Charla 7 de construcción naval
Tema XLI: Resistencia al avance de la carena, propulsión del buque
3ª Parte

"Los conceptos están incluidos en las palabras". Henri Bergson (1859-1941); filósofo francés.

Simbad: Ahora después de todo lo que hemos visto, deberíamos afinar las características del buque para ver como lo construimos; su forma, etc., etc. ¿De qué depende todo esto?
Capitán Isidore Caubin: Todo depende de la geometría que hemos elegido y esta geometría está muy estrechamente vinculada a la forma de la carena, al hecho de que se trate de un velero o de una lancha a motor, esto una vez decidido, nos viene dado por el nº de Froude que como tu sabes relaciona la velocidad con la eslora y también por los coeficientes tales como el kb, que ya hemos visto. Así la ley de similitud o de comparación de Froude dice que: *" para dos carenas con un Kb igual o similar y con el mismo nº de Froude, la resistencia residual Rr, es proporcional al desplazamiento".*
Simbad: Esta Rr era la resistencia sobre todo debida a los sistemas de olas, ¿Verdad?
Capitán Isidore Caubin: En efecto y esta resistencia viene dada en ábacos bajo una forma especial donde está dividida cada vez por el desplazamiento Δ, quedando bajo la forma $\frac{Rr}{\Delta}$, *según sea la geometría del buque y su nº de Froude, por lo que tendremos que calcular antes estas cosas antes de recurrir a estos ábacos y ver cual es esta resistencia.*
Cuando la ley de similitud dice *"proporcional"*, significa que podemos construir un grafico con estos tres parámetros: $\frac{Rr}{\Delta}$, Kb y nº de Froude.
Como el coeficiente Kb influencia el avance del navío creando una mayor o menor resistencia, podríamos entonces hacer aparecer en este grafico tres valores:
En el eje de las *"x"* el nº de Froude, en el eje de las *"y"* la resistencia al avance y en las curvas obtenidas para cada par de *"Froude /* $\frac{Rr}{\Delta}$ *"*, anotaríamos los Kb's correspondientes.
Dejemos por ahora la definición de *"resistencia residual"* y analicemos esta frase:
1º:Dos carenas *"con un Kb similar"* significa en la practica, dos carenas con formas geométricas parecidas o iguales.
2º: Su *"grado de velocidad o nº de Froude"*, es el mismo
3º: Pero su *"Resistencia residual al avance"*, es decir $\frac{Rr}{\Delta}$, es proporcional al desplazamiento; es decir que si Rr es la resistencia residual tendremos que esta resistencia será menor, cuanto más grande sea el desplazamiento, o mayor cuanto más pequeño sea este desplazamiento.
Simbad: Aquí lo que me parece extraordinario es que Ud., capitán, me dice que contra más grande o pesado sea el buque esta resistencia residual es más pequeña...
Capitán Isidore Caubin: En efecto, así es proporcionalmente, pero continuemos con este análisis:
El Kb de un buque es tanto más grande cuanto más *"feo, lento y/ o cuadrangular"* sea el buque estudiado...
Conclusión: un Kb alto corresponde a algo *"muy cuadrado y lento"* como una barcaza por ejemplo...Un Kb pequeño corresponderá por lo tanto a un buque mejor perfilado y que avanza mejor en el agua como es por ejemplo un velero, estos serían los dos extremos de lo que hemos dicho..
La ley de similitud nos permitiría entonces por ejemplo, realizar a escala una pequeña maqueta de un gran buque y someterla a ensayos en una piscina de carenas: Los resultados se aplicarían perfectamente al modelo real en teoría, esto es lo que en realidad quiere decir: *"Ley de Comparación o de Similitud de Froude"* ; realizando ensayos con una maqueta de relativamente pequeñas dimensiones y que podemos colocar en un plan de aguas reducido, estamos haciendo medidas y ensayos que se pueden aplicar al modelo real.
Simbad: ¿Esto quiere decir que un buque de doscientos metros lo puedo construir a escala y que solo tenga veinte por ejemplo?

