Charla 6 de construcción naval

Tema XXXIV: Nociones de resistencia de materiales (¡Arduo tema...!)

1ª Parte

"¡Estudia! No para saber una cosa más, sino para saberla mejor". Lucio Anneo Séneca (2 a.C.-65 d.C.); filósofo latino.

Capitán Isidore Caubin: Todas las piezas que componen un navío, deben ser calculadas y debemos saber *"que resistencia poseen"*, para el trabajo o para la presión a la que van a ser sometidas en la practica. Si no es así, nos arriesgamos a que *"rompan".* Tenemos pues que saber calcular la resistencia

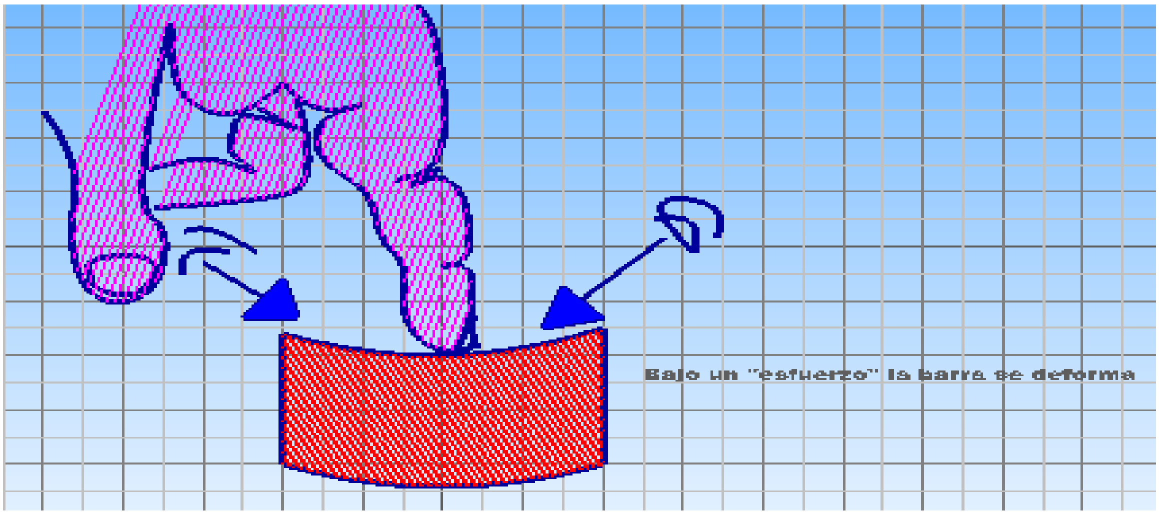

Figura XXXIV.1.1: La materia se deforma cuando se ejerce una présión sobre ella...

de todos los elementos que compongan nuestro casco. Lógicamente si colocamos una nevera en nuestro casco, no tenemos necesidad de calcular la resistencia de su estructura y damos como *"bueno"* el cálculo efectuado por los ingenieros que la concibieron. Pero no será lo mismo si se trata de una varenga o de un forro...

Simbad: Pero esto es muy difícil, capitán, ya que hay piezas verdaderamente complicadas...

Capitán Isidore Caubin: Es cierto, pero por eso mismo tendremos que descomponerlas y hallar *"la resistencia de cada uno de los trozos",* para hallar su resistencia total. Cuando queremos doblar con las manos una barra, vemos que resiste (¡Aunque sea de chocolate!)

Figura XXXIV.1.2: Las piezas que componen un buque pueden ser complicadas...

Para ello tendremos que empezar por saber como hallar la resistencia de elementos simples que componen estas piezas complicadas, que como tu dices lo pueden ser y mucho...

Simbad: Pero entonces ¿Por donde empezamos?

