producen la flexión hacia el exterior de la zona D. Por ésta

razdn, existe un incremento de valores tanto del esfuerzo cortante como del esfuerzo de compresión en los bordes de los elementos plancha.

- Zona E: La fuerza de impacto, ha favorecido a una disminucidn de los esfuerzos de compresión en los bordes de la fibra. Esto se produce porque actúan en conjunto la compresión lateral hidrostática, y el aplastamiento vertical del forro. El trabajo combinado de ambos efectos, aumenta la flexión hacia dentro de la fibra, de tal forma que se dieminuye el esfuerzo de compresión en los bordes de los elementos. Esto no ocurre en la zona A, a pesar de soportar la fuerza de impacto que la flecta hacia el interior, por la presencia de los elementos del doblefondo, como vagras transversales, quilla y cubierta interior.

ii) Transmisión del impacto en forma global.

Conocido el comportamiento transversal de la fuerza de impacto, con el mismo procedimiento se establece la transmisión global de dicha fuerza sobre el forro exterior. En la Figura 27 se muestran las zonas a considerar:

$$\Delta \text{Esf.} = \text{Esf.z.c.i.} - \text{Esf.z.s.i.}$$

donde:

$\Delta \text{Esf.}$ = Incremento o disminución del esfuerzo por el impacto.

Esf.z.c.i. = Esfuerzos en zona con impacto,

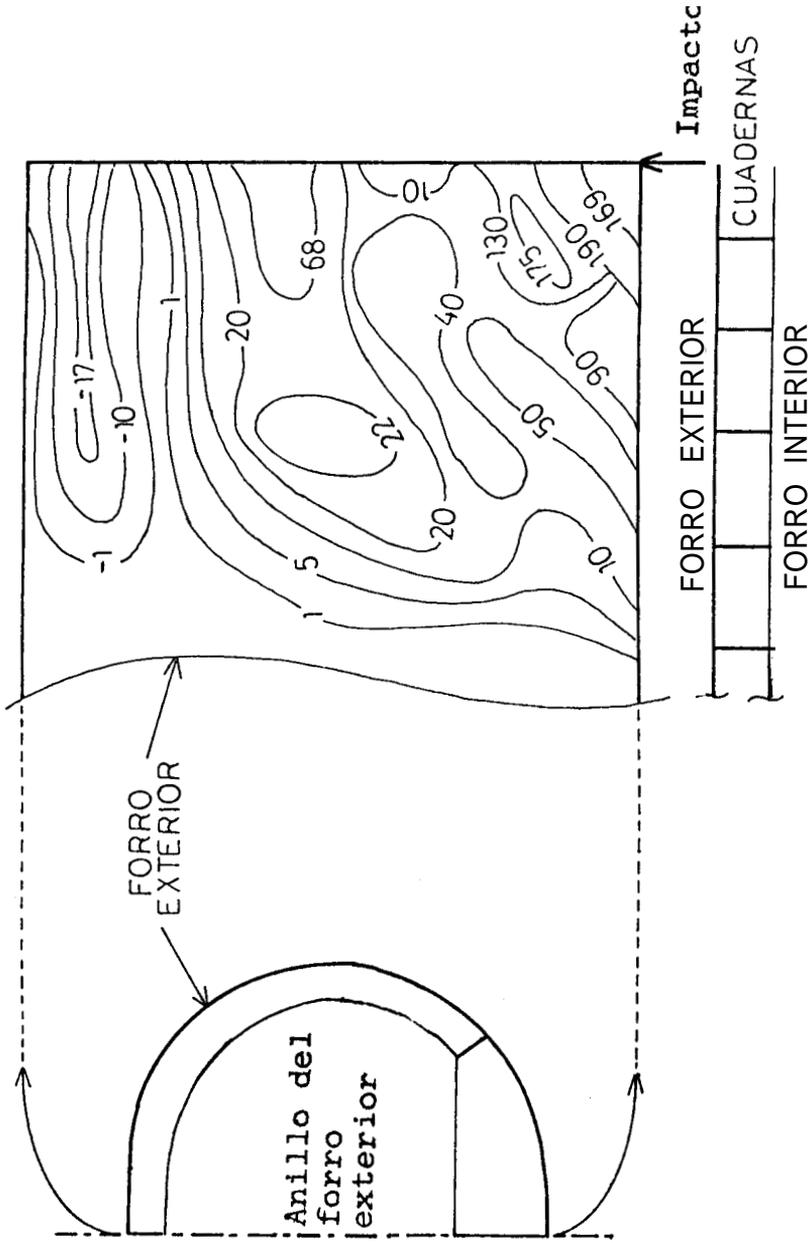
Esf.z.s.i. = Esfuerzos en zona sin impacto,

y, como el aumento o disminución de los esfuerzos de compresión en los bordes, son mayores a las del esfuerzo cortante, se muestra en la Figura 30 únicamente las variaciones del esfuerzo sobre la superficie del forro exterior.

La Figura 30, muestra una expansión del forro exterior del módulo, en la zona del impacto. La transmisión del impacto en toda la superficie del forro exterior, sigue el comportamiento de la fibra del punto i). El incremento y disminución de los esfuerzos

decrece hacia el mamparo, hasta desaparecer. Esto confirma lo mostrado en la Figura 14 y 15, donde la excesiva presión de destrucción, hace que la zona de influencia de la fuerza de impacto se mantenga de una forma local.

TRANSMISION GLOBAL DE LA FUERZA DE IMPACTO



MAMPARO * Incremento del esfuerzo sobre la superficie del forro exterior en Kg/cm²

FIG. No.30

iii) Esfuerzos en el mamparo transversal (Mejorado).

En el módulo en mención, se ha mejorado la discretización del mamparo transversal con escotilla, presentado en la Figura 31, sometido a la acción de las cargas transversales. Esta "mejor" discretización ha dado las siguientes diferencias respecto al análisis global, que son convenientes mencionar:

- Debido al correcto dimensionamiento de la escotilla, el aplastamiento vertical del casco es en menor grado que en el análisis global, para las zonas del forro cercanas a los mamparos.
- La mayor resistencia del mamparo a la compresión vertical, en conjunto con la mejor discretización del forro exterior, ha producido cambios en la compresión lateral del casco. Los esfuerzos cortantes laterales de la Figura 17 del análisis global, son todos salientes del anillo del casco. En cambio el módulo produce esfuerzos cortantes hacia el interior en la zona media del anillo, por el aplastamiento horizontal del forro.

No se han podido obviar fallas debidas a la falta de elementos triangulares, y deficiencia de los elementos, mostrados en la Figura 32. Esto se da porque en ciertas zonas deben superponerse los elementos

viga a los elementos plancha para dar continuidad al refuerzo.

La mejor discretización nos proporciona más continuidad en las curvas de niveles de esfuerzos, mostrados en la Figura 32, los cuales se consideran aceptables a la profundidad de destrucción. Las fallas estructurales, debido a la presión de destrucción, se presentan en otros elementos de la estructura como los presentados en el módulo 2.

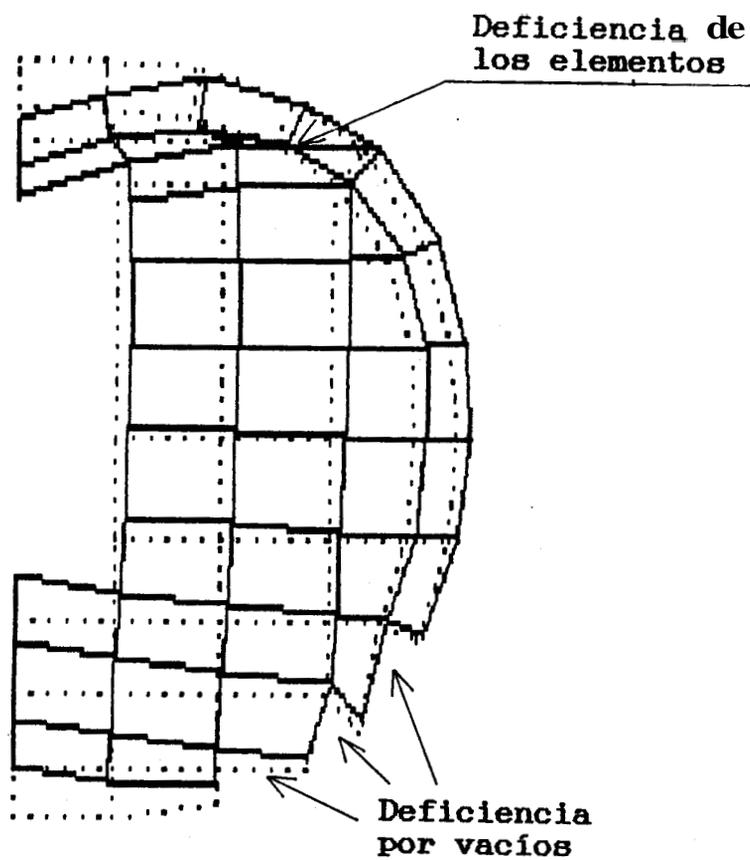
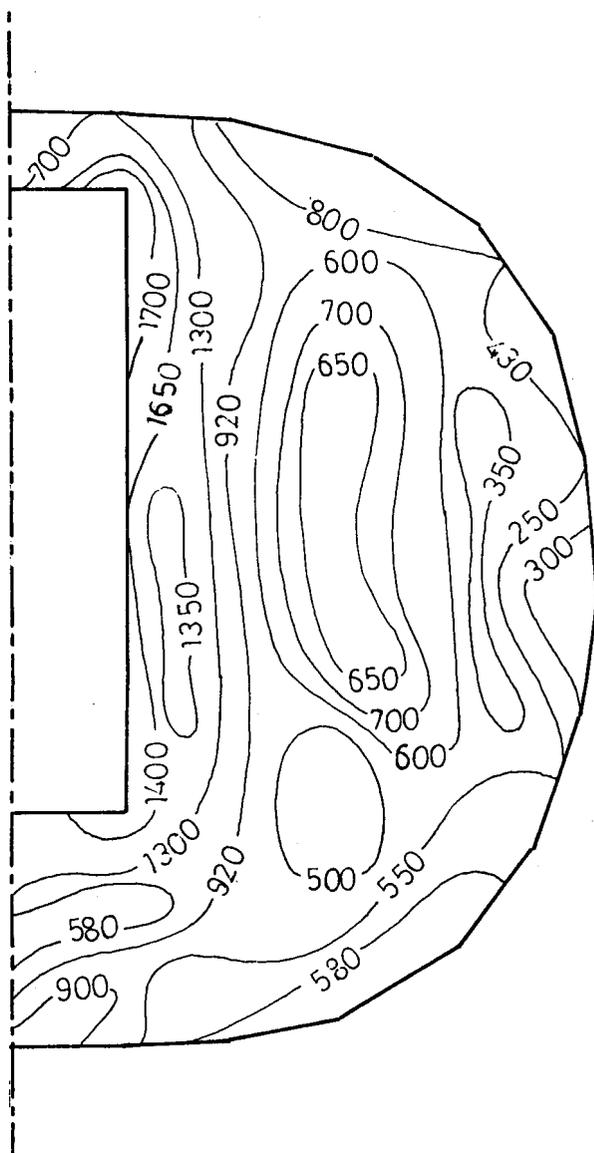


FIG. No.31 Mamparo con escotilla deformado

NIVELES DE ESFUERZO EN EL MAMPARO CON ESCOTILLA



Esfuerzo en unidades
de Kg/cm²

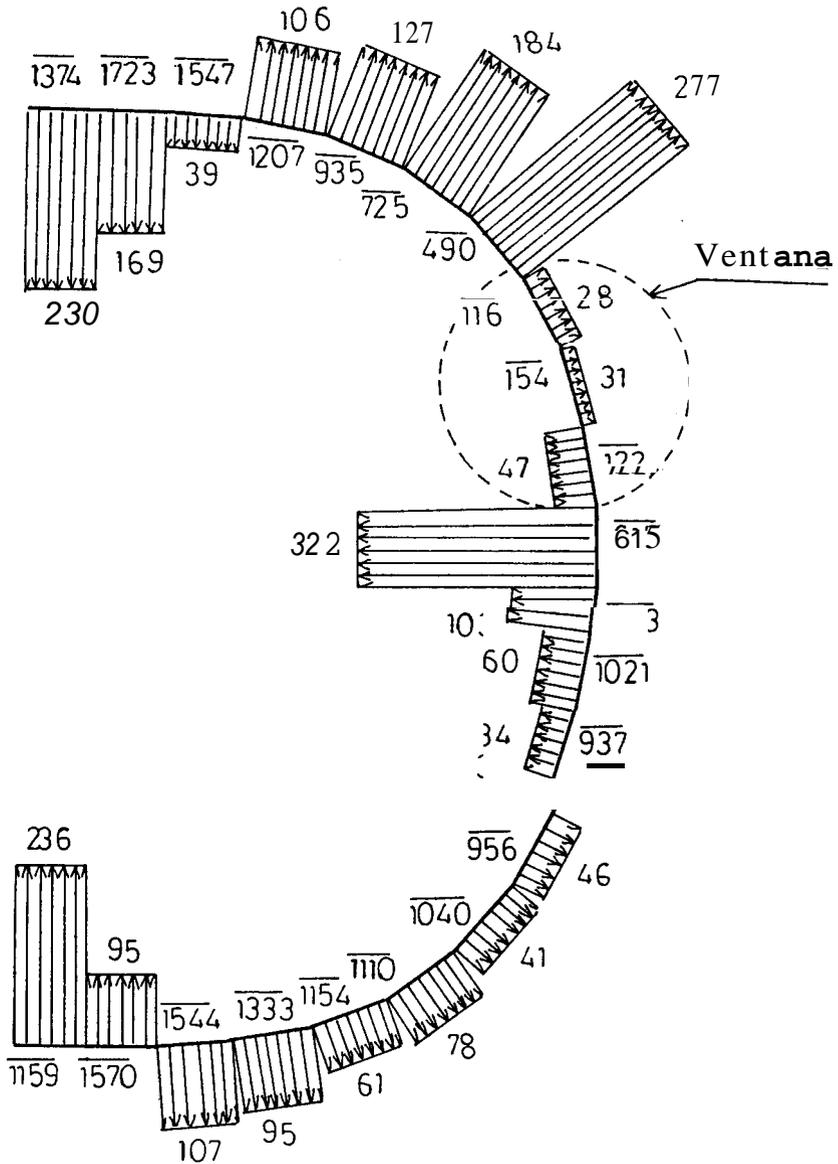
FIG. No.32

iv) Influencia de la ventana sobre el forro exterior.