Capitán Isidore Caubin: Así es en efecto y para tener una idea rápida del tipo de buque con el que nos enfrentamos, tendremos que visualizar la expresión $\frac{\nabla}{E^3}$, que es más practica que la expresión del kb, ya que si el resultado es alto *"Hay mucho volumen para esa eslora"*, o sea se trata de un buque *"feo o cuadrado"* y si es bajo, por el contrario se tratará de un buque mas ligero y proporcionado.
Tracemos por tanto un sistema de ejes donde en abcisas colocamos el nº de Froude y en ordenadas Rr / Δ. Las zonas de curvas obtenidas para Kb's similares aparecerán en lugares bien determinados y a simple vista veremos con qué *"monstruo nos enfrentamos"*. Esta es una manera practica y rápida de visualizar nuestro proyecto, ya que manejamos al mismo tiempo nº's de Froude, resistencias residuales, desplazamientos y Kb's...

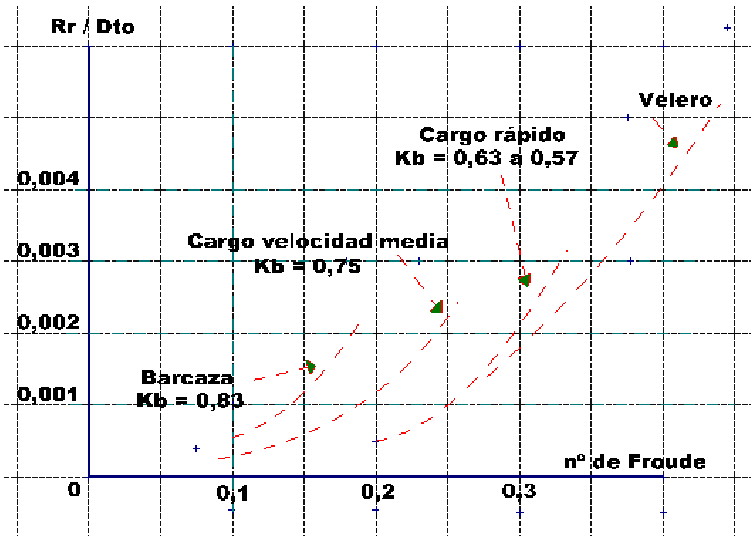

Figura XLI.1.1: Nºs de Froude, Resistencia residual y desplazamiento, Kb's...
Si construimos una tabla Excel, variando un parámetro veremos los resultados que obtendremos inmediatamente.
La velocidad expresada con el nº de Froude nos permite clasificar los buques en *"lentos, rápidos y medios"*, de la siguiente manera:
1º: **Navíos lentos:** nº de Froude < 0,27 → cargos, barcazas...veleros lentos...
2º: **Navíos de velocidad media:** nº de Froude comprendido entre 0.27 < nº Froude < 0,50 → pesqueros, remolcadores, navíos de servicio…veleros rápidos...
3º: **Buques rápidos:** nº de Froude > 0,50 → Lanchas, vedettes…semi-planeadoras…veleros de tipo catamarán o verdaderos prototipos de carreras...
Si el nº de Froude aumenta y al mismo tiempo aumenta la relación $\frac{Rr}{\Delta}$, será más interesante usar la expresión $\frac{\nabla}{E^3}$ que la del kb que es menos significativa y en abcisas pondremos nº's de Froude a partir por ejemplo de 0,25 mientras que en ordenadas los valores de $\frac{Rr}{\Delta}$ irán desde 0,025 hasta 0,125 o más, visualizando en las zonas de las curvas no los kb, sino los $\frac{\nabla}{E^3}$.
En nuestro ejemplo de antes, si calculamos con una velocidad de 8 nudos; es decir 8 x 0,513 = 4,1 m/s…tendríamos: nº Froude = 4,1 / $(9{,}81 \text{x } 18)^{1/2}$ = 0,31, es decir un velero en la *"zona de los veleros rápidos"...*
Para velocidades muy altas con nº's de Froude del orden de 2,0, se emplea el nº de Froude *"Volumétrico"*, que es:

$$N^{o}Fvol = \frac{V}{\sqrt{g x \nabla^{1/3}}} \qquad (XLI.1.1)$$

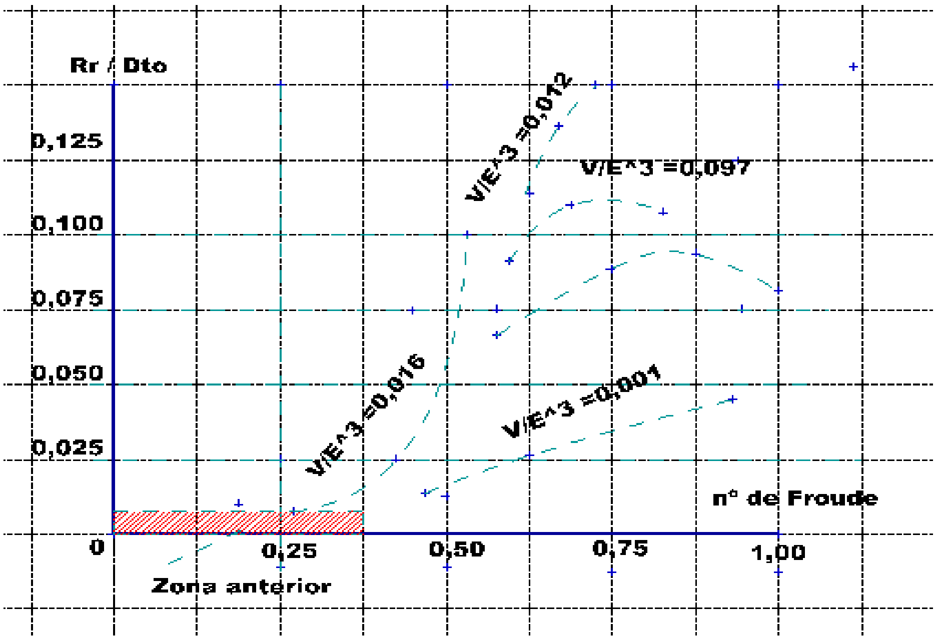

Figura XLI.1.2: Nºs de Froude, Resistencia residual y desplazamiento, Kb's...

y la relación $\frac{\nabla}{E^3}$. A título de información se da la tabla siguiente de una serie *"Nordstrom"*.

	A	B	C	D	E
1	PARA Nº FROUDE(Volumetrico)= 2,0				
2	V/E^3	E/M	kb	Rr/Vol	
3	0,001	10	0,63	0,025	
4	0,003	6	0,68	0,06	
5	0,004	5 A 6	0,68	0,073	
6	0,004	4	0,69	0,075	
7	0,006	7	0,69	0,072	
8	0,008	4,5	0,69	0,083	

Figura XLI.1.3: Velocidades altas con nº de Froude Volumétrico

Simbad: Ud., capitán tiene siempre la manía de empezar por el final; *"se pasa media hora"* hablándome de resistencias y todavía no me las ha explicado...

Capitán Isidore Caubin: Es más fácil a veces empezar por el final; ahora te hablo de las resistencias y para empezar te diré que la clasificación de las resistencias que se oponen al avance de nuestro buque se resumen a la expresión:

$$Rt = Rr + Rf, \qquad (XLI.1.2)$$

Donde Rt es la resistencia total, Rr es la residual y Rf la de frotamiento.
Rf se calcula y Rr la miramos en un ábaco tal como te he dicho y como veremos más adelante.
Rt es la resistencia total al avance de nuestra carena considerada tal cual, sin apéndices…
Rf, se calcula por la *"Ley de similitud de Reynols"* como veremos más adelante
Rr es la resistencia residual que nos queda y que es debida sobre todo a la resistencia de las olas por lo que aquí en este termino, interviene no Reynolds sino Froude ó la *"Ley de similitud de Froude"*…

La formula original de Reynolds se refería a una superficie fina en forma de *"hoja o lamina"*, y no es muy practica con lo que un tal Schoenherr, se puso a trabajar y obtuvo una formula que después fue modificada y adaptada por un organismo internacional de normalización llamado ITTC, saliendo finalmente un coeficiente kf, llamado *"Coeficiente de resistencia"*.