Capitán Isidore Caubin: Empezaremos por estudiar lo que ocurre cuando doblamos *"la barra de chocolate"*. A una barra o a una viga hay que verla como si estuviese compuesta de *"millones de pequeñas fibras longitudinales microscópicas"*. Una barra sometida a una tensión bajo una carga creciente, manifiesta al principio un pequeño *"estiramiento"* y al final se rompe (¡Si tenemos bastante fuerza!). Bajo una carga o fuerza de tracción F, inferior a la que provocaría la ruptura, cada fibra de la barra reacciona con un *"esfuerzo de tracción"* y la suma de estos esfuerzos de tracción en una sección transversal de área s, se opone a la fuerza de estiramiento. Esto quiere decir (como hemos dicho), que tenemos que suponer la barra como compuesta de *"una serie de fibras"* muy delgadas superpuestas, y que cuando la estamos doblando, la fibra mas exterior, o sea la que está cerca de nuestras manos, es la que más se estira y la que está en el centro la que menos...¿Es esto lógico verdad?

Simbad: Si...así por lo menos lo parece...

Capitán Isidore Caubin: Como el símbolo general de los esfuerzos o *"presiones por superficie"* se acostumbra a escribir σ tenemos :

σ xs = F ó σ = F/s, (XXXIV.1.1)

σ donde F está dado en Newtons, s en m^2, σ en Pascales... Este σ, se suele llamar también *"esfuerzo de uso".* El esfuerzo de uso es el esfuerzo a que está sometido un material en condiciones de *"uso"* normales.

Simbad: ¿Cómo por ejemplo un señor que pese 100kg?

Capitán Isidore Caubin: Así es, y si por ejemplo un señor pesa 100 kg, sus piés soportan cuando anda o cuando está de pié, un *"esfuerzo de uso"* debido a ese peso que será mayor que el que soportan los piés de otro señor que pese 60 kg en vez de 100. El esfuerzo de uso, sirve para determinar las dimensiones del soporte y sobre todo de su espesor, para que este sea adecuado a soportar este peso o fuerza por unidad de superficie *"s"*. Es por ello que σ, se calcula con un margen de seguridad. Por ejemplo una barra de sección cuadrada de un centímetro de lado, sometida a una tracción o *"Fuerza"* de 15.000 N (aproximadamente tonelada y media), daría: S = 0,0001 m^2, y su *"esfuerzo de uso"* ó lo que está *"soportando"*, sería: $\sigma = 15x10^3/ 10^{-4} = 15x10^7$ Pa. Se utiliza corrientemente el MPa que vale 10^6 Pa y aquí tendríamos 15x10 MPa ó 150 MPa. A veces se emplea el N/mm^2, que da el mismo resultado que con MPa (tener cuidado con la unidad ya fuera de uso, kg/mm^2, que vale unos 10 MPa, que suelen seguir usando

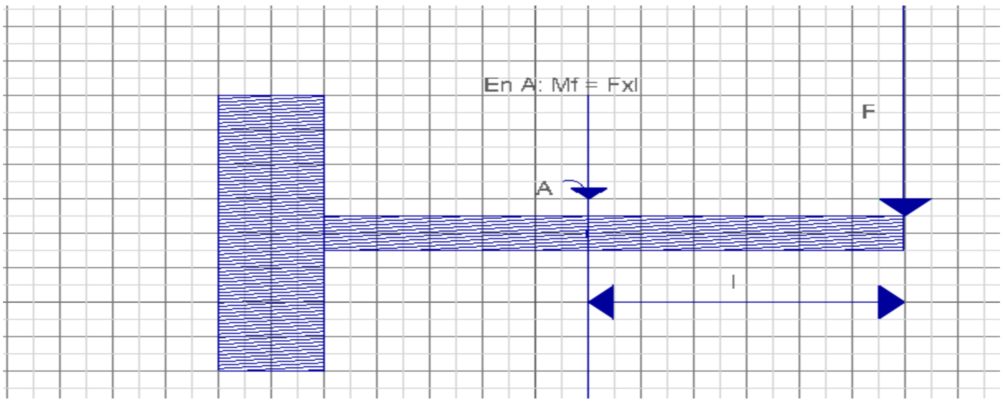

Figura XXXIV.1.3: Viga sometida a un esfuerzo en su extremidad

algunos de los *"Organismos de Clasificación"* y que pueden confundirnos) El caso de la tracción y de la compresión en una barra, es muy simple ya que el esfuerzo es uniforme en cada sección y orientado en el sentido del eje de la barra (que es el del sentido de las fibras de la barra). La definición de *"esfuerzo o fuerza por unidad de superficie o presión"*, en la materia, se aplica a las situaciones donde este esfuerzo varía de un punto a otro y en cada fibra de la estructura, aunque para cada una de estas fibras este esfuerzo sea diferente. Una viga está en flexión, o sometida a una presión, si está sometida en cualquier punto al momento de un par de fuerzas o si el juego de cargas que soporta comporta componentes perpendiculares a su dirección entre apoyos. En una viga con *"voladizo o saliente"*, cargada en su extremidad, el *"momento de flexión"*, vale: Mf = Fxl