El submarino turístico, de acuerdo a la referencia [9], posee ventanas diseñadas para resistir la presión hidrostática de trabajo, y con posible falla a la presión de destrucción. La resistencia a la ruptura por tensión del material de los bloques de las ventanas, están en el orden de 3200 kg/cm^2 , para un módulo de Young de $20E4 \text{ kg/cm}^2$, tomados de la referencia [9]. Para contrarrestar esta baja resistencia del material, se debe reforzar la zona alrededor de la ventana, refuerzos que producen discontinuidades en los niveles de esfuerzo del forro exterior, y por lo tanto, concentraciones de esfuerzo.

. En la Figura 33 se han graficado los esfuerzos cortantes y de compresión en los bordes para una fibra del forro exterior, sometida al impacto. La fibra contiene una ventana, donde se aprecia que los esfuerzos cortantes se incrementan en la zona alrededor de la ventana, ya que la misma contribuye muy poco a la resistencia estructural. Debido a la poca contribución de las ventanas, las cuadernas entre estas, absorben el esfuerzo de aquella zona.

NIVELES DE ESFUERZO EN UNA FIBRA DEL FORRO QUE INCLUYE UNA VENTANA



95: Esfuerzo cortante
 1239: Esfuerzo de compresión en los bordes del elemento
 * Ambos en unidades de Kg/cm²

FIG. No. 33

En la Figura 34, se muestra una cuaderna con su vagra transversal, deformadas por la acción de las cargas. En dicha Figura se han resaltado las zonas críticas, y el rango de esfuerzos criticos producidos por concentración de esfuerzos. Se muestra claramente que en la zona de la cuaderna entre las ventanas, se dá el pico más alto de esfuerzo de la estructura: **4000 a 5000 Kg/cm²** de compresión de la superficie del perfil de la cuaderna. Se va a producir ruptura del forro interior y del forro exterior en ésta zona a la presión de destrucción, al llegar los esfuerzos al límite del material. Este considerable incremento se produce por que la cuaderna absorbe la mayor parte de la carga transversal de la estructura. Cabe mencionar, que el forro interior, no contribuye mucho con la resistencia transversal. El forro interior trabaja satisfactoriamente en la resistencia a la compresión axial de la viga submarino, mencionado en el capitulo 11,, numeral 2.3.

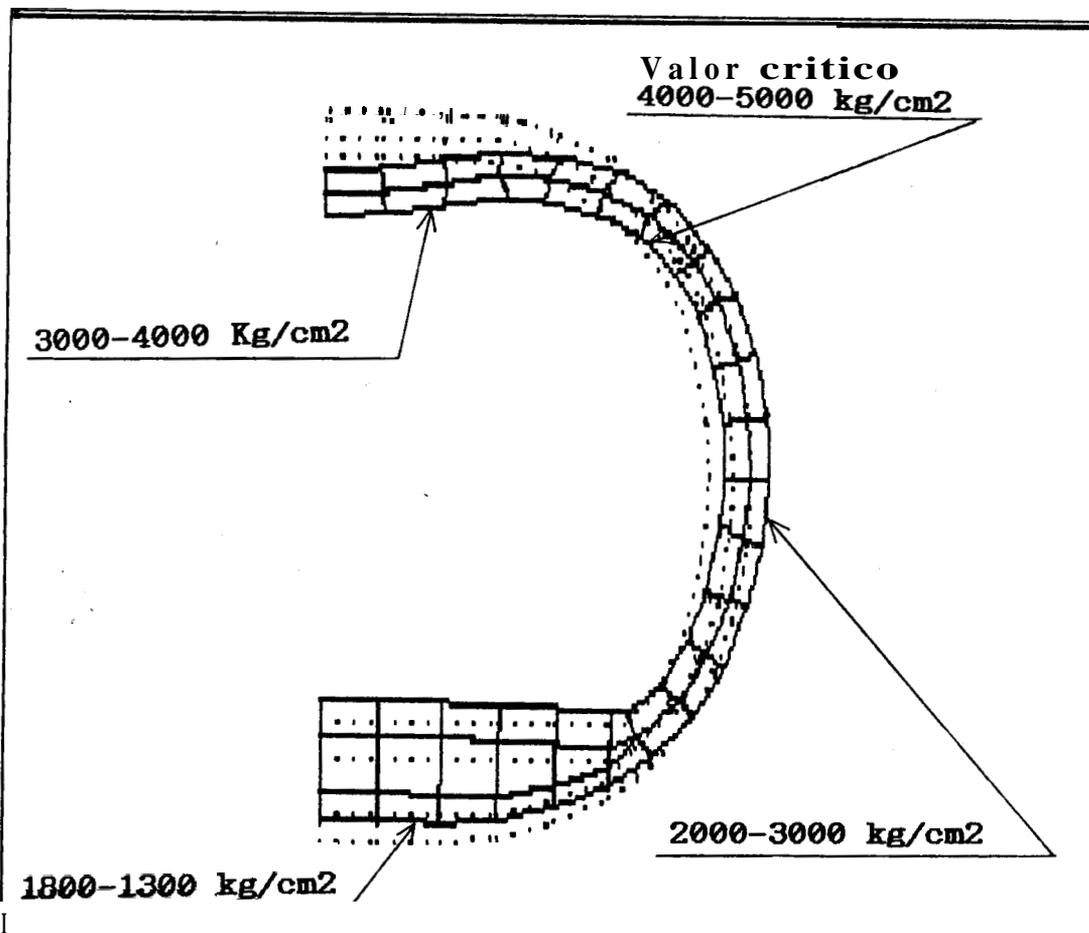


FIG. No.34 Esfuerzos criticos en una cuaderna entre ventanas

El análisis a nivel modular ha sido muy importante, ha permitido conocer las zonas exactas donde se **va** a producir la ruptura por excesivos niveles de esfuerzo. Estos niveles elevados ocurren sobre la superficie de la cuaderna hacia el forro interior afectando directamente a Qste último, efecto que no lo muestra el análisis global por las aproximacionee sobre el forro interior.

CAPITULO IV

ANALISIS LOCAL

El analisis modular, nos proporciona una idea completa del comportamiento del bloque estructural modelizado, bajo las cargas a considerar. **Pero** en aquellas zonas criticas, donde se excede el limite permisible de los esfuerzos, es esencial el analisis de las mismas a través del **uso** de elementos locales, para establecer los sitios exactos de la estructura que soportan dicha concentración.

4.1. Modelización de los elementos,

Se definen como elementos locales, los elementos que representan una zona especifica de la estructura, para estudiar como se produce la concentración de esfuerzos bajo las condiciones de trabajo, [6].

Los análisis global y modular de los capitulos anteriores, nos han mostrado las zonas criticas que

deberán ser modeladas en elementos locales. De esta forma, se considerarán los siguientes elementos locales:

- En la Figura 34, correspondiente al análisis modular, estan mostrados los niveles criticos para una cuaderna típica. La zona de la cuaderna que presenta el pico mds alto en el nivel de esfuerzo (**4000-5000 kg/cm²**) será modelada con un elemento local, al que se denominará Local 1.
- La base de máquinas se considerará como el elemento Local 2, ya que presenta dos condiciones críticas a la profundidad de destrucción. Su posición dentro de la zona crítica inferior del anillo del casco, mostrado en la Figura 6, y por lo visto en el capítulo I, numeral 1.3: es un montaje fijo, y soportará concentraciones extremas de esfuerzo.
- Las ventanas en el análisis modular, se han discretizado de la mejor forma posible para analizar como afectan a la estructura del casco. Pero siendo una zona tan compleja de diseño, es conveniente analizar las mismas a traves de un elemento local, que corresponderd al elemento llamado Local 3.

Definidas las zonas, se procede a modelar:

i) Elemento local 1.

Para confeccionar el elemento de la zona crítica de la cuaderna, es conveniente modelarla con una porción del forro exterior, para que la presión transversal del mar sea absorbida por la cuaderna. Y por condiciones de simetría se ha modelado la mitad del panel forro-cuaderna, como se muestra en la Figura 35.

Los elementos estructurales modelados con los espesores indicados en la Tabla 11, son los siguientes:

- Cuaderna con sus aligeramientos.
- Refuerzo longitudinal en L.
- Forro exterior.

Cabe destacar, que no se ha considerado el forro interior, porque de lo mencionado en el capítulo 3, numeral 3.3, no contribuye a la resistencia transversal en forma significativa como lo hace para la resistencia longitudinal.

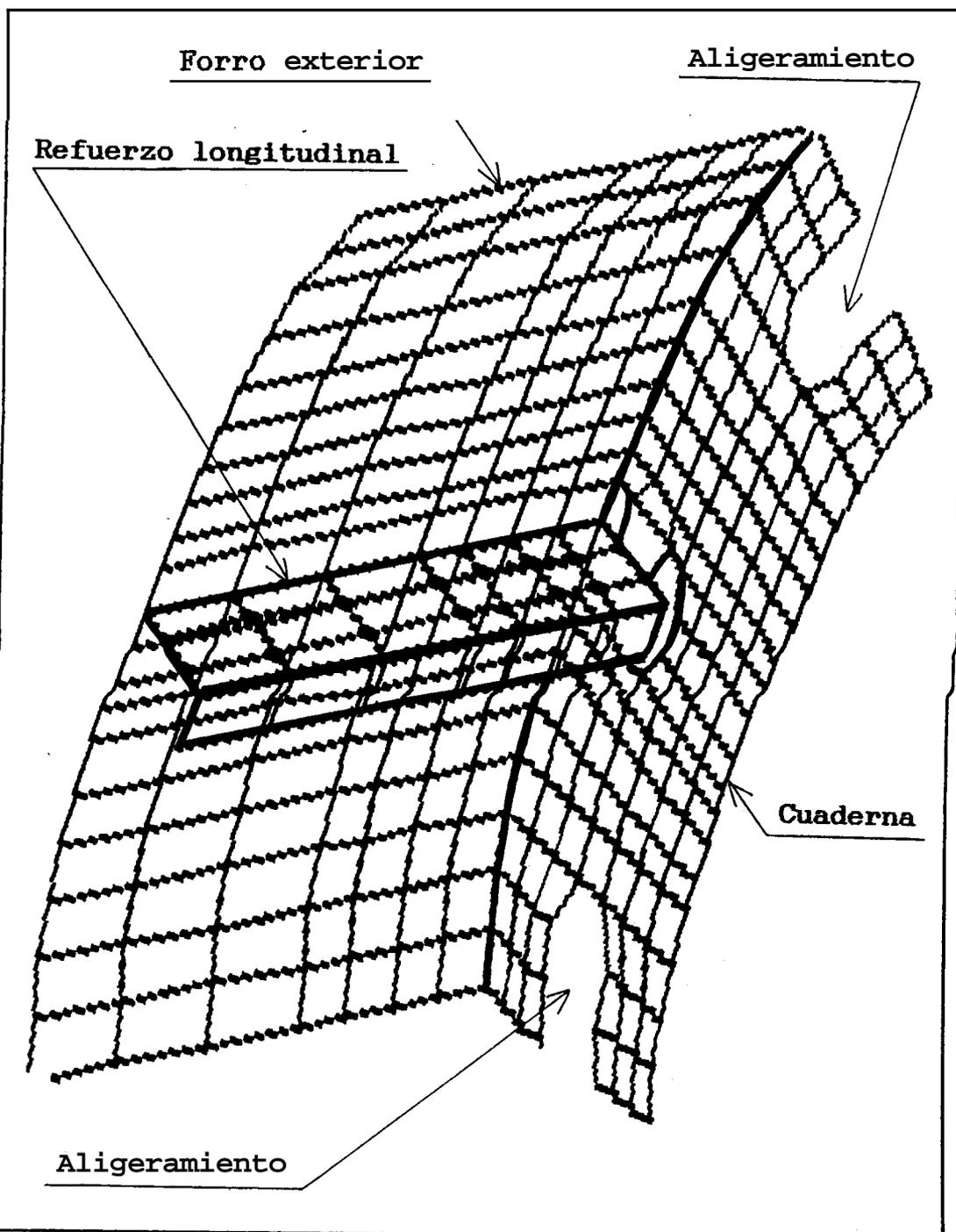


FIG. No.35 Elemento local 1 (vista General)

En la Figura **36**, se presenta una vista del plano de la cuaderna, donde se detallan los aligeramientos y cortes necesarios en la cuaderna para el paso de los longitudinales. Con todas estas consideraciones, en la discretización se han empleado los siguientes totales:

343 nodos.

294 elementos plancha.

Como se puede observar, la discretización es muy buena, y los elementos cumplen todos sus requisitos como: tener sus **4** nodos en el mismo plano y su razón de aspecto lo más cercano a 1.