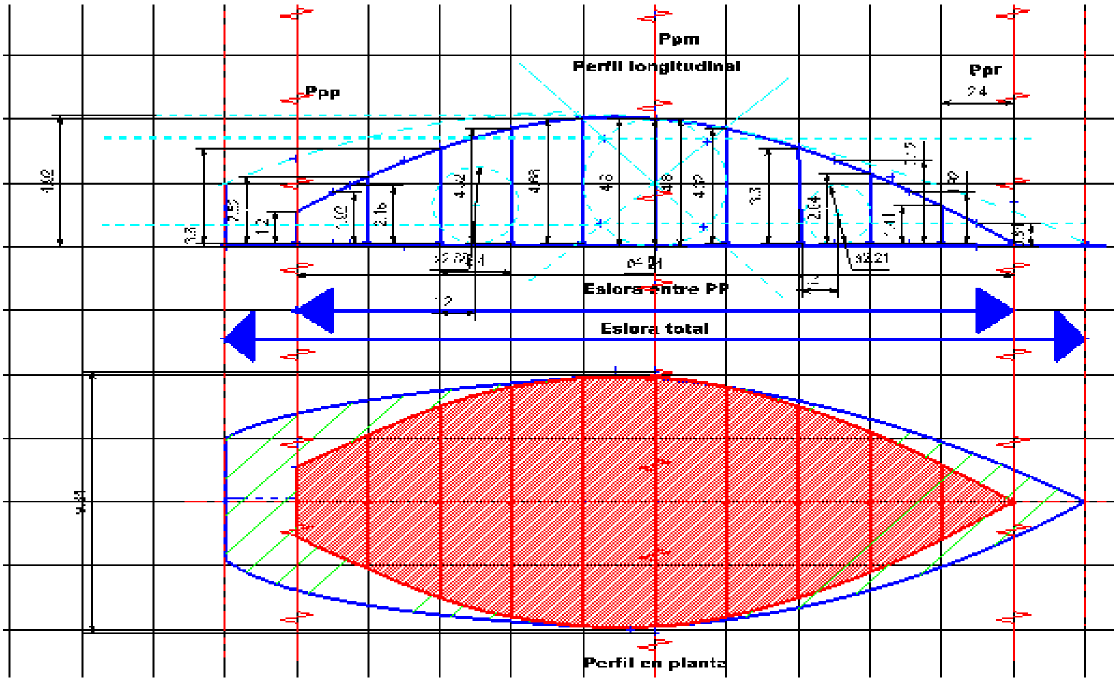

Figura XLI.1.4: Lo dibujamos en planta y en longitudinal...

Finalmente y después de que todas estas personas *"Se rompieran el coco como tú dirías"*, la formula de la resistencia de frotamiento que aplicaremos en la practica será:

$$R_f = 512{,}5 x S x V^2 x kf x (1+k) \qquad \text{(XLI.1.3)}$$

donde S es la *"superficie remolcada ó mojada"*, V es la velocidad en m/s, kf es el coeficiente de resistencia y k es un coeficiente que indica *"la influencia de la forma de la carena"* sobre el *"deslizamiento del fluido"* cerca de ella...Si hacemos para simplificar: 1+k = 1...Esto en realidad nos indica que hemos hecho k= 0, pero este k podría ir desde 0 para carenas muy finas (planeadoras), hasta k= 0,2 ó más. Si no sabemos bien medir este k por el momento, tomaremos un valor medio de k = 0,05 y el resultado practico final no variará de más o menos un 3%...

Todos los datos de esta formula se pueden incluir en una tabla Excel y solo nos faltaría el *"famoso kf normalizado por el ITTC"*, que es:

Figura XLI.1.5: El "Starcrest", yate clásico con un Kb y un Kp, perfectamente equilibrados...

$$kf = \frac{0,075}{\left(\log_{10}\Re_e - 2\right)^2} \qquad \text{(XLI.1.4)}$$

Y ya solo nos queda encontrar el nº de Reynolds, que para una temperatura media sería:

$$\Re_e = \left(\frac{VxE}{1,08}\right)x10^6 \qquad \text{(XLI.1.5)}$$

La tabla Excel correspondiente quedaría más o menos como indica la figura:

G16 =

	A	B	C
1	entrada:eslora(m)=	10	
2	entrada:S(m^2)=	25	
3	entrada: V(nudos)=	10	
4	V(m/s)=	5,14	
5	(1+k)	0,05	
6	kf=	0,00488438	
7	Reynolds=	47592592,6	
8	Rf(newtons)=	1653,36726	Newtons
9	Rf(Watios)=(Nm/s)	8498,30771	Watts
10			
11			

Figura XLI.1.6: Calculo de Rf

Simbad: Ok, capitán ya ha hablado Ud. de las resistencias, como calcularlas y todo lo demás, pero si una carena o buque tiene *"resistencias al avance"*, habrá que ver que motor *"le metemos"* para que no se quede *"parao"*, ¿No?