Tema XXXV: Repartición de los esfuerzos

"No encuentres la falta, encuentra el remedio". Henry Ford (1863-1947); industrial estadounidense.

Simbad: Entonces, estos esfuerzos a los que sometemos las cosas deberán "repartirse de alguna manera, ¿no?

Capitán Isidore Caubin: Desde luego y vemos en la figura XXXII.1.3, que en una viga de dos zapatas o suelas (línea superior e inferior), cada una de ellas está sometida a la tracción (la superior) o compresión (la inferior) bajo una fuerza f = Mf/d, repartida entre los refuerzos. En una viga cualquiera observamos un fenómeno muy interesante y es que la fibra central que pasa por su centro geométrico (fibra neutra), no sufre ningún esfuerzo, siempre que la tracción o compresión F a la que la viga esté sometida no sobrepase el limite de ruptura de la misma.

Simbad: ¡Pero esto es increíble!, ¿Cómo es posible que las fibras centrales no sufran esfuerzo?

Capitán Isidore Caubin: En efecto, los esfuerzos mas grandes se sitúan en las fibras extremas y disminuyen hacia su centro. Los esfuerzos son por lo tanto proporcionales a la distancia d, *"desde y a partir de"* la fibra neutra, en virtud de lo que se llama *"elasticidad de la materia"* cuyo estiramiento es proporcional a esta distancia como vemos en la figura XXXII.1.2. El momento que produce este *"momento flexionante"*, está constituido por la suma de los productos *"Esfuerzo puntual x d"*

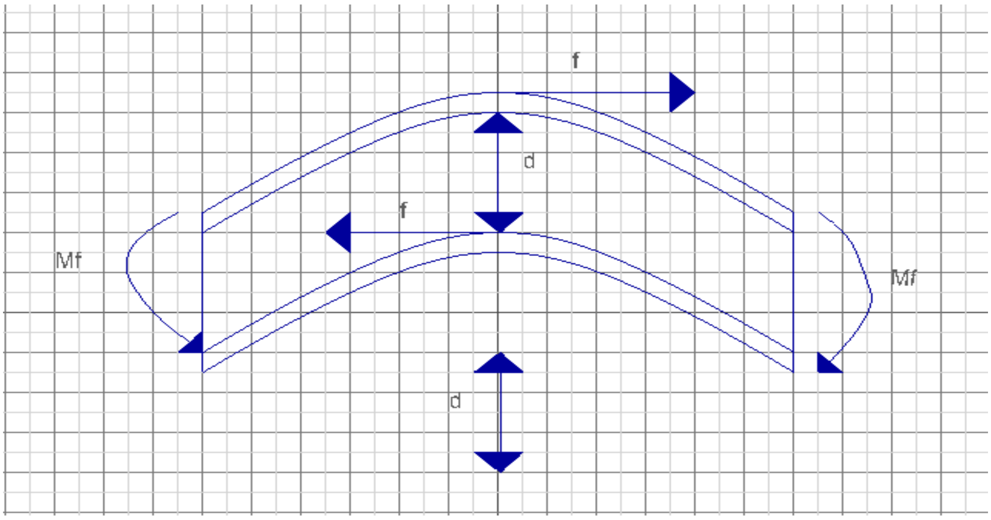

Figura XXXV.1.1: Transmisión del momento de flexión

Cada elemento de la suma es por lo tanto proporcional a d^2 y así en la integración, la respuesta completa a Mf está relacionada a la inercia I_{nercia} de superficie de la sección de la viga con relación al eje xx'.