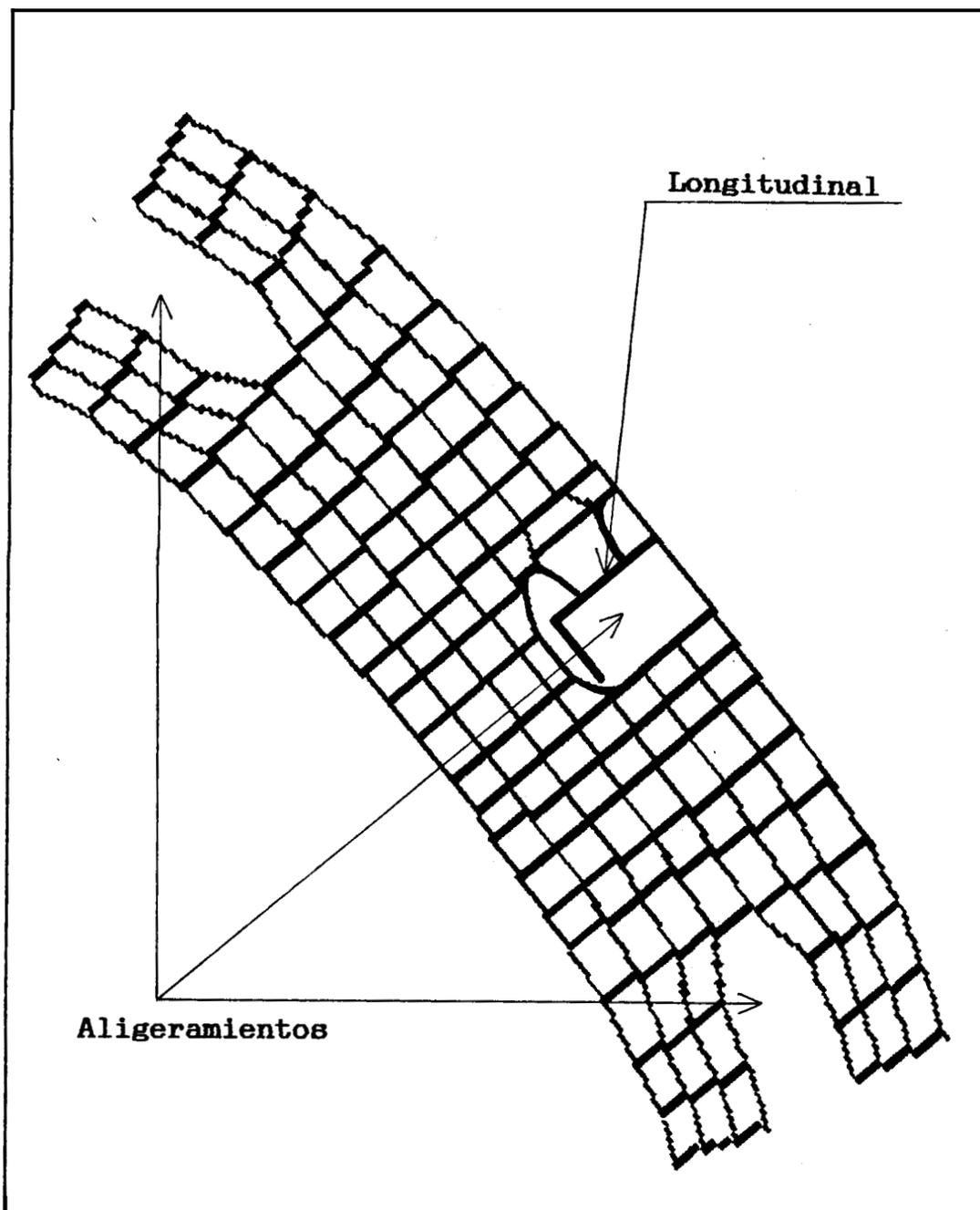


FIG. No.36 Elemento local 1 (plano de la cuaderna)

ii) Elemento local 2.

La base de máquinas, tomada del plano estructural 1, por condiciones de simetría se modelará únicamente como la cuarta parte del panel conformado por vagra transversal, forro exterior y base de máquinas propiamente. Así, en la Figura 37 se muestra que la base de máquinas como corresponde a un perfil en T, se presenta como un perfil en L.

En la Figura 38, se presenta el plano de la vagra transversal, donde se destacan los aligeramientos para el ala del perfil, y, el aligeramiento de la vagra sobre el forro exterior.

Igual que en el elemento 1, se han empleado únicamente elementos plancha con los siguientes totales:

423 nodos.

376 elementos plancha.

Con una buena discretización, y sin deficiencias en el elemento modelizado.

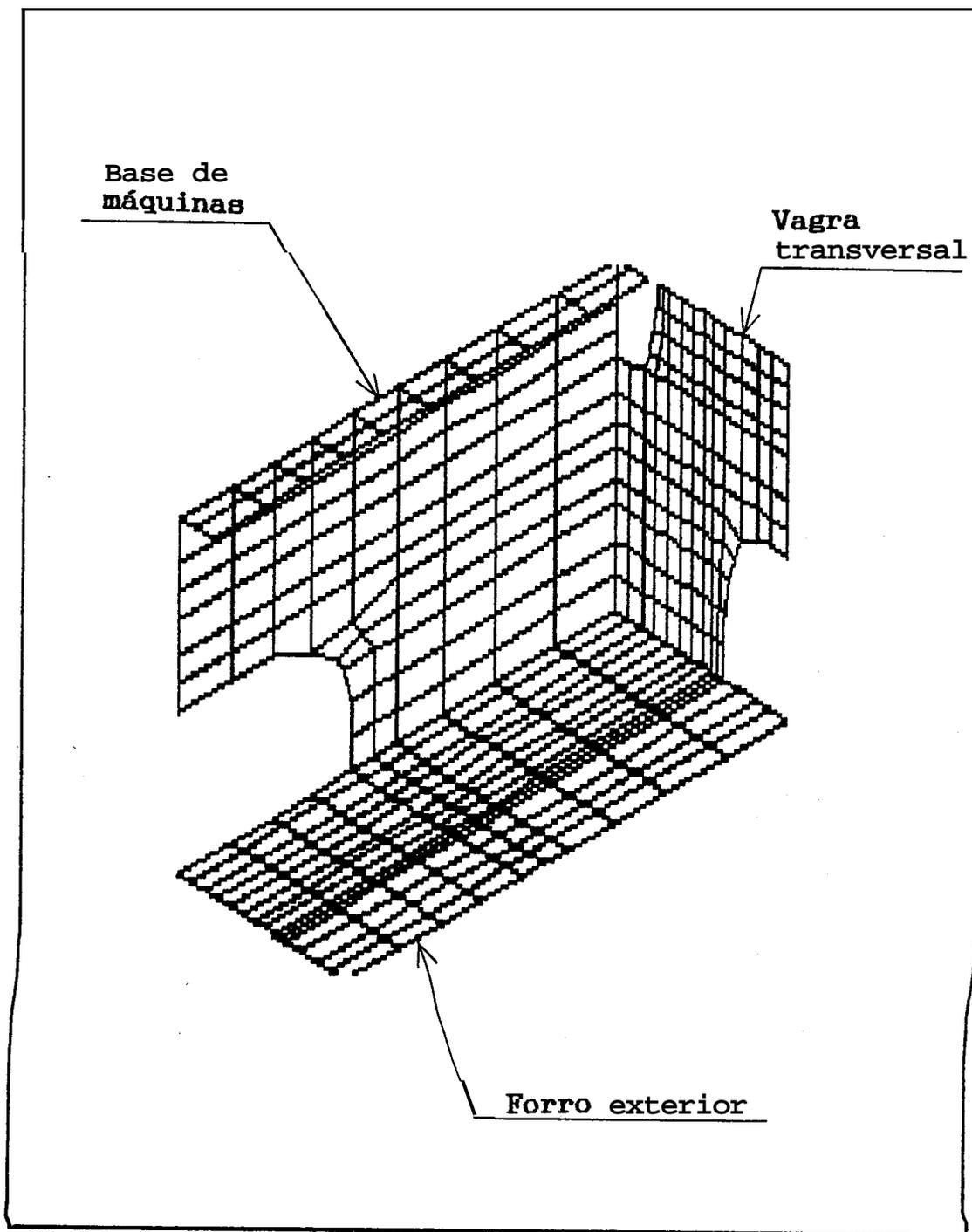


FIG. No.37 Elemento local 2 (Vista General)

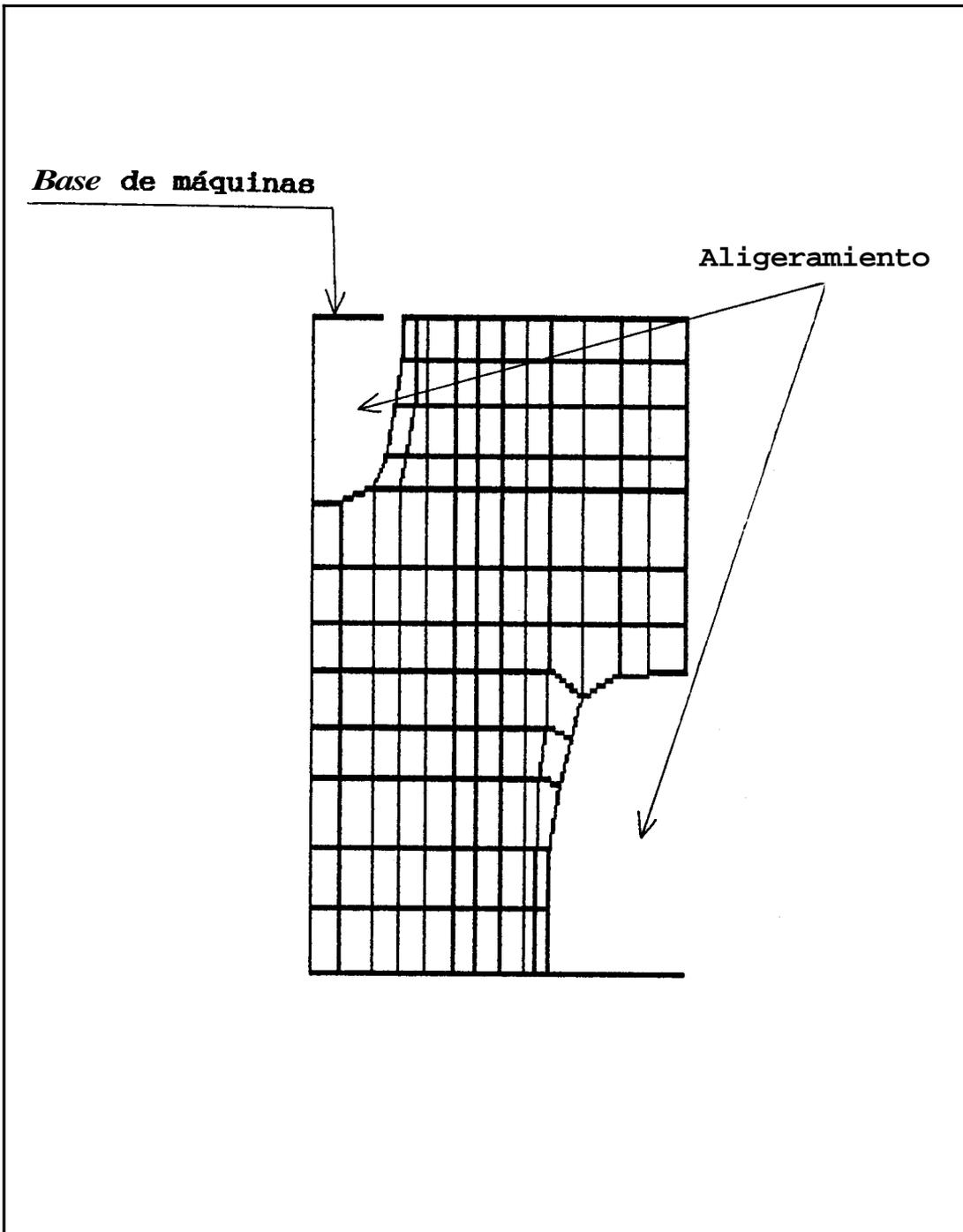


FIG. No.38 Elemento local 2 (plano de la vagra transversal)

iii) Elemento local 3.

Este elemento, por condiciones de simetría, se modela únicamente en su cuarta parte, como se muestra en la Figura 39. En cuanto a la modelización de los los elementos constitutivos de la ventana, se ha mantenido el criterio mostrado en la Figura 25, del análisis modular. Además se han añadido elementos como las placas estancas en el dobleforro, y las planchas superpuestas con las **que** se presan tanto el bloque exterior, como la plancha interior. Un mejor detalle de esto, se muestra en la Figura **40**.

En la discretización, se han considerado como elementos plancha las siguientes partes:

- Forro exterior.
- Forro interior.
- Platina de protección sobre el casco.
- Planchas estancas **del** dobleforro.
- Cuaderna.
- Platina del longitudinal.
- Plancha de acrílico interior de la ventana.

Y se ha considerado como elementos sólidos, al bloque exterior de la ventana, por lo definido en el capítulo anterior.

