

Aplicación de los Elementos Finitos en el Comportamiento Mecánico de Uniones Tubulares Tipo (Y) Usadas en Estructuras OFFSHORE.

AUTOR: Dr. Mario Jacas Cabrera ¹.
Dr. Carlos Alberto Nunes Días ²
Dr. Melchor Rodrigues Madrigal¹
Ing. Rodolfo Valentí Giraudy¹.

1- Profesor do Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría; CUJAE
Ave. 114 # 11901 e/ 119 y 127, Marianao, C de la Habana, Cuba. CP-19390.
e-mail: jacas@mecánica.cujae.edu.cu.

2- Profesor da Escola Politécnica da São Paulo.Brasil
e-mail: candias@USP.br

Resumen:

En este trabajo se realiza el modelado por medio de elementos finitos (EF) de las uniones tubulares tipo (Y) usadas en las estructuras OFFSHORE, con el objetivo de determinar los valores de **HOP-SPOT STRESS**, y las ecuaciones paramétricas para la determinación de los valores de factor de concentración de tensiones (**FCTmax**).

Para la modelación por EF fue utilizado el software GERTUS con la finalidad de generar las mallas de los diferentes modelos así como la línea del cordón de soldadura según normas establecidas con elementos sólidos de ocho nodos. El análisis de los resultados fue realizado con el software de EF. ALGOR.

En la investigación las uniones tubulares tipo (Y) fueron sometidas a cargas axiales y de momento en el plano.

Tanto para las uniones cargadas axialmente como las cargadas con momento en el plano se obtuvieron los modelos matemáticos para la determinación de los valores de FCT max.

Como aspecto relevante se demostró que con la realización de la línea del cordón de soldadura con radio de curvatura en la sección transversal de la misma, el valor de FCT max tienen lugar en la zona media del espesor de la línea de soldadura y no en los extremos de los catetos del cordón, como afirman otros investigadores.

Introducción:

Durante los últimos 30 años, han sido publicados una gran cantidad de trabajos sobre las concentraciones de tensiones en las uniones tubulares. La mayor parte de estos han sido motivados por la necesidad de garantizar un diseño seguro de las estructuras tubulares, las cuales están sometidas a fuerzas repetitivas y variables, siendo propensas a fallas por fatiga como es el caso de las estructuras OFFSHORE. Los valores de tensiones nominales (axial o de flexión) en los elementos tubulares se incrementan considerablemente en algunas zonas en la vecindad de las uniones soldadas, denominándosele a estas zonas “hot-spot stress”. La misma puede encontrarse próxima al tubo principal o al secundario en dependencia de la geometría de la soldadura y de la unión.

La relación de la tensión de hot-spot stress entre la tensión nominal es llamado Factor de Concentración de Tensiones (FCT).

La predicción exacta de los concentradores de tensiones, es de importancia primaria en el acceso y comprensión de la integridad estructural en uniones tubulares. Con el fin de lograr un mejor entendimiento de la geometría de una unión tubular tipo (Y) se detallan los siguientes parámetros, figura 1

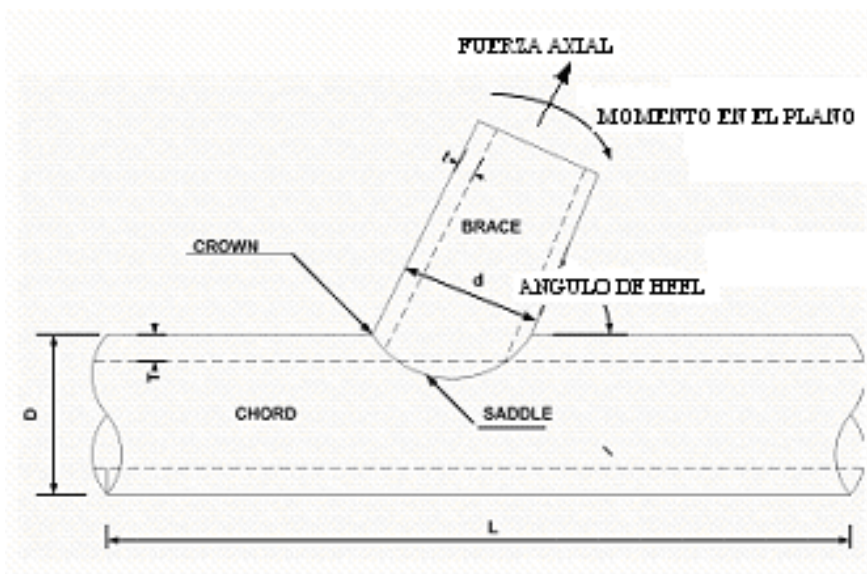


Fig. 1 Parámetros de la unión tubular tipo (Y).