Si llamamos *"D"* a la distancia desde el eje neutro de la fibra (fibra central), hasta la fibra mas alejada de la sección, (Fibra exterior en la superficie), obtendremos el esfuerzo mas grande:

$\sigma = M_f / I_{nercia} / D$ (XXXV.1.1)

I_{nercia} / D , σ está considerado como una característica de la sección y se llama *"Módulo de flexión"*.

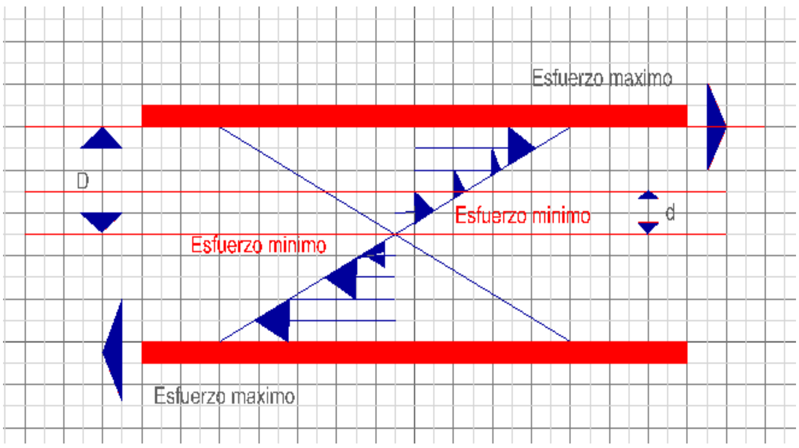

Figura XXXV.1.2: El esfuerzo máximo se produce en la parte superior e inferior

La unidad de I_{nercia} es el m^4, la de I_{nercia}/D, el m^3. Una vez calculado el esfuerzo de esta manera, hay que compararlo al tipo de material que queramos emplear en esta construcción y sobre todo al *"esfuerzo de ruptura"* de ese material (acero, fibra, aluminio, madera...)
Simbad: Claro, el *"esfuerzo de ruptura"*, será el que haga que se rompa o no el material, ¿No?
Capitán Isidore Caubin: Claro está, por eso debemos conocerlo y aplicarlo en nuestros cálculos, ya que si sobrepasamos un cierto limite dado por este esfuerzo de ruptura el material *"romperá"* como tu dices...Un caso especial es el acero y los metales en general donde a partir de un cierto esfuerzo y sin que lleguen a romperse es decir en su *"limite elástico"*, y si suprimimos la carga, la deformación adquirida no desaparece como lo hubiesen hecho con esfuerzos inferiores y la pieza quedará *"viciada"* por culpa de ello...
Simbad: Lo veo claro cuando pienso en tantos clavos que se me han "*quedao doblaos"...*
Capitán Isidore Caubin: Es por eso que en la practica debemos conservar un margen de seguridad y nos fijaremos un *"esfuerzo de uso"*, para los cálculos de muestreo. El esfuerzo de uso, no es otra cosa que el esfuerzo normal que tiene que soportar ese material en condiciones normales de uso; es decir el buque navegando, etc., y sin considerar situaciones extremas de uso, si no normales.
Tendremos que hacer ciertas aproximaciones para poder trabajar y por lo tanto empezaremos por decir que todos los materiales empleados serán considerados *"isótropos u homogéneos"*, (que en todas sus partes tienen las mismas propiedades: dureza, elasticidad, módulo de flexión...), aunque en la dura realidad, esto no sería totalmente cierto...
Simbad: O sea que un *"forro"* será el mismo material por todas partes, ¿no?