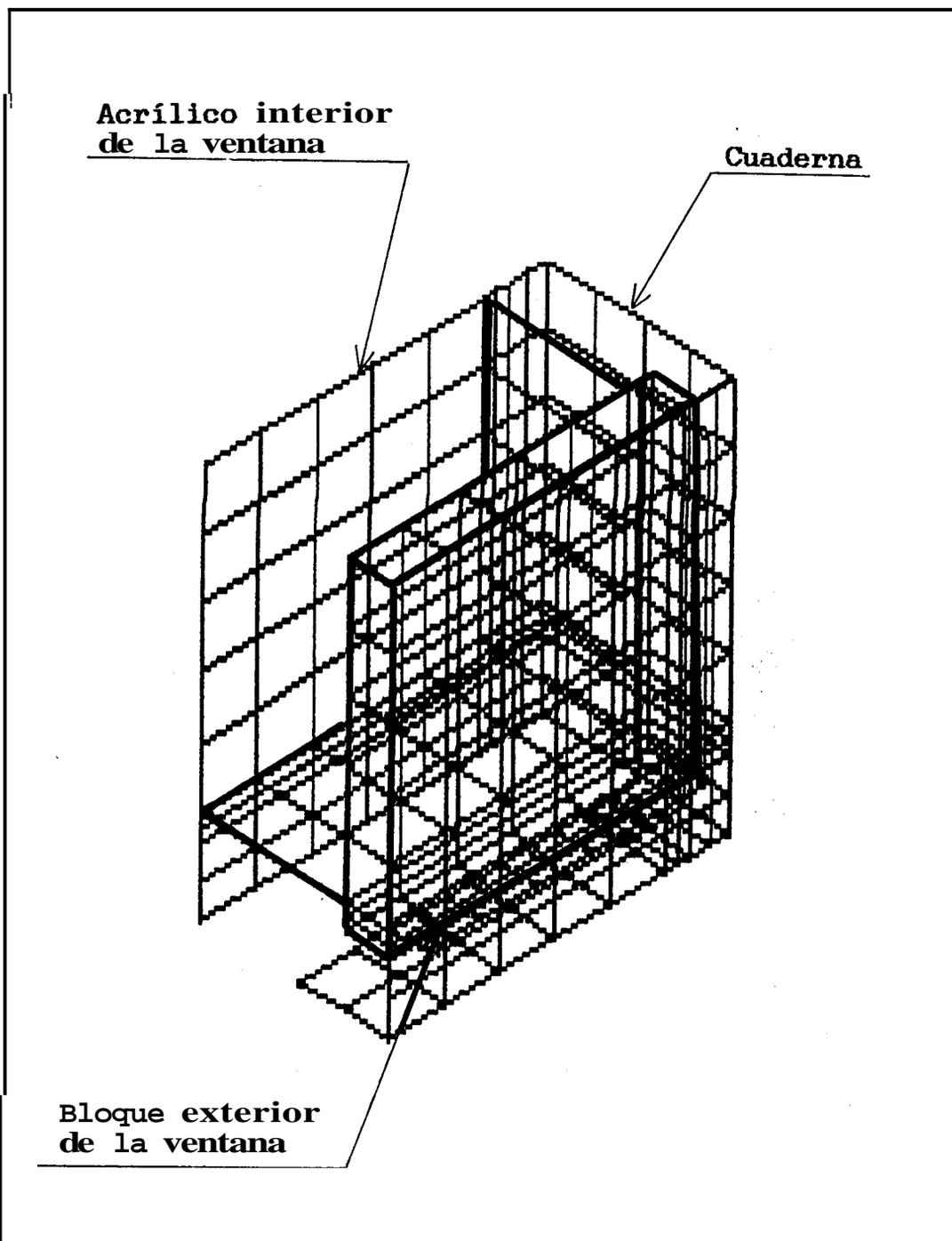


FIG. No.39 Elemento local 3 (vista general)

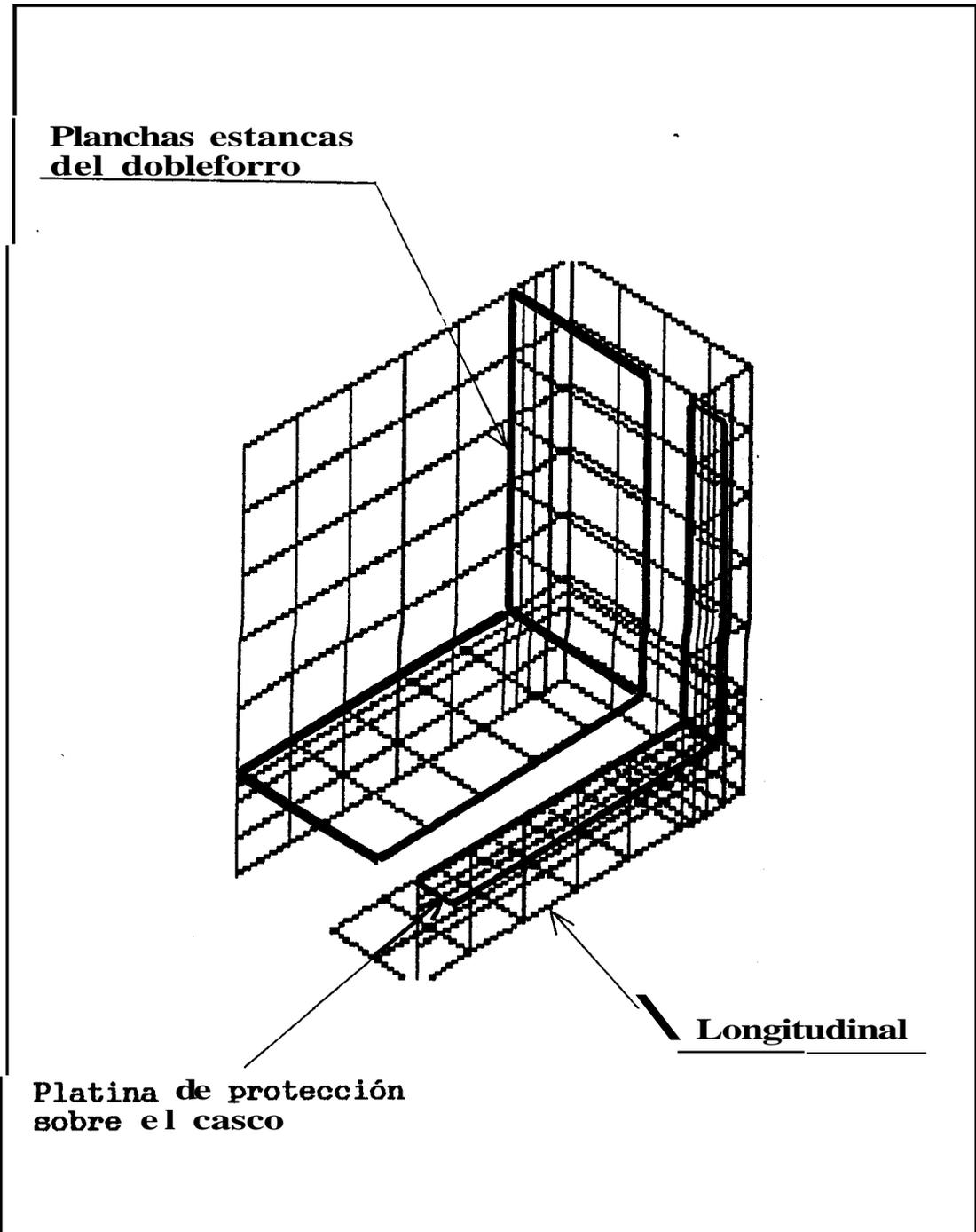


FIG. No.40 Elemento local 3 (detalle de los elementos constitutivos)

En la modelización se han empleado los siguientes
totales :

332 nodos.

313 elementos plancha.

36 elementos sólidos.

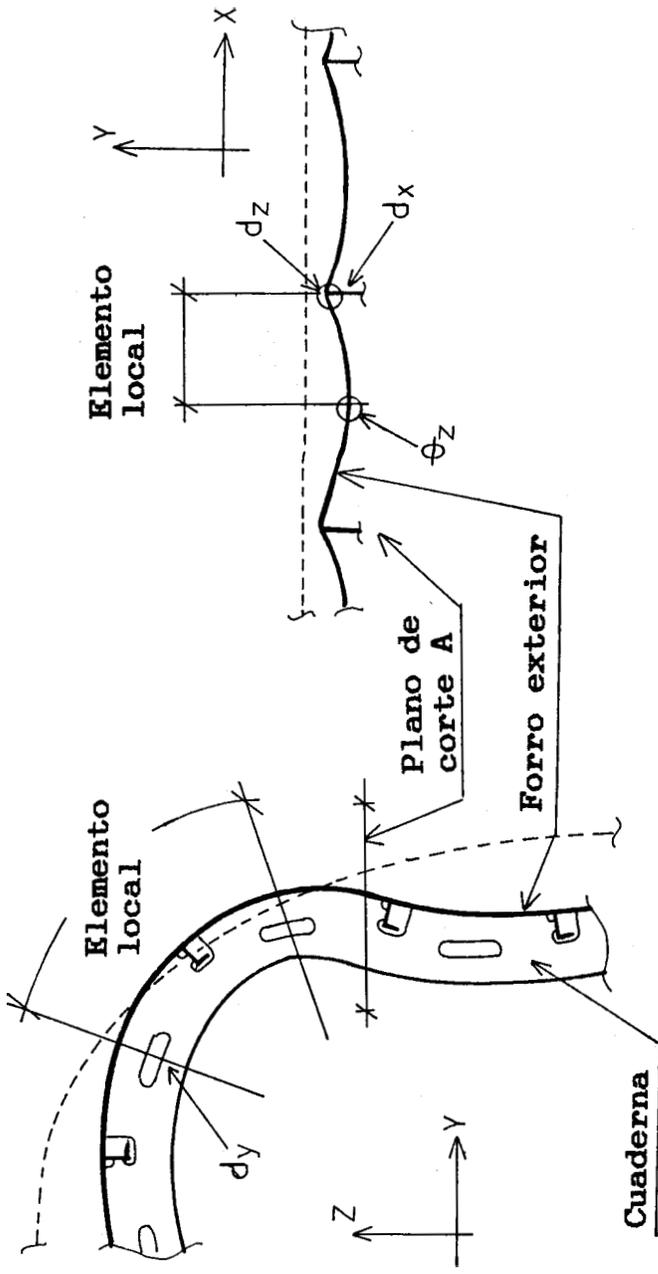
Como se puede observar, la discretización es buena, y al igual que los elementos anteriores, no presenta deficiencias en la modelización.

4.2. Definición de las condiciones de frontera.

En el análisis de elementos locales, más interesante que la aplicación de las cargas, es la definición de las condiciones de frontera. Los elementos locales con las restricciones correctas, deben presentar una deformación igual a los obtenidas en los análisis global y local.

Para cumplir con las consideraciones mencionadas, los elementos locales 1 y 3, van a restringirse de igual forma, por estar situados en iguales condiciones físicas en la estructura. Las restricciones a ser aplicadas, se muestran en la Figura 41, en la cual se presenta el perfil de deformación de la zona donde se localizan los elementos locales. El perfil de deformación comprende dos vistas: sección del anillo resistente, y el plano de corte A, que es una vista longitudinal del forro exterior. Cabe destacar, que para indicar la restricción de movimiento del cuerpo rígido, se ha usado δ para la dirección del subíndice, mientras que θ , es para la rotación.

CONSIDERACIONES PARA ESTABLECER LAS RESTRICCIONES DE LOS ELEMENTOS LOCALES 1 Y 3



- d: Restricción de traslación del cuerpo rígido.
- θ : Restricción de rotación del cuerpo rígido.

FIG. No.41

De la misma forma que en los elementos anteriores, para el elemento local 2, se presenta la Figura 42, donde se detallan las restricciones de la zona correspondiente a la base de máquinas. Cabe destacar que el ala del perfil que conforma la base de máquinas, se restringe su traslación respecto a crujía (dirección Y), porque siendo un montaje fijo a la máquina principal, no puede experimentar movimiento relativo horizontal. Esta restricción es la que posiblemente va a producir tensiones extremas en el elemento local.

CONSIDERACIONES PARA ESTABLECER LAS RESTRICCIONES DEL ELEMENTO LOCAL 2

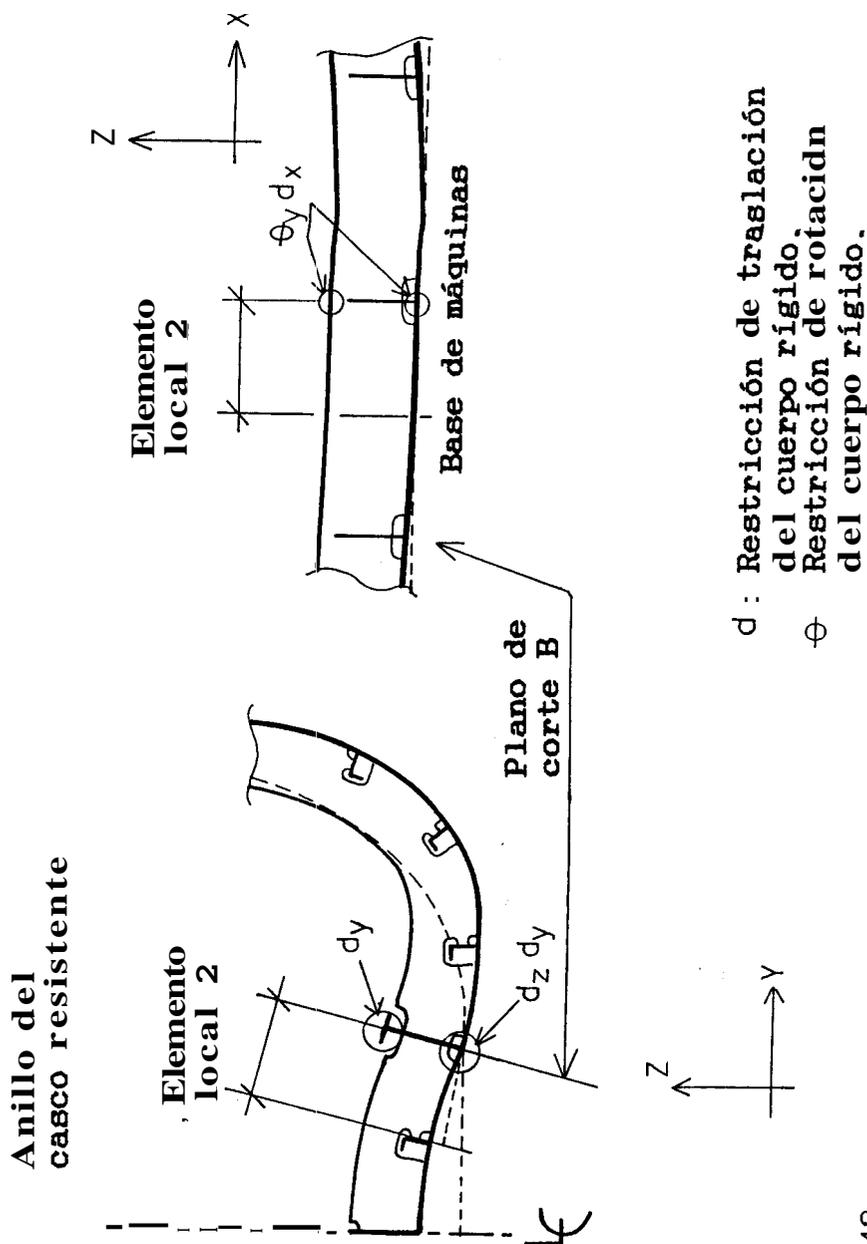


FIG. No.42

Definidas las condiciones de frontera, se proceden a establecer las cargas actuantes sobre los elementos.

La presión hidrostática es el primer tipo de carga, y se aplica sobre el **forro** exterior a la profundidad de destrucción, en los tres elementos.