Capitán Isidore Caubin: En efecto marinero, y esto es muy importante, ya que si calculamos mal, nuestro buque no podrá avanzar como Dios manda o si le colocamos un motor demasiado potente estaríamos malgastando energía y sobre todo dinero...

La potencia del motor que nos será necesaria está dada por una formula tradicional que se aplica en todo el mundo y que se ha convertido en *"un clásico"*, y que se llama *"la formula del almirantazgo"*, la cual nos da un coeficiente.

$$kA = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}}}{P_E} xV^3 \qquad \text{(XLI.1.6)}$$

Como vemos esta formula relaciona el desplazamiento del navío, la velocidad y la potencia.

Más practico será que adaptemos esta formula tal como hicimos con la resistencia residual y obtener así un numero sin dimensión al dividirla como sigue por el desplazamiento:

$$\frac{P_r}{\Delta xV}, \qquad \text{(XLI.1.7)}$$

donde Pr es la potencia rotativa del aparato propulsivo. Como estamos acostumbrados cuando hablamos de velocidad a trabajar con el nº de Froude, podríamos expresar en un grafico estas dos relaciones y trabajar así más rápido igual que hicimos con Rr/ Δ. Tendremos así en ordenadas esta expresión y en abcisas el nº de Froude que nos dará una curva y visualmente nos emplazaremos en la zona que más nos convenga.

Para ello y como siempre, construiremos una tabla Excel en la que en columnas aparezcan los datos siguientes:

Tipo de buque, Eslora (metros), Δ (Newtons x 10^6), $\frac{\nabla}{E^3}$, V (m/s), P_R (Wattsx10^6), $\frac{V}{\sqrt{g.E}}$ (nº Froude) y finalmente lo que buscamos: $\frac{P_R}{\Delta xV}$; a continuación haremos un grafico en el que en abcisas pondremos los nº's de Froude y en ordenadas los $\frac{P_R}{\Delta xV}$

Simbad: Me ha convencido capitán, pero ¿Y los veleros?...¿Y ese motor que es el viento?; ¿Cómo lo calculamos?

Capitán Isidore Caubin: Cuando hablamos de velas, sabemos *"por intuición"* que el viento será el que nos lleve a buen puerto y es por ello que este motor deberá estar proporcionado con la R_T, que nos frena obteniendo así una primera expresión:

$$R_T = F_{VX}, \qquad \text{(XLI.1.8)}$$

donde F_{VX} es el componente propulsivo del empuje ejercido por el viento sobre nuestras velas en la dirección querida de nuestro avance que suponemos en el sentido del eje de las *"x"*...

Hemos visto como componer fuerzas en los capítulos anteriores y adivinamos que tendremos otras componentes en el sentido de las "y" por ejemplo...F_{VY}...

Simbad: Si, pero como Ud. dice mi capitán, si la forma de nuestra carena está mal hecha...

Capitán Isidore Caubin: En efecto, también adivinamos que *"una forma fea y cuadrada"* avanzará con la misma propulsión vental con más dificultad que si poseemos formas afinadas y ligeras...

Nuestra formula de base se irá de esta manera componiendo poco a poco y si seguimos pensando (que es lo que yo quisiera obtener de mis lectores), veremos que la superficie de las velas deberá tenerse también en cuenta...Finalmente obtendríamos con estos razonamientos la formula:

$$F_{VX} = k_{FP} x \left(\frac{\rho}{2}\right) x S x v_{ap}^{2} \qquad \text{(XLI.1.9)}$$

Donde k_{FP}, es el coeficiente aerodinámico en la dirección del avance de nuestro buque, $\frac{\rho}{2} = 0{,}65$ es la *"semimasa especifica del aire"*, S, la superficie del velamen que sería igual al total de velas expuestas al viento en cada caso determinado, v_{ap} , es la velocidad aparente del viento dada en m/s sabiendo que el viento se descompone también geométricamente entre la velocidad v_n del navío y la velocidad v_v del viento con relación a puntos fijos (Viento real).

Simbad: Si ahora caigo...no sé quién me dijo algo sobre el viento aparente y todas esas cosas...

Capitán Isidore Caubin: Cuando estamos navegando y salimos a cubierta, normalmente sentimos una brisa en nuestra cara; ahora imagínate que el buque se para y que no hay viento ni aire ni nada...Aquello que sentíamos en la cara era el famosos viento aparente...