Capitán Isidore Caubin: En efecto, este forro tendrá las mismas propiedades *"teoricas"* en toda su superficie aunque no sea esto del todo cierto en la realidad. Es por ello, que en el cálculo del *"esfuerzo de uso"*, reservaremos un coeficiente de seguridad que cubra todos los esfuerzos independientes, tanto de flexión como de repetición de esfuerzos alternados o de *"fatiga"* del material y por ello se fija más o menos al tercio y eventualmente al 1/3,6 del *"esfuerzo de ruptura",* si el material no se considera perfectamente isotrópico, como puede ser un material tal como la fibra compuesta corriente (dificultad en la fabricación a darle las mismas propiedades en todas sus partes) No deberíamos tampoco de todas maneras sobrepasar por seguridad, el 60% del limite elástico del material.
Simbad: Esto lo he entendido, pero en la practica ¿Cómo hacemos?
Capitán Isidore Caubin: Para que lo entiendas te daré algunos ejemplos practicos:
Ejemplo 1: Así, un acero de masa especifica 7850 kg/m^3, con una *"ruptura"* en 450 MPa y un *"limite elástico"* de 230Mpa, tendría un esfuerzo de uso de alrededor 130 MPa...
Supongamos que este forro tiene que soportar 10.000 Pa
O sea que elegimos el 60% de su limite elástico, ya que a partir de aquí, el material se quedaría "viciado"...
Y el espesor a darle a este forro que suponemos que tiene por ejemplo 1 metro entre soportes, sería como veremos más adelante: $e = 0{,}77 \times \ell \times \sqrt{p/\sigma}$, es decir: $0{,}77 \times 1 \times \sqrt{10^4/130 \times 10^6} \approx$ 7 milímetros.
Pero como además, nos encontramos en un *"entorno marino y salino"*, el espesor deducido de este cálculo debe ser aumentado normalmente de 1 o 2 mm, para compensar los efectos de la corrosión ¡Y si no que se lo pregunten al que tenga un buque con casco metálico!. Esto nos daría para este ejemplo un espesor de construcción de unos 8 o 9 milímetros para esta placa de forros...¡curándonos en salud!
Ejemplo 2: Aleación de aluminio de masa especifica 2700 kg/m3, con ruptura en 240 MPa y limite elástico en 110 MPa, nos daría un esfuerzo de uso de 60 MPa...haciendo los mismos cálculos...
$e = 0{,}77 \times \ell \times \sqrt{p/\sigma}$, es decir: $0{,}77 \times 1 \times \sqrt{10^4/60 \times 10^6} \approx$ 10 milímetros, más 2 de corrosión: 12 milímetros de espesor...
Ejemplo 3: Poliéster / vidrio (2/3 Roving, 1/3 mat), de σ = 1560 kg/m^3, ruptura alrededor de 150Mpa, esfuerzo de uso: 40 a 50 MPa...lo que nos daría:
$e = 0{,}77 \times \ell \times \sqrt{p/\sigma}$, es decir: $0{,}77 \times 1 \times \sqrt{10^4/40 \times 10^6} \approx$ 1,22 milímetros, sin nada para la corrosión porque aquí no hay, pero "redondearíamos" a 2 milímetros...
Ejemplo 4: Madero de pino, esfuerzo de uso 7 Mpa, σ = 600 kg/m^3, ...