En este tipo de uniones tubulares, las dimensiones se establecen por medio de relaciones o parámetros geométricos (α , β , γ , τ).

$$\alpha = \frac{2L}{D} ; \quad \beta = \frac{d}{D} = (\leq 1); \quad \gamma = \frac{D}{2T}; \quad \tau = \frac{t}{T} \quad (1)$$

Revisión Bibliográfica:

En el estudio de los concentradores de tensiones se han llevado a cabo numerosos análisis experimentales: con uniones tubulares reales, modelos a escala de acero, de acrílico y con la implementación de herramientas computacionales, todos con el fin de obtener ecuaciones paramétricas para la determinación de los FCT.

Entre los primeros trabajos de modelación con elementos finitos para la determinación de las formulas paramétricas de FCT en las uniones tubulares están las desarrolladas por Kuang, Gibstein MB, Efthymiou / Durkin, etc.

Kuang [1], utilizó el método de los EF con elementos de cáscara, cubriendo las configuraciones de las uniones tipo T, Y, K, y KT. Una limitación en este trabajo es que el autor no considera la línea del cordón de soldadura en los modelos.

La formulación que considera la fuerza axial y los momentos en el plano y fuera del plano tienen el siguiente formato:

$$SCF = K \cdot \gamma^{m1} \cdot \beta^{m2} \cdot \tau^{m3} \cdot \xi^{m4} \cdot \sin^n \theta \quad (2)$$

De la misma forma, Kuang [2] presento una versión mejorada de esta formulación. En este modelo las condiciones de contorno se consideraron de apoyo para las extremidades del CHORD en los casos de carga axial y de momento en el plano, así como empotrados en los casos de carga de momento fuera del plano.

Gibstein [3], también utilizo los M.E.F con elementos de cáscara para la elaboración de sus formulas, analizando inicialmente uniones tipo (T). Aparentemente Gibstein no realizo investigaciones sobre la influencia de (α), en los caso de carga axial.

A pesar de que los resultados de Gibstein demostraron poca influencia de las condiciones de contorno para los FCT en los casos de fuerza en el plano, él utiliza aparentemente condiciones de apoyo para los extremos del CHORD.

Efthymiou [4] fue otro de los investigadores que utilizó M.E.F con elemento de cáscara 3D, pudiéndose notar en las formulas obtenidas por él un mayor nivel de detalles en sus investigaciones, considerando en los modelos la línea de soldadura. En sus trabajos abarco las configuraciones de las uniones tipo T, Y, y K, aquí se nota la preocupación en obtener para los casos de fuerzas en el plano, formulas para las zonas de CROWN y SADDLE por separado, así como analiza los casos de condiciones de contorno para los extremos del CHORD de empotrados y apoyados. En este trabajo analiza la influencia de los tubos cortos del CHORD en los valores de FCT, proponiendo correcciones para los casos en los cuales $\alpha < 12$.

En 1988 Efthymiou [5], publicó un juego de ecuaciones paramétricas que cubren las configuraciones simples de uniones tubulares: X, K y KT.

Karamanos [6], presenta un estudio sobre la concentración de tensiones en uniones tubulares tipo K, usando EF con elementos sólidos de 20 nodos, representando la línea del cordón de soldadura según la norma AWS.

En este trabajo fueron usadas cuatro condiciones de carga: axial, momento en el plano y fuera del plano así como en el tubo principal CHORD.

Loyd's Register [7], se establece un resumen de los resultados obtenidos por todos aquellos investigadores que realizaron investigaciones en modelos de uniones tubulares de acero con medidas naturales o a escala, así como aquellos que usaron modelos en acrílico para diferentes tipos de uniones. Teniendo en cuenta todos estos resultados, obtuvieron modelos matemáticos paramétricos para los tipos de uniones analizadas.

En este trabajo se reconoce entre todos los trabajos hechos por EF solamente las formulaciones obtenidas por Efthymiou, por considerarla las de mayor fiabilidad hasta el momento.

En este trabajo se pretende usando la modelación por EF establecer las formulaciones matemáticas para la determinación de los FCTmax. de las uniones tubulares tipo Y, bajo carga axial y de momento en el plano.

Desarrollo:

Uniones tubulares tipo (Y) sometidas a momento en el plano:

Con el objetivo de obtener los modelos matemáticos de los FCTmax se creo una matriz experimental $2^4 \times 4^1$, donde las variables tomaron los valores:

$$7 < \alpha < 11$$

$$14 < \gamma < 24$$

$$0,3 < \beta < 0,8$$

$$0,5 < \tau < 1$$

Angulo de Heel (α_c)= 60; 70; 80; 90

Modelación por Elementos Finitos.