El segundo tipo de carga a considerar, es la masa de la estructura de cada uno de los elementos modelizados, con la influencia dinámica de una aceleración de **34.81** m/seg², indicada en el capítulo I. Sólo en el caso del elemento 2, se le aumenta un peso adicional, que es la carga producida por el apoyo de la máquina principal en el ala del perfil de base de máquinas, Referencia [9].

El tercer **tipo** de carga, corresponde a las fuerzas de compresión en el plano del forro exterior. La compresión en dirección popa-proa, se la iguala al esfuerzo axial de la viga submarino. En la Figura 14 se muestran estos valores, que para los elementos 1 y 3, corresponden a la zona entre las cuadernas 21 y 22, de la fibra superior; y para el elemento local 2, a la carga en los extremos de **8** y **9** de la fibra inferior.

La compresión en dirección normal al eje proa-popa, se estima, como el esfuerzo de compresión en los bordes de los elementos plancha del forro, mostrado en la Figura 33. Estimación que se hace para la posición física donde se localizarían los elementos locales, y en el caso del elemento 2, a este valor se le resta el incremento producido **por** el impacto, dado en la Figura 28. Se hace ésta reducción porque en la zona real donde trabaja la base de máquinas, no influye dicha fuerza.

El cuarto y último **tipo** de carga, es la carga de compresión que sigue la dirección axial del plano de la cuaderna. Esta carga se considera igual al esfuerzo de compresión mostrado en la Figura 34, aplicada en los extremos de las cuadernas modelizadas.

4.3. Discusión de resultados.

Para el análisis, los comentarios sobre los resultados, se dividen de la siguiente forma:

- Para el elemento local 1:

i) Concentración de esfuerzos sobre el plano de la cuaderna

- Para el elemento local 2:

ii) Concentración de esfuerzos en la superficie de la base de máquinas.

- Y, para el elemento local 3:

iii) Principales concentraciones de esfuerzo en los elementos que conforman las ventanas.

i) Concentración de esfuerzos sobre el plano de la cuaderna.

En la Figura 43, se presenta el elemento local deformado, con el perfil de deformación como se esperaba. De la referencia [12], se sabe que el nivel de esfuerzo en las cuadernas es el segundo en importancia después de los mamparos, porque el anillo falla a la presión de destrucción. El autor de la referencia, nos recomienda que el esfuerzo crítico de la cuaderna, sea la suma algebraica de los esfuerzos de compresión y flexión de la misma. De ésta forma, los

niveles de esfuerzo obtenidos se presentan en la Figura 44.

La cuaderna absorbe un gran porcentaje de la resistencia a la compresión del anillo resistente. Pero, existen zonas donde el esfuerzo excede el valor de ruptura del material, que para acero de Alta tensión de la Referencia [5], está entre 5000 a 6000 kg/cm². Los esfuerzos de la cuaderna presentan picos de hasta 6900 kg/cm², en la zona de unión con el forro interior. La Referencia [12], recomienda que la cuaderna considerando un ancho efectivo y un esfuerzo de cedencia del material de 3550 kg/cm², la cuaderna colapse a una presión de 9.45 kg/cm². La presión de destrucción considerada es de 100 metros de profundidad 6 10.25 kg/cm², lo que indica que la cuaderna ya ha colapsado, justificando los niveles tan altos de esfuerzo en la superficie de la misma. Cabe resaltar además, que la introducción de condiciones de frontera incrementa los esfuerzos sobre el elemento, favoreciendo la presencia de estos picos. Así, una restricción que evita el movimiento vertical del cuerpo rígido, implica un esfuerzo en dirección contraria al movimiento virtual de deformación del cuerpo.

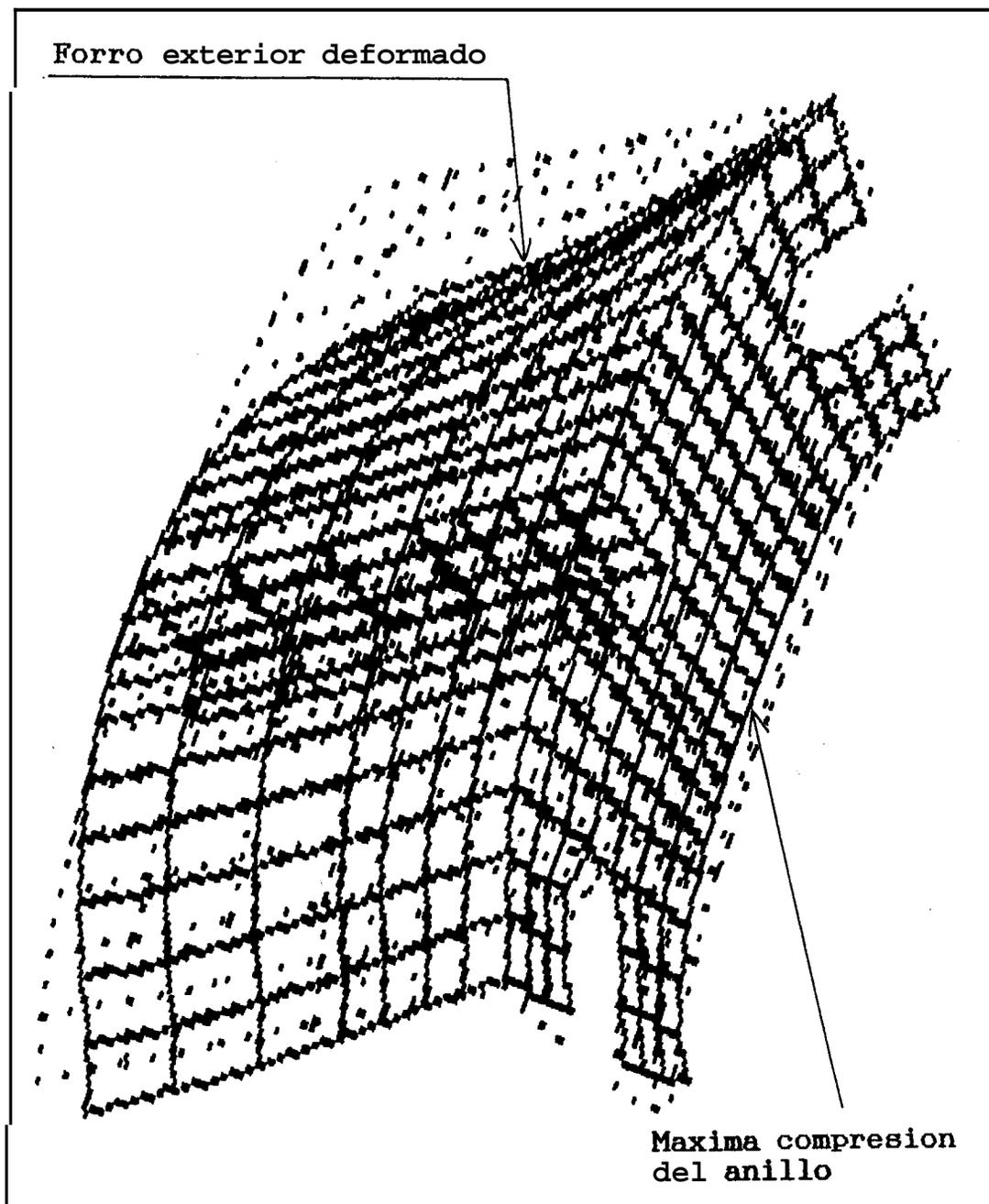
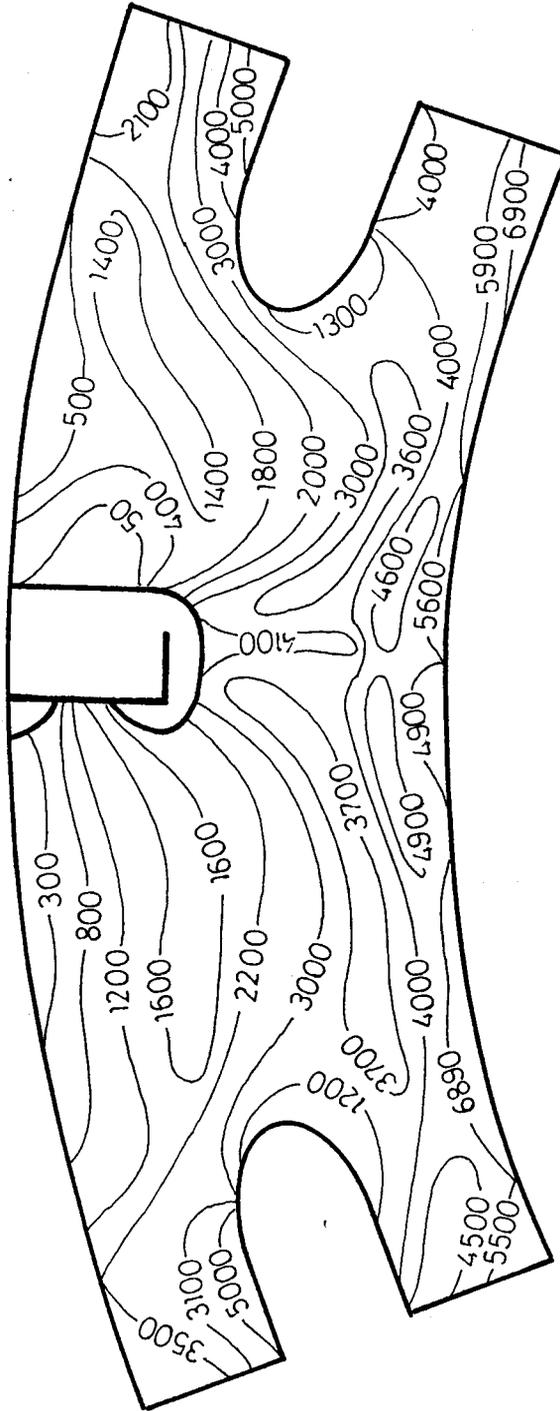


FIG. No.43 Elemento local 1 (deformado)

NIVELES DE ESFUERZO SOBRE LA CUADERNA DEL ELEMENTO LOCAL 1



Esfuerzo en unidades de kg/cm^2

FIG. No. 44

ii) Concentración de esfuerzos en la superficie de la base de máquinas.

En la Figura 45, se muestra al elemento local 2, deformado por la acción de las cargas con el perfil de deformación esperado, de acuerdo a lo presentado en la Figura 42.

En la Figura 46, se han dibujado las líneas de esfuerzo sobre la base de máquinas. En ella, vemos que la mayor concentración se produce en la zona del elemento donde se sujeta el motor principal. En esta zona, el valor del esfuerzo llega hasta los niveles de ruptura del material.

Resulta interesante destacar, que el programa calcula la deformación que tendría el elemento bajo las cargas, sin considerar si esa deformación se superpone a otros elementos del modelo. Esta falla se aprecia en la zona enmarcada como "Elementos montados", donde el ala de la base de máquinas se deforma tanto que ingresa al área de la vagra transversal. La deformación extrema del ala por el peso y las restricciones de la máquina principal, debería incrementar el esfuerzo por el contacto entre los dos elementos mencionados.

Elementos montados

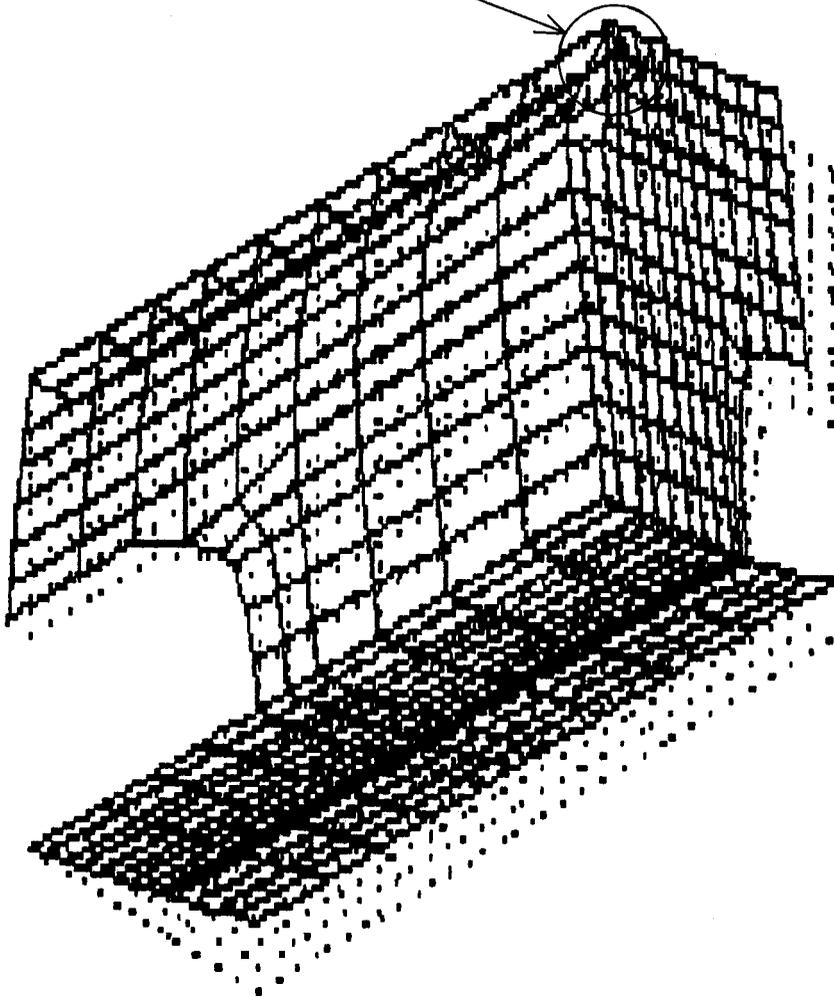


FIG. No.45 Elemento local 2 (deformado)