Simbad: Ok, capitán ahora me acuerdo, pero en sus formulas sale la superficie S de las velas, ¿Cómo sabré cual es?

Capitán Isidore Caubin: La superficie S, de las velas se mide con las velas en un suelo plano, salvo para las velas huecas tales como los spinnaker's, a los cuales hay que proyectar en un plano y tomamos la superficie de esta proyección.

Simbad: Pero todos estos cálculos ¿nos sirven para cualquier situación de navegación?

Capitán Isidore Caubin: Las situaciones en navegación pueden ser infinitas y entonces ahora deberíamos considerar si lo que buscamos es darle preferencia a la velocidad que queremos obtener en *"ceñidas"* y cuales serán entonces los problemas de estabilidad para los valores que obtengamos.

Al principio de nuestros cálculos, los resultados obtenidos serán bastante *"burdos"* y poco nos deberá importar el valor de los coeficientes o la velocidad del viento, pero después de obtención de los primeros resultados deberemos afinar las cosas en detalle...

Como el primer objetivo es la simplificación deberemos comenzar por definir los tipos de marcha de nuestro velero con relación al viento y así veremos tres casos de base:

1º: Con viento en popa

2º: Con viento de través

3º: En ceñida al viento

Todos los demás casos serán *"mezclas o combinaciones"* de estos tres casos de base.

Simbad: Ya veo...pero entonces ¿Por donde empezamos?

Capitán Isidore Caubin: Como siempre, procederemos a construir una tabla Excel con los datos de cada problema y así podremos realizar todos los tanteos que queramos.

Simbad: ¿Me da Ud., esta tabla Excel?

Capitán Isidore Caubin: Creo que ya te he dado bastantes tablas como para que sepas construirte esta. Esto te servirá como ejercicio...

Simbad: ¡Ud., lo que quiere es hacerme trabajar!

Capitán Isidore Caubin: Exactamente marinero...no siempre hay que darlo todo *"mascado"*.

Esta tabla Excel nos producirá un grafico que nos situará visualmente donde queramos.

1º: En el caso de viento en popa, empezaremos por decir que todas las figuras en las que se sobrepongan las velas las eliminamos y sin embargo podremos tener en cuenta el contorno de la superficie del casco y de las superestructuras que influencian *"la toma de viento"*.
La curva que construiremos tendrá en ordenadas la resistencia R_T y en abcisas la velocidad v_{ap}, que despejando de la formula de F_{VX} nos daría:

$$v_{ap}^2 = \frac{F_{vx}}{\left(\frac{\rho}{2}\right) x k_{FP} x S} \qquad \text{(XLI.1.10)}$$

Lo que simplificando nos daría si consideramos un k_{FP} de 1, aproximadamente:

$$v_{ap} = \sqrt{\frac{R_T}{0{,}70xS}} \qquad \text{(XLI.1.11)}$$

La *"velocidad absoluta del viento"* será la de la *"velocidad de equilibrio del velero"* V, más la del viento aparente v_{ap} de la manera siguiente:
$v_{abs} = V + v_{ap}$
La tabla Excel correspondiente nos permitirá el dibujar varias curvas y afinar todos estos datos.
2º: En el caso de viento de través, el k_{FP} ya no será de más o menos 1 sino de 0,8 aproximadamente y la superficie de vela S, está considerada sin recubrimientos, la escora es débil y la resistencia de carena sin modificar.
En este caso el viento aparente v_{ap} es:

$$v_{ap} = \sqrt{V^2 + v_{abs}^2} \rightarrow v_{ap}^2 = V^2 + v_{abs}^2 \qquad \text{(XLI.1.12)}$$

Lo que nos daría esta vez con k_{FP} de 0,8:

$$v_{abs} = \sqrt{\frac{R_T}{0{,}70xS} - V^2} \qquad \text{(XLI.1.13)}$$

Para no realizar otra tabla Excel estos parámetros ya estaban indicados en la primera (que deberíamos haber construido)
3º: A la ceñida la inclinación reduce la superficie S vélica y la cosa se complica un poco.
Como vemos que lo que aquí varía es esta superficie S, la vamos a transformar según la inclinación o escora de θ^0 en:

$$S_{inclinada} = S \times \cos\theta^0 \qquad \text{(XLI.1.14)}$$

Los coeficientes aerodinámicos del tipo k_{FP} varían según sea la calidad de las velas así como su orientación según un ángulo α que hay que buscar lo más favorable posible entre el v_{ap} y el eje del velero.