$e = 0{,}77 \times \ell \times \sqrt{p/\sigma}$, es decir: $0{,}77x1x\ \sqrt{10^4/7x10^6}\ \approx 4$ milímetros, sin nada para la corrosión porque aquí no hay...

Ejemplo 5: Aleación de aluminio, de 100 Mpa de limite elástico, luego con un esfuerzo de uso de unos 60 Mpa, y de masa especifica $\sigma = 8200$ kg/m^3...

$e = 0{,}77 \times \ell \times \sqrt{p/\sigma}$, es decir: $0{,}77x1x\ \sqrt{8200/60x10^6}\ \approx 9$ milímetros, más 2 milímetros por corrosión que nos darían 11 milímetros de espesor...

Para simplificar hemos supuesto que ℓ , era igual a un metro (1 metro)...¡ojo si este valor cambia...!

Tema XXXVI: La formula del momento de flexión Mf:

"La ciencia y la sabiduría, lejos de ser una misma cosa, no tienen entre sí a menudo conexión alguna".
William Cowper (1731-1800); poeta británico.

Simbad: ¿Y como calcularíamos estos esfuerzos?

Capitán Isidore Caubin: Como el esfuerzo se calcula conociendo el momento según $\sigma = M_f / I_{nercia} / D$ que vimos en (XXXII.1.1), tendremos que saber como se calcula prácticamente el momento y así, la formula del momento de flexión Mf, más usada es (Ver figura XXXIII.1.4:

$Mf = FxI_{nercia}/10$ (XXXVI.1.1)

Y se aplica a una viga cuyos apoyos distan de una distancia ℓ , sometida a una carga repartida resultante F. Esta expresión se convertiría en:

$Mf = FxI_{nercia}/8$ (XXXVI.1.2)

para una viga aislada con apoyos simples en forma de cuña (o puntuales), en los extremos, como vemos en la figura: XXXIII.1.1 La formula:

$Mf = FxI_{nercia}/10$ (XXXVI.1.3)

tiene en cuenta una cierta rigidez en los apoyos y / ó en la continuidad de la viga hacia otros apoyos (varios puntos de apoyo a todo lo largo), y se llega a:

$Mf = FxI_{nercia}/12$ (XXXVI.1.4)

para una viga bien encastrada y fijada o encastrada como vemos en la figura XXXIII.1.3.

Simbad: Me falta una letra que es I_{nercia}...

Capitán Isidore Caubin: En efecto, como ya hemos visto, el esfuerzo de flexión se escribe: $\sigma = Mf / I_{nercia}/D$, donde I_{nercia}/D es el *"modulo de flexión de la viga"*, es decir *"la inercia de su sección transversal dividida por la distancia D del baricentro"* (Baricentro es el centro de gravedad de un volumen),

de la sección (fibra neutra) a la fibra que está mas alejada. El eje de cálculo de la sección es perpendicular a la dirección de la resultante de las cargas F (es decir normalmente al eje xx'). La inercia I_{nercia}, de la sección, es decir la de un rectángulo de altura igual al espesor *"e"* del forro y de ancho igual a 1, vale: $1xe^3/12$, siendo la distancia $D = e/2$.

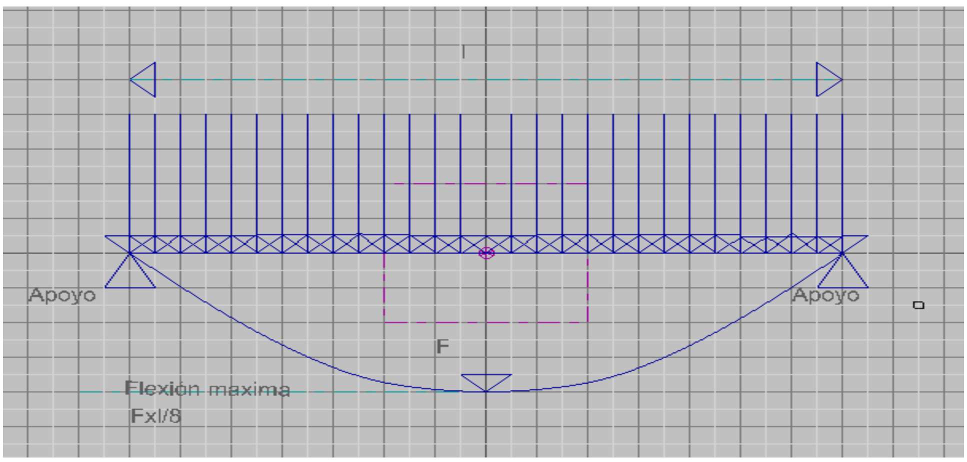

Figura XXXVI.1.1: Viga apoyada en los extremos

Sea $I_{nercia} / D = e^2/6$, entonces: $\sigma = (px\ell^2/10) / (e^2/6)$, o sea: $\sigma = 0{,}6xpx(\ell^2/e^2)$

Por lo cual se calcula el esfuerzo σ en función de la presión, para una configuración geométrica dada.

Si nos fijamos de antemano el *"esfuerzo de uso"* (o esfuerzo normal al que está sometido el forro constantemente por el hecho de existir...), y queremos hallar un espesor de forro, conociendo una presión determinada, tendríamos la formula practica siguiente que ya vimos en los ejemplos anteriores: e = 0,77 x ℓ x $\sqrt{p/\sigma}$