NIVELES DE ESFUERZO SOBRE LA SUPERFICIE DE LA BASE DE MAQUINAS

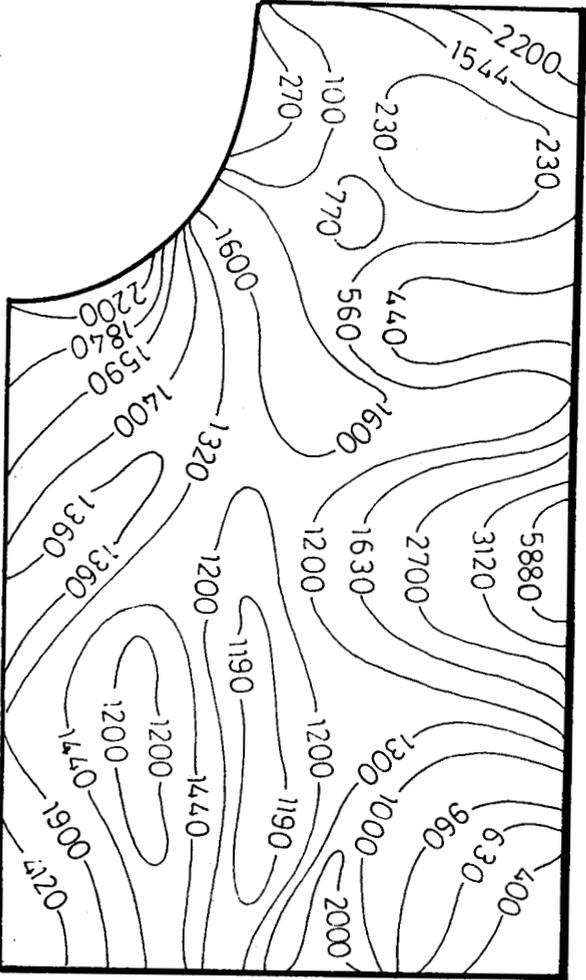


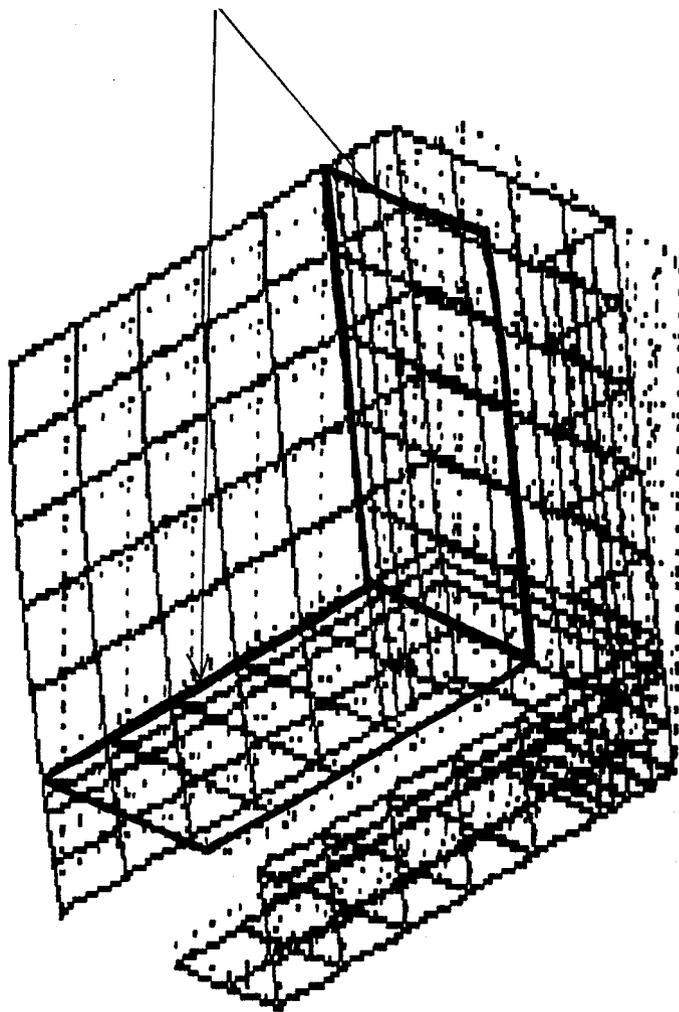
FIG. No. 46

Esfuerzo en unidades de kg/cm²

iii) Principales concentraciones de esfuerzo en los elementos que conforman las ventanas.

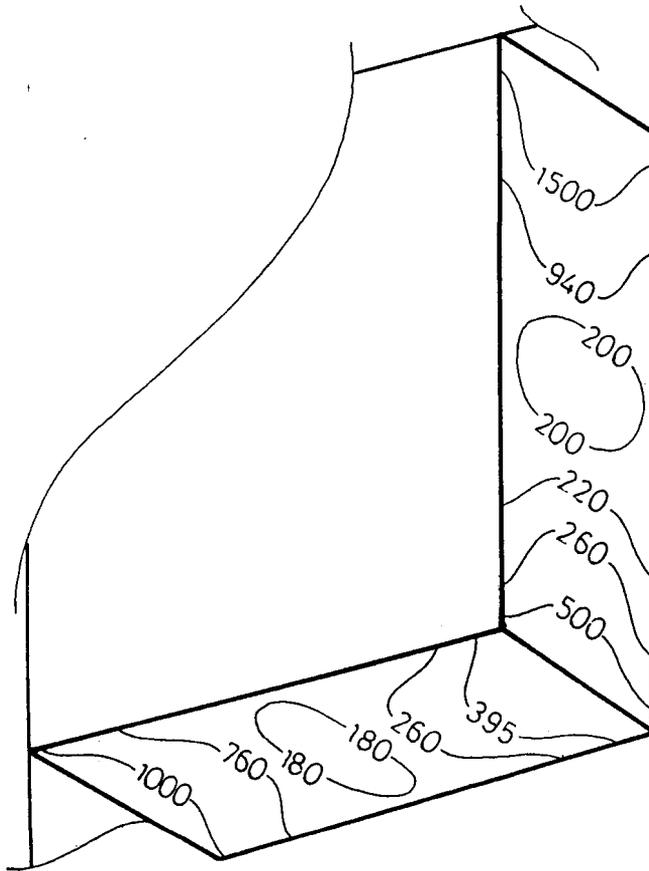
Las ventanas, se han confeccionado de forma exacta en cuanto a las dimensiones, características de los materiales, y elementos estructurales que la conforman. En la Figura 47, se muestra la deformación de los elementos del dobleforro, que refuerzan la ventana. Estos elementos son los que absorben la compresión y flexión del bloque exterior. De los resultados, se obtiene que las placas interiores del dobleforro son las que resisten el aplastamiento del bloque exterior debido a la presión del mar. Por esta razón, los niveles de esfuerzo de las placas del dobleforro (horizontal y vertical), se presentan en la Figura 48. Pero se ve que ninguno de los niveles de esfuerzo llegan al crítico, por la proximidad de la cuaderna. La porción de cuaderna modelada, se comporta de igual forma a los resultados presentados en el numeral i), absorbiendo los esfuerzos de compresión del anillo.

Placas del dobleferro deformadas



IG. No.47 Elemento local 3 (Algunos elementos constitutivos deformados)

NIVELES DE ESFUERZO EN LA VENTANA
(Placas del dobleforro)



Esfuerzo en unidades de kg/cm²

FIG. No.48

Los resultados obtenidos en los tres elementos locales, son satisfactorios. Resulta interesante resaltar, que la abundante y buena discretización de los elementos, produce curvas más continuas en cuanto a niveles de esfuerzo, y una mejor localización de las zonas donde se concentran los mismos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la modelización de la estructura se emplearon los elementos disponibles en el paquete **SAP80**, y se encontraron algunas limitaciones explicadas a continuación:

- 1.- La falta de elementos triangulares en la librería del programa **SAP80**, obliga a dejar vacíos en los modelos discretizados de la estructura. Esta es, a criterio del autor, la principal fuente de error en los cálculos. Como resultado se producen discontinuidades en los niveles de esfuerzo de los elementos del contorno, como se aprecia en las Figuras 19, 20 y 32. Se nota claramente que los valores de esfuerzo caen alrededor de los vacíos triangulares.
- 2.- En el modelo global, por la complejidad de la superficie de popa, algunos elementos "QUAD" no

tienen razón de aspecto cercana a 1.0, y además sus 4 nodos no están en el mismo plano. Los inconvenientes en mención son fuente de error, y producen discontinuidades en las graficas de niveles de esfuerzo como se aprecia en la Figura 14, que presenta la curva del esfuerzo axial en la zona de popa.

3.- La combinación de plancha-refuerzo representada con elementos planos, **es** la recomendable. Pero debido a las limitaciones en la modelización en cuanto a número de nodos permitidos, es necesario combinar diferentes tipos de elementos. La combinación de elementos plancha con refuerzos viga, disminuye la rigidez al modelo como se aprecia en la Figura 51, donde es necesario incluir el ancho efectivo del panel para aumentar la rigidez del sistema. Al combinar sólidos con planchas, se presenta el caso de que un elemento plano modelado de filo sobre una arista del sólido, se fija únicamente en los nodos de los extremos de la arista. Esto da lugar a que la rotación del elemento plancha, pueda ser diferente a la del sólido entre los dos nodos de la arista, perdiéndose resistencia estructural.

En la aplicación de las cargas, se tiene la siguiente limitante:

- 4.- Las cargas de lastre en los tanques del dobleforro, debieron considerarse como cargas concentradas en los nodos y no como cargas de volumen, de tal forma, que la carga no genera esfuerzos sobre el forro interior al comprimirse los tanques situados en el dobleforro.

Finalmente, del análisis de los resultados podemos concluir lo siguiente:

- 5.- Los resultados presentados por el programa SAP80 son una excelente referencia para el diseño, **pero** deben considerarse las limitantes en los cálculos del mismo. Por ejemplo, dado que no se puede analizar el posible pandeo de la estructura. **Los** niveles de esfuerzo en los mamparos con escotilla llegan a valores de inestabilidad estructural, y el programa no establece la forma como va a colapsar la estructura.
- 6.- En el análisis global, la presencia de escotillas en los mamparos, es fuente de error de acuerdo a las Figuras **20** y 32. La abertura modelada mayor a la real, favoreció el aplastamiento vertical del

casco. En cambio en el análisis modular, la deformación vertical calculada del casco es menor por el correcto dimensionamiento de la escotilla.

- 7.- Considerar al forro interior como parte de la cuaderna en el modelo global, es una aproximación que ha rigidizado mucho la estructura. Esto se puede concluir al comparar los resultados de las fases global y modular, puesto que la ruptura se va a producir en el forro interior de acuerdo a los resultados modulares.
- 8.- De los resultados de los modelos global y modular, **se** concluye que la forma no-circular del anillo del casco resistente no es muy recomendable para el submarino, debido a que favorece el aplastamiento vertical del anillo. Esta deformación no uniforme del casco, hace que sólo ciertas zonas del casco absorban todo el esfuerzo de la compresión.
- 9.- Con respecto al impacto, de los resultados modular y global, se concluye que la excesiva presión de destrucción, hace que la zona de influencia de la fuerza de impacto se mantenga de una forma local

sobre la estructura del submarino.

18.- El análisis local, es necesario porque permite establecer las zonas de concentración de esfuerzos, y los efectos de detalles constructivos como los aligeramientos presentados en la Figura 44. En dicha Figura, los esfuerzos producidos por los elementos longitudinales se transmiten a la cuaderna únicamente por la porción soldada.

11.- El análisis global, es importante porque da una idea completa del comportamiento de la estructura bajo las cargas totales, que no pueden ser representadas con módulos y elementos locales. Las cargas totales corresponden a la compresión axial de la viga submarino, y a la influencia de la distribución de masas sobre la estructura, cuando la estructura recibe el impacto y se acelera.

12.- De las tres fases del análisis, la que muestra mejores resultados es el análisis modular por dos razones: primero, considera un bloque con todos sus elementos estructurales, a diferencia del modelo global que debe hacer simplificaciones. Y segundo, contiene menos restricciones que generen

esfuerzos de borde como ocurre en el análisis local.

13.- Como era de esperarse, a la presión de destrucción la estructura sufre un colapso, y sólo en ciertas zonas llega a niveles de esfuerzo de ruptura. Esto indica que la presión de destrucción es la apropiada, y es muy poco el sobredimensionamiento estructural.

Se recomienda:

14.- Efectuar un estudio más detallado sobre las condiciones de pandeo de la estructura, y su influencia en el colapso, ya que el programa SAP80 no lo hace.

15.- Como se han encontrado condiciones críticas por el impacto de la estructura con el fondo, sería conveniente analizar lo que ocurre cuando la estructura bajo condiciones similares sufre golpes laterales.

A P E N D I C E S

Apéndice 1:

BREVES COMENTARIOS SOBRE LA LIBRERIA DE ELEMENTOS DEL PROGRAMA SAP80

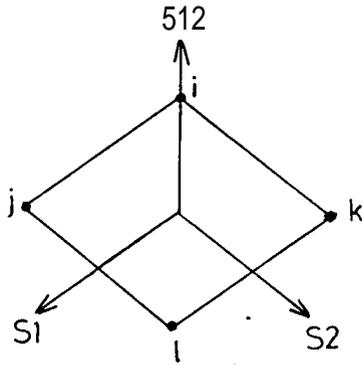
El programa SAP80, "Structural Analysis Program", es un programa de elementos Finitos en el cual se puede discretizar un modelo con los siguientes elementos:

- Elementos "QUAD".
- Elementos "FRAME".
- Elementos "SOLID".

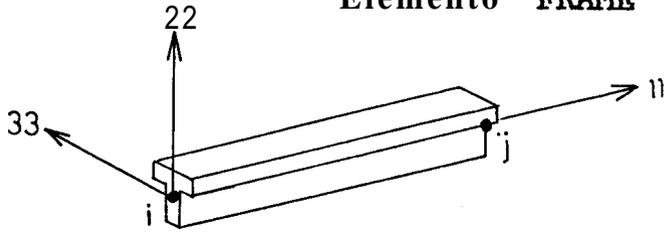
En la Figura 49, se muestran las direcciones locales y número de nodos que definen a los elementos. Los elementos "QUAD", requieren definirse con 4 nodos que se encuentren en el mismo plano. Se recomienda una razón de aspecto de sus lados lo más cercano a 1, esto es, lo más cerca a la forma cuadrada. Los elementos "FRAME", requieren definir dos nodos y muy especialmente los valores de la inercia de la sección sobre los ejes locales transversales. Los elementos "SOLID", se definen con 8 nodos, y su forma debe ser lo más cercana a un exaedro regular o cubo, para evitar distorsión en los resultados.