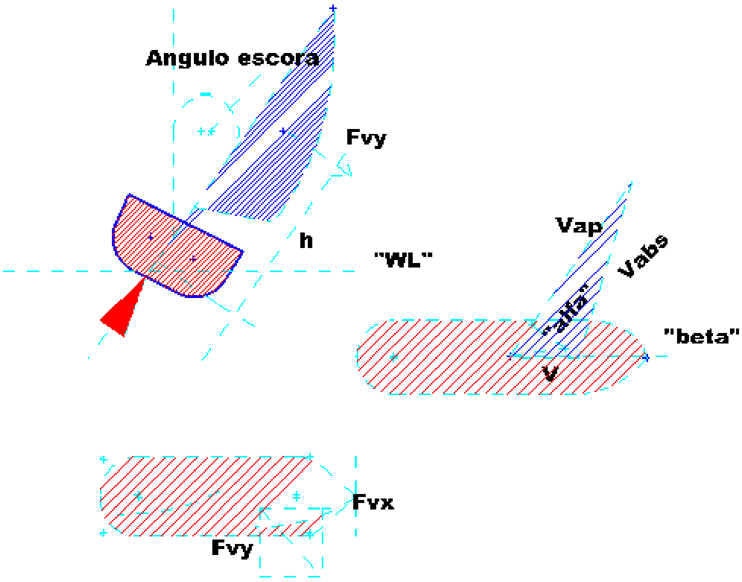

Figura XLI.1.7: cálculos sobre el viento en las velas...
Si suponemos que la componente transversal es prácticamente perpendicular al plan vélico tendremos:

$$F_{VY} = k_{FL} x \left(\frac{\rho}{2}\right) x S x \cos\theta x v_{ap}^2 \qquad \text{(XLI.1.15)}$$

El k_{FP} es de más o menos 0,4 y entonces nos queda
Estos datos nos permiten entrar en un diagrama de estabilidad donde el momento escorante es:
Me = Fvy x h (XLI.1.16)
El brazo de palanca h del par escorante, se mide desde el centro vélico al centro de deriva, la intersección entre la curva escorante y la curva adrizante, nos indica la escora θ_0 que tendremos que considerar y así, la componente de propulsión del viento será:

$$F_{vx} = k_{FP} x \left(\frac{\rho}{2}\right) x S x \cos\theta_0 x v_{ap}^2 \qquad \text{(XLI.1.17)}$$

Si ahora reportamos F_{VX} sobre la curva de resistencia R_T y agregamos un tanto por cien correspondiente a la resistencia aerodinámica del casco y de las superestructuras, por ejemplo un 10% o *"al gusto"*, causada por la escora y la deriva, tendremos la velocidad V del velero.
De la triangulación entre vap y v, conociendo esta V y el ángulo de deriva δ que según la eficacia de los apéndices si están bien proporcionados vale más o menos unos 5º, tendremos:

$$\text{tg}\,(\alpha+\delta) = \frac{v_{abs} x \text{sen}\beta}{V + v_{abs} x \cos\beta} \qquad \text{(XLI.1.18)}$$

Para resolver esto procederemos por tanteos aumentando progresivamente β, a partir de un umbral al menos igual a $\alpha+\beta$ y v_{ap} lo deduciremos de la manera siguiente:

$$V_{ap} = \frac{v_{abs} x \text{sen}\beta}{\text{sen}(\alpha+\beta)} \qquad \text{(XLI.1.19)}$$

La velocidad proyectada sobre la dirección del viento real, es decir *"remontando al viento"* es V x cos β y así tendremos todos los datos necesarios a nuestros cálculos, pero no perdiendo de vista que todo esto es teórico y nada remplaza la realidad practica.
La componente propulsiva F_{VX}, para cada uno de los valores que cambiemos y obtenida en la tabla Excel, nos será dada automáticamente para cada parámetro que cambiemos.
Simbad: Creo que por hoy ya he tenido bastante mi capitán...
Capitán Isidore Caubin: Hasta la próxima charla marinero.

Fin de la 3ª parte de la 7ª charla sobre construcción naval