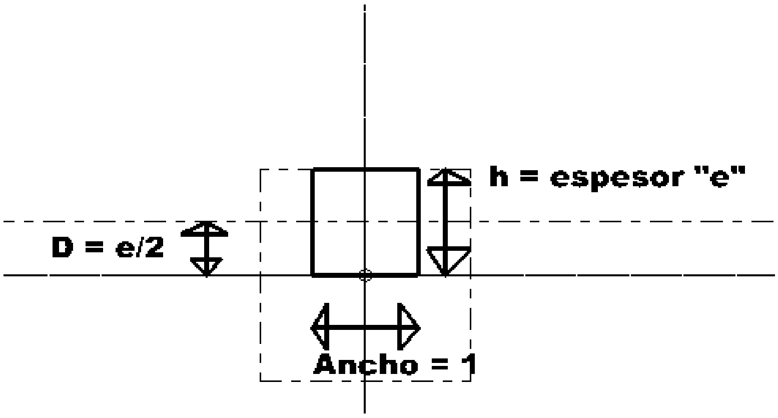

Figura XXXVI.1.2: Rectángulo de altura h = e y de ancho igual a 1

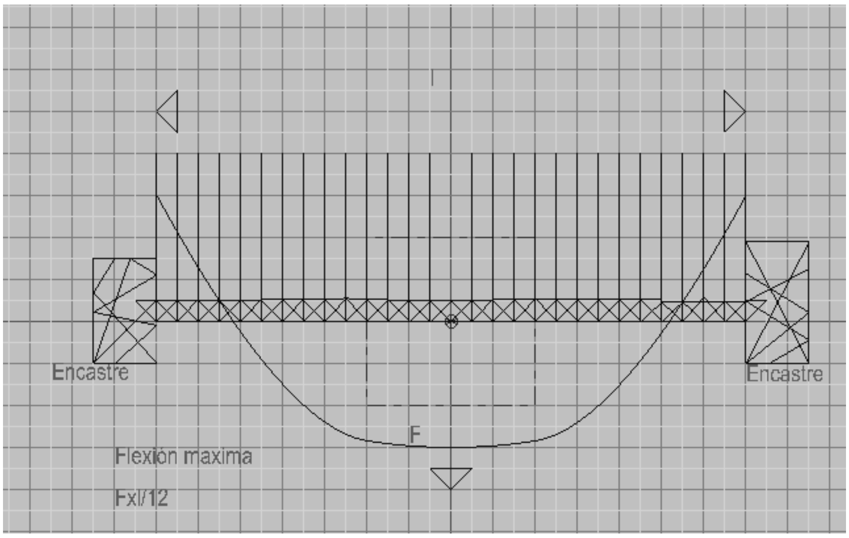

Figura XXXVI.1.3: Viga encastrada en los extremos

Una aplicación a una banda de forro sometida a una presión p de ancho unitario (espesor = 1), soportada por refuerzos (armazón, traviesas), o sea con soportes bastante rígidos, espaciados de ℓ, nos lleva a:

F = presión x superficie = px ℓ x1 = px ℓ, y a:

M_f = Fx I_{nercia} /10 = px ℓ^2/10 (XXXVI.1.5)

De esta manera e solo dependerá de la separación ℓ de los refuerzos del forro.

Habrá que memorizar esta formula, ya que es de aplicación universal porque tiene en cuenta los márgenes de juego en la determinación de la presión y sobre el esfuerzo de uso. Esta formula se utiliza con unidades homogéneas o por lo menos de manera tal que p y σ por un lado y e y ℓ por otro, se expresan con las mismas unidades y lo más simple será calcular siempre en Pascales y en metros.

Aquí hay que tener cuidado con las formulas que dan los Organismos de Clasificación como por ejemplo el *"Bureau Veritas"* y donde las unidades o están anticuadas (por ejemplo σ dado en N/mm^2, en vez de cálculo en Pa), tal como aparece en el *"Reglamento de Noviembre de 1986, sección 3-62"*, o la presión p, está dada en *"altura de agua"* y hay que pasar a Pascales

Simbad: ¿Podría Ud., capitán darme un ejemplo concreto?

Capitán Isidore Caubin: Una barcaza rectangular cuyo fondo soporta 10000 Pa y cuyo armazón de fondo hemos previsto con una separación de 1 metro, lo cual nos lleva a un espesor de acero (esfuerzo de uso 130Mpa) de: e = 0,77x ℓ x $\sqrt{10^4/130x10^6}$ = 6,75x10^{-3} m, ó lo que es lo mismo a un espesor de unos 7 milímetros, como vimos antes...más 2 por la corrosión, total unos 9 milímetros de espesor.