DIRECCIONES LOCALES USADAS POR LOS DIFERENTES
ELEMENTOS DEL PROGRAMA SAP80

Elemento "QUAD"



Elemento "FRAME"



Elemento "SOLID"

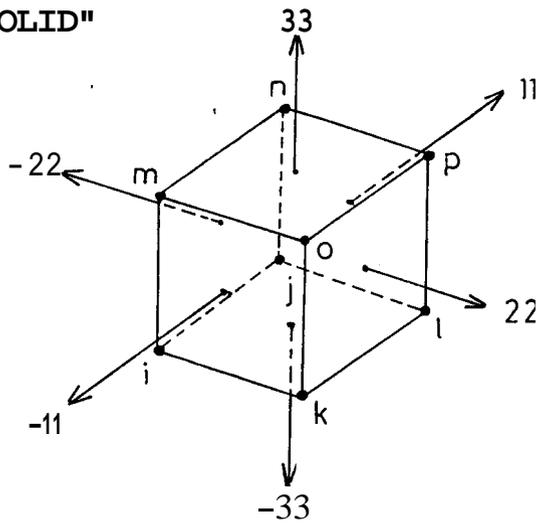


FIG. No.49

El programa, necesita de la confección de un archivo de datos, donde se definen las coordenadas globales en el espacio de los nodos (X,Y,Z), y los elementos con sus características físicas.

Además, se deben definir condiciones de frontera en cuanto a traslación y a rotación, de tal forma que se evite el movimiento del cuerpo rígido del modelo, en las tres direcciones globales.

Las cargas, se pueden definir como fuerzas concentradas en los nodos 6 como se explica a continuación:

- En los elementos **"QUAD"**: Presión normal y peso propio del elemento.
- En los elementos **"FRAME"**: Carga/longitud en los planos locales del eje axial de la viga.
- En los elementos **"SOLID"**: Presión normal sobre las caras del elemento.

En cuanto a la forma de presentación de los resultados, los archivos de resultados los muestran de la siguiente forma:

- En los elementos **"QUAD"**: Esfuerzos en las direcciones locales indicadas en la Figura **49**, y, Momento

alrededor de dichos ejes locales.

- **Los** elementos "FRAME": Fuerza de corte y fuerza axial en las direcciones locales, así como momentos flectores y torsores alrededor de los ejes locales.
- **Los** elementos "SOLID": Presentan Momento y esfuerzos sobre las 6 caras que definen al elemento.

Apéndice 2:

METODO DE CALCULO DEL ANCHO EFECTIVO A USARSE EN IDS ELEMENTOS VIGAS DEL MODELO GLOBAL

El diseño del submarino es de tipo unicasco, y el dobleforro, contribuye muy poco al casco resistente. Se pretende modelar el dobleforro en la cuaderna, como una viga empotrada de canto en el casco resistente. Para eso, se efectuarán pruebas, con dos modelos empleando elementos finitos. Cada modelo obedece a una zona equivalente del casco sometido a la presión de destrucción de 100 metros de columna de agua de mar. Uno de los modelos (modelo exacto), está formado por cuaderna, forro exterior, y forro interior, representados únicamente con elementos plancha. El otro modelo (modelo aproximado), considera el forro exterior modelizado con elementos plancha, y al forro interior y cuaderna, modelizado con elementos viga. El elemento viga, posee una sección como la presentada en la Figura 50: el ala inferior de tamaño igual al forro interior, el alma como la cuaderna propiamente, y el ala superior de ancho igual al ancho efectivo del refuerzo.

CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO APROXIMADO

Modelo exacto

Forro exterior

Cuaderna

Forro interior

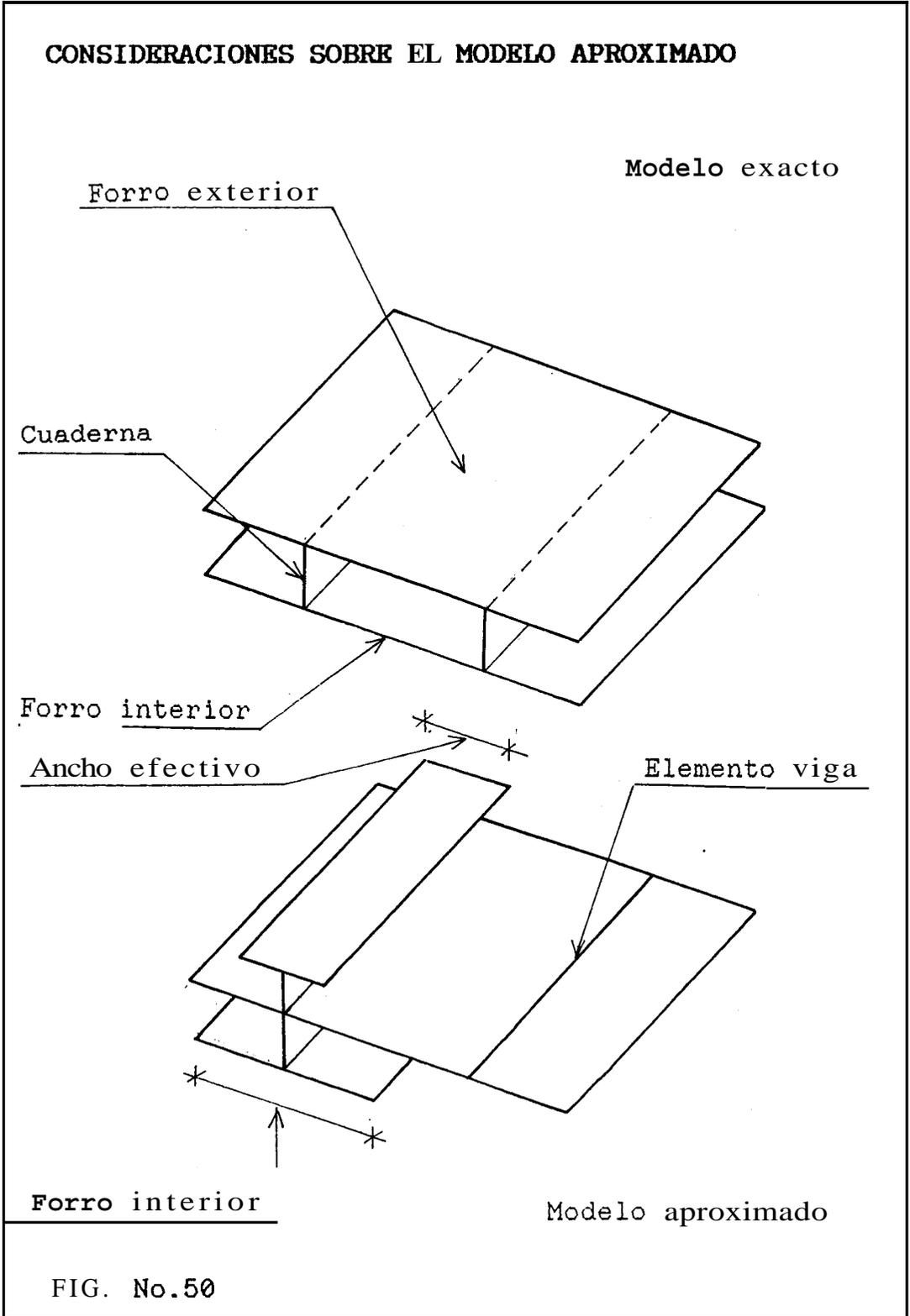
Ancho efectivo

Elemento viga

Forro interior

Modelo aproximado

FIG. No.50



Con las condiciones de simetría y de continuidad del panel, se aplica la carga hidrostática de destrucción al modelo aproximado. Se efectúan algunas pruebas, variando el ancho efectivo del ala superior de la viga en el modelo aproximado, de lo cual, para cada prueba se obtienen valores de esfuerzo máximo y deformación máxima del planchaje del forro exterior. Estos valores de deformación obtenidos, se presentan en la Figura 51, donde se grafica Deformación vs Ancho efectivo. El correcto ancho efectivo, entonces va a corresponder al que presente igual valor de deformación que el modelo exacto, que ha sido sometido a iguales condiciones de carga.

Del gráfico, para la solución señalada, las relaciones de esfuerzo - deformación para ambos modelos son las siguientes:

- En la zona de mayor flexión, la deformación presenta:

$$\text{Modelo aproximado/modelo exacto} = 1.00$$

- En la zona de mayor flexión, el esfuerzo presenta:

$$\text{Modelo aproximado/modelo exacto} = 0.898$$

Valores que consideran el ancho efectivo de 10.02 cm, señalado en el gráfico.

CALCULO DEL ANCHO EFECTIVO

Comparacion a nivel de deformacion

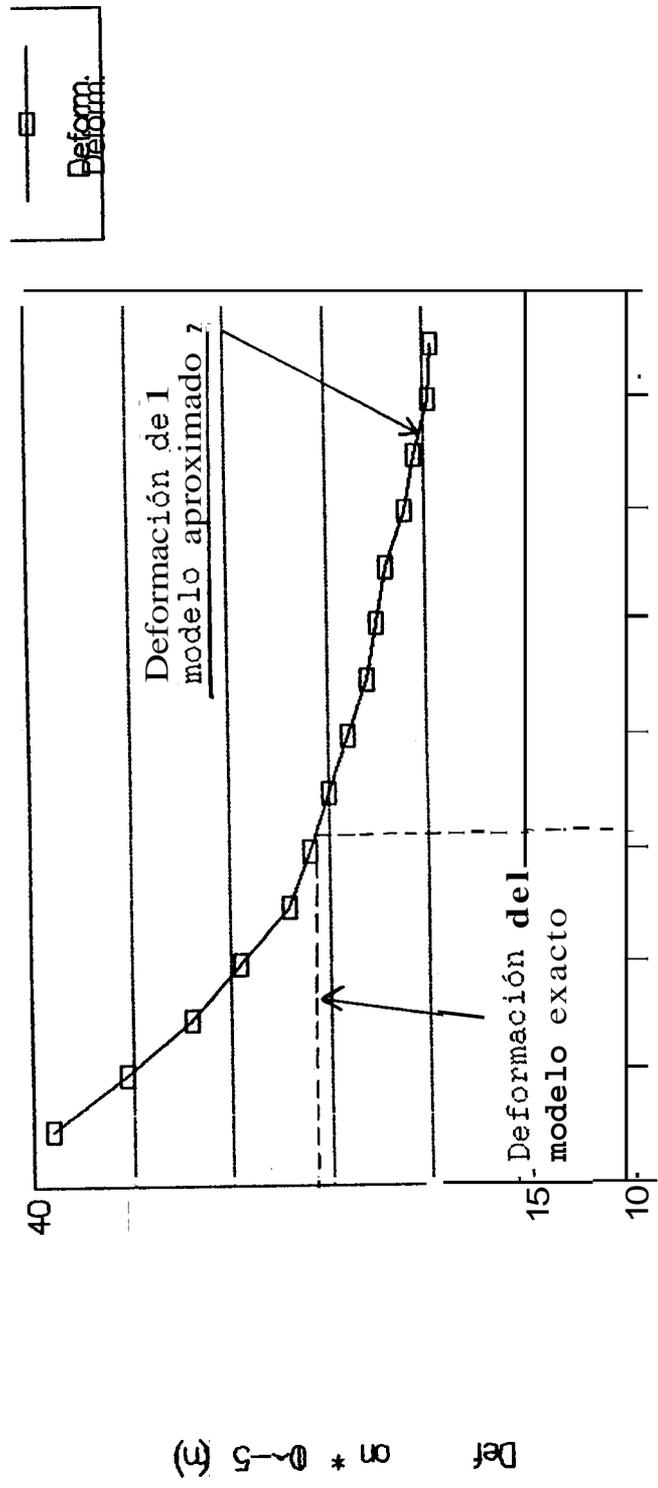


FIG. No. 51

Este valor de ancho efectivo, se lo puede comparar con las fórmulas de la Referencia [3], que recomienda los siguientes anchos efectivos para el forro exterior:

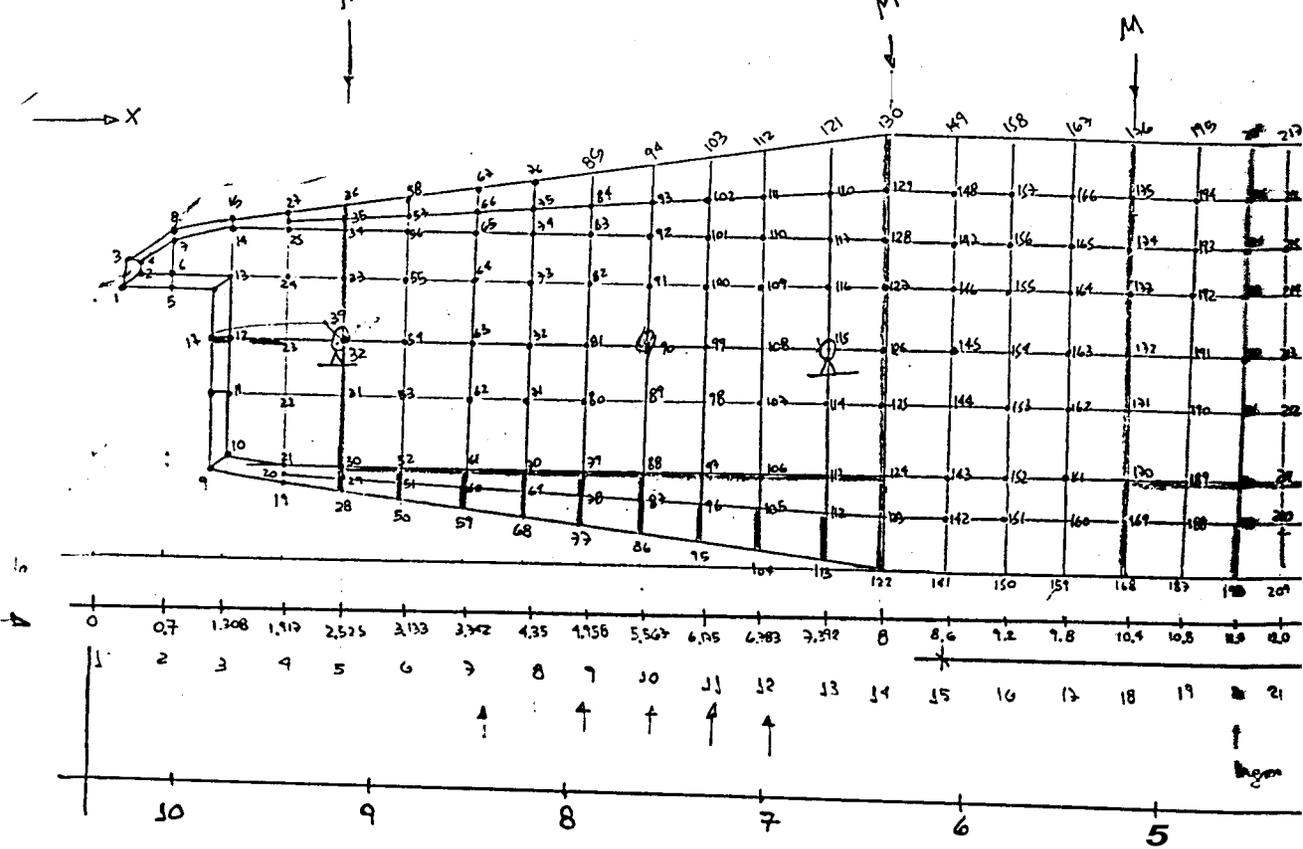
- Bureau Veritas: 14.4 cm.
- Las curvas del Ing. A. Shade: 11.7 cm.