Una reducción de la separación a 0,9 m nos permitiría utilizar planchas de acero de 6mm de espesor, y teniendo en cuenta la corrosión, a 8 milímetros...

Simbad: ¡Ok, capitán, ya sé calcular espesores!

Capitán Isidore Caubin: Si, pero hasta ahora hemos supuesto que el forro está sostenido únicamente por una serie de refuerzos paralelos, pero en una configuración donde se presentan otros refuerzos perpendiculares a estos…

Simbad: ¿Entonces tenemos que comenzar todo de nuevo?

Capitán Isidore Caubin: No, no tenemos que comenzar todo de nuevo, pero la formula de flexión se convierte en la de una placa *("efecto de cuadrado")*.

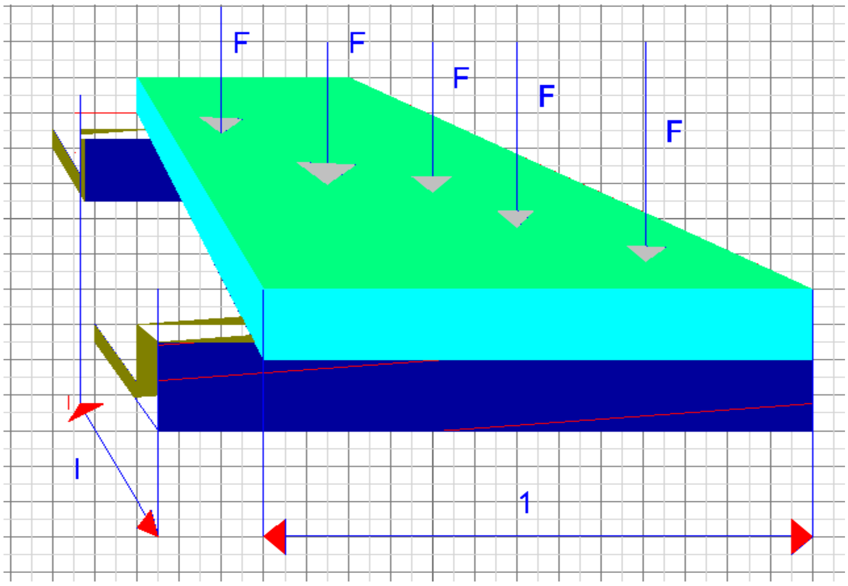

Figura XXXVI.1.4: Aplicación sobre una banda de forros

Simbad: ¿Efecto de cuadrado?

Capitán Isidore Caubin: Si la rejilla de refuerzos es un cuadrado, el sector sometido al cálculo, es decir el esfuerzo a todas cosas iguales, se reduce de un 30% con relación a la disposición en *"rectángulo alargado"*.

El espesor necesario seria entonces de 15% inferior al que nos daría la formula 0,77x ℓ x $\sqrt{p/\sigma}$.

Si se trata de un rectángulo cuyo lado más grande valga una vez y media el pequeño, la corrección del espesor **e** ya no es más que de un 5%. A partir de una proporción de uno sobre dos, esta corrección es ínfima. Acordarse de que ℓ es siempre la distancia entre los refuerzos mas cercanos.

Simbad: Entonces está claro que ya que reducimos el espesor y que por lo tanto *"abaratamos"* esta pieza, lo mejor es utilizar este *"efecto de cuadrado",* ¿Verdad?

Capitán Isidore Caubin: No siempre ya que en definitiva, la utilización de la repartición de refuerzos que produzcan mallas sensiblemente cuadradas no es generalmente muy ventajosa, ya que los pesos de los refuerzos van en contra del aligeramiento del forro. Las consideraciones anteriores se refieren a placas planas, pero en un forro en forma, que es más resistente, podríamos adoptar una reducción de espesor de 10%, si la flecha de curvatura (relación de la flecha a la portada) es de 10%. La reducción es así proporcional a la curvatura cuando ésta es inferior al 10% y más allá, habrá que mantenerse en una reducción del 10%.

Fin de la 1ª parte de la 6ª charla de construcción naval