De las cuales, se tiene que el valor de ancho efectivo obtenido con el modelo aproximado, es satisfactorio.

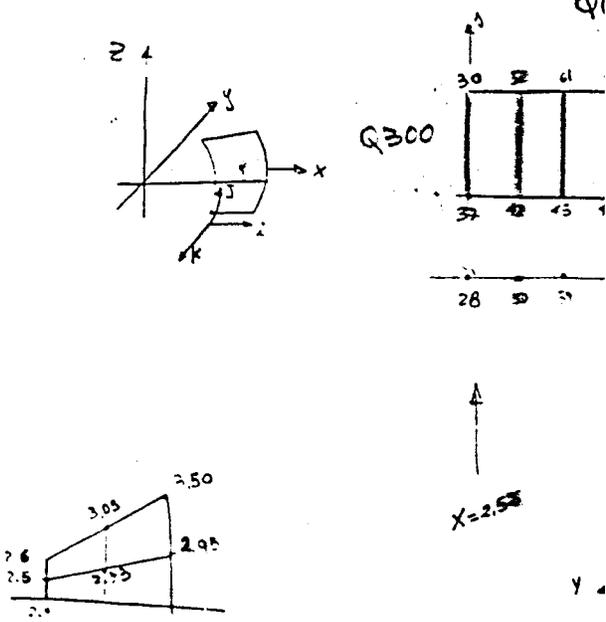
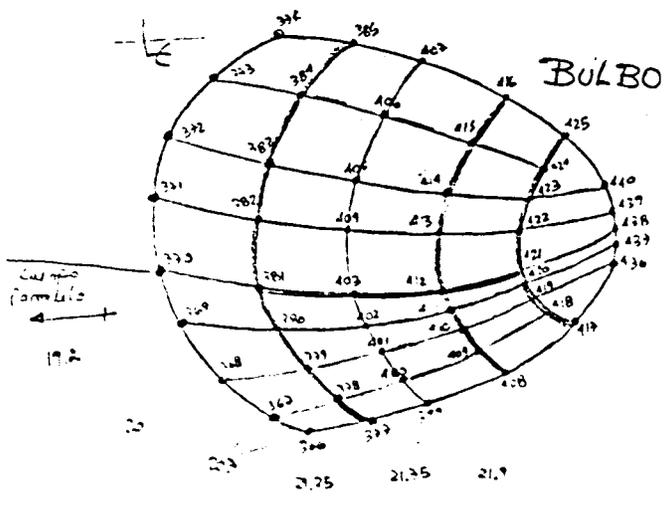
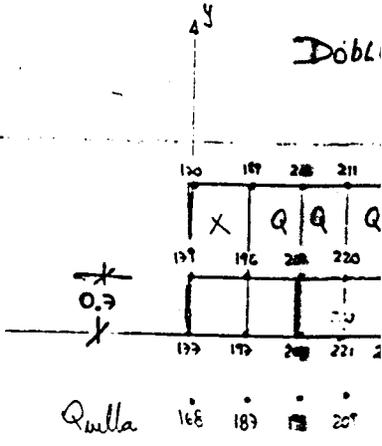
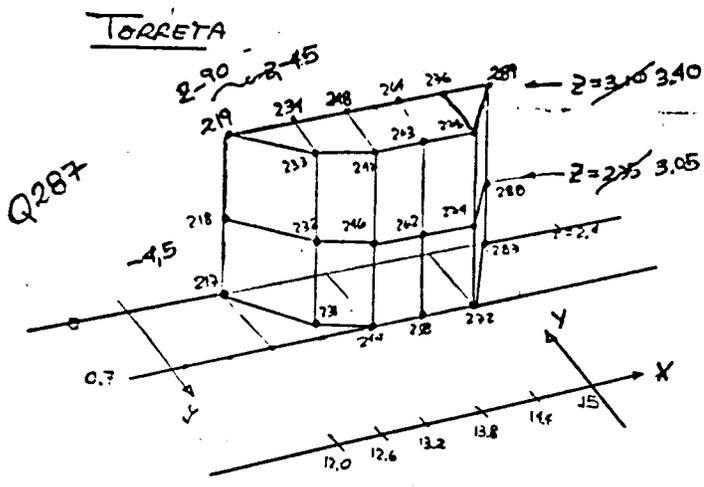
Apéndice 3:

BOSQUEJO EMPLEADO PARA LA DISCRETIZACION DEL MODELO GLOBAL

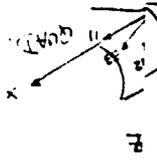
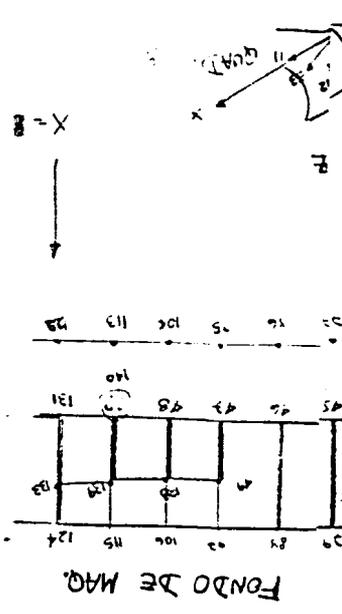
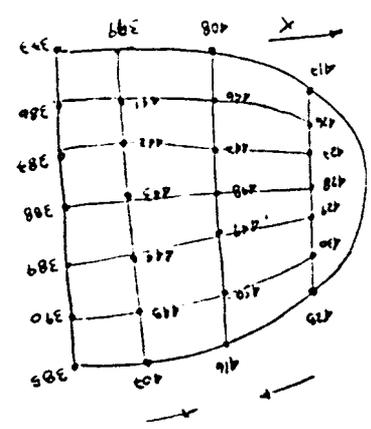
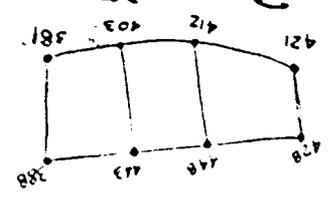
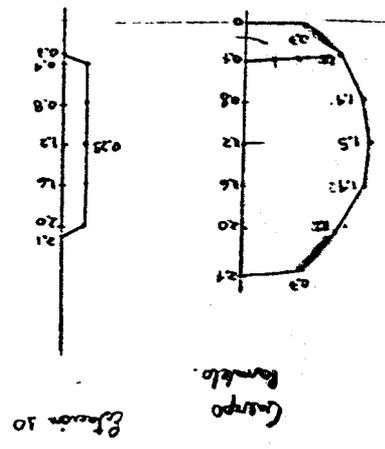
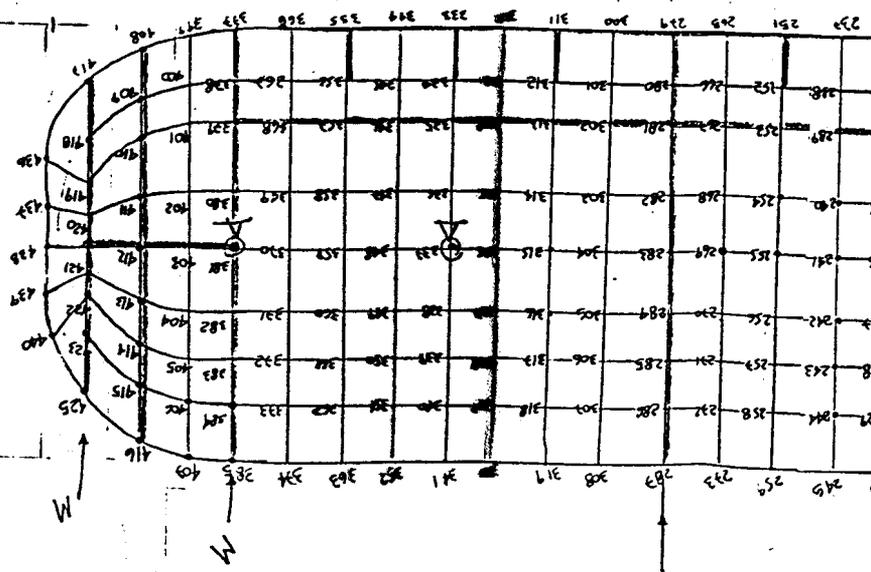
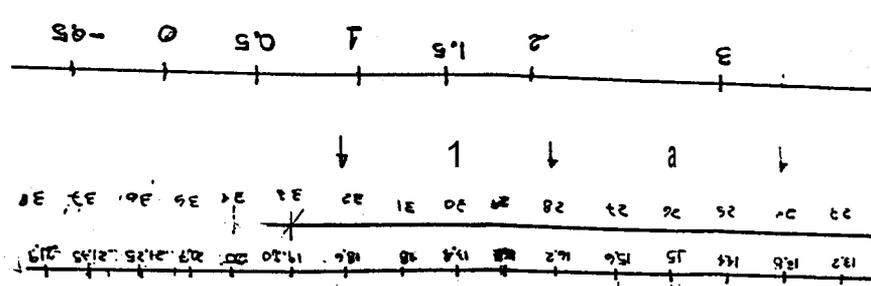
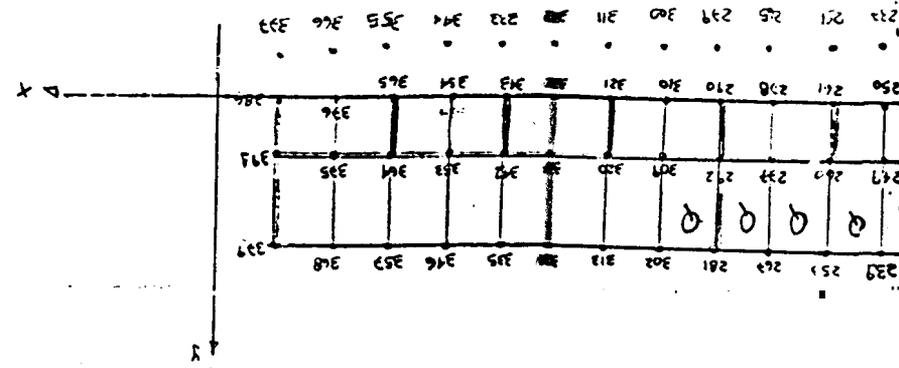
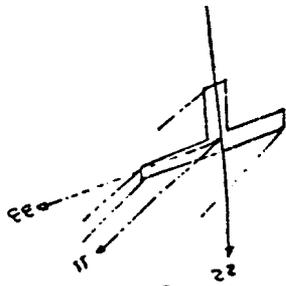
A modo de ejemplo, se presenta el bosquejo de la discretización usado para confeccionar el archivo de datos del modelo global.



E
M



BOSQUEJO O TRAZADO DE LA DISCRETIZACION DEL MODELO GLOBAL (borrador)



BIBLIOGRAFIA.

- 1.- BENSON, John, Análisis Elemental de Estructuras. Madrid-España, Ediciones del Castillo S.A., 1969.
- 2.- COMSTOCK, John, Principles of Naval Architecture. New York: SNAME, 1988. pág 209-219
- 3.- DOMINGUEZ, Martin, Cálculo de Estructuras de Buques. Publicaciones de la ESPOL.
- 4.- FORNONS, José, El Método de los Elementos Finitos en la Ingeniería de Estructuras. España: Marcombo Editores, 1982.
- 5.- GABLER, Ulrich. Construcción de Submarinos. Editorial San Martín, 1964.
- 6.- HUGHES, Owen F., Ship Structural Design (A Rationally - Based, Computer - Aided, Optimization Approach). New York: SNAME, 1988.
- 7.- MARIN, José R., Esfuerzos en la estructura de una embarcación pesquera usando el Método de Elementos Finitos. Revista de Ingeniería de la Sociedad de Ingenieros del Litoral, Octubre de 1993.
- 8.- PRITZLAFF, John, International Safety Standard Guidelines for the operation of Tourist Submersibles New York: SNAME, 1991.
- 9.- TOWNSEND, Patrick R., Diseño Preliminar de un Submarino de servicio Turístico para las Islas Galápagos. Proyecto de la materia Diseño Naval I,

Facultad de Ingenieria Maritima y Ciencias del Mar.
ESPOL, Guayaquil, 1992.

- 10.- WILSON, Edward L., SAP80 (Structural Analysis Program) Users manual. Berkeley, California, 1986.
- 11.- WILSON, Edward L., SAPLOT Users's manual. Berkeley, California, Inc Company California, 1986.
- 12.- WILLIAMS, Jackson Capt, Fundamentals of Submarine Concept design, New York: SNAME Transactions, Vol. 100, 1992. pág. 419-448.