Para la creación de los modelos por elementos finitos fue utilizado el software GERTUS [8; 9], con la finalidad de generar el mallado de los diferentes modelos. Este software genera la línea del cordón de soldadura según las normas establecidas en la A.S.W., obteniéndose en la sección transversal del cordón de soldadura un radio que garantiza una tangencia satisfactoria entre las superficies de los tubos principal (CHORD) y secundario (SADDLE), figura 2 y 3

La malla de EF es elaborada a partir de la formulación de algunos puntos notables que definen el contorno de la sección transversal del cordón de soldadura en cada posición a lo largo de la generatriz y como función de los siguientes parámetros geométricos: D ; d ; T ; t ; ángulo diedral (ψ); ángulo de bisel; holgura (GAP), figura 4.

Como elementos el software genera elementos sólidos tipo BRICK de ocho nodos.

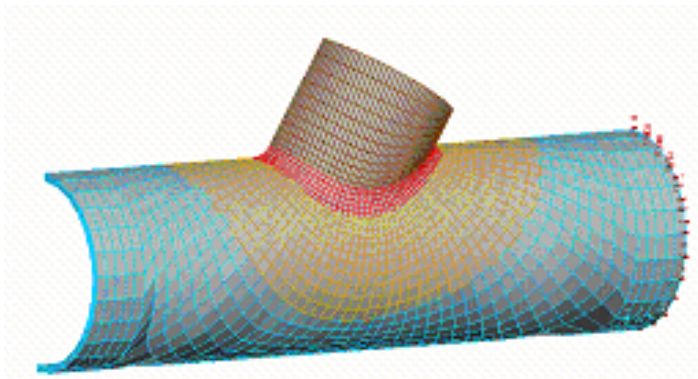


Fig. 2 . Mallado de la unión tubular tipo Y.

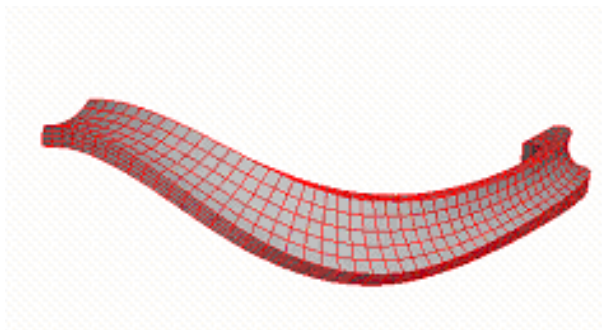


Fig. 3. Cordón de soldadura

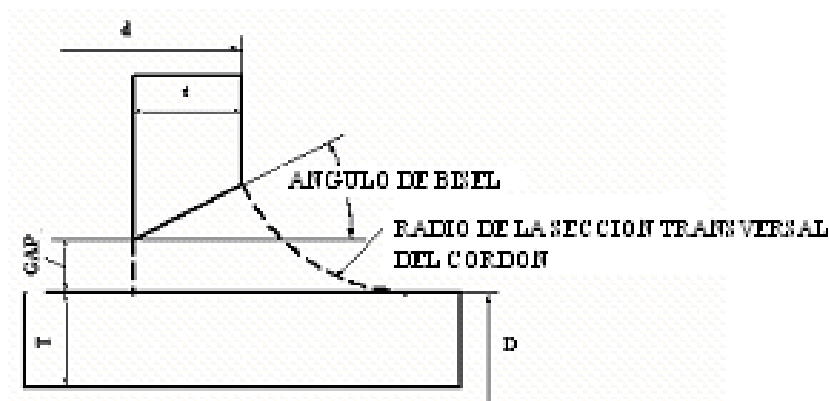


Fig. 4. Parámetros geométricos de la sección transversal del cordón.

Para la determinación de los FCT, los modelos fueron rodados en el software de elementos finitos ALGOR versión 12, realizándose un análisis lineal estático con tensiones máximo principales.

En los análisis con carga axial el sistema fue sometido a cargas que garantizan tensiones nominales unitarias, así en el análisis con momento en el plano el sistema fue sometido a valores de momento que generan tensiones nominales unitarias, lo que permitió la obtención directa de los FCTmax.

Como condiciones de frontera se considero el sistema empotrado en ambos extremos del tubo principal CHORD.

Como material para los modelos fue considerado el acero AISI 1020, con propiedades mecánica: limite de fluencia $\sigma_f = 380$ MPa, coeficiente de Poisson $\mu = 0.3$, y modulo de elasticidad $E = 210$ MPa..

Como criterio de resistencia fue considerado que las aberturas de raíz (GAP) tuvieran una longitud igual al espesor de los tubos secundarios BRACE y el ángulo de bisel igual a la mitad del ángulo de HEEL de la unión.

Como primer paso en la modelación fue realizado un análisis de convergencia para garantizar la precisión de los valores de tensiones en función de la cantidad de elementos a lo largo y en el espesor de la línea del cordón de soldadura, la que fue alcanzada con una cantidad de elementos a lo largo del cordón de 42.

Los valores determinados de FCTmax., se muestran en la tabla I.

Como aspecto innovador de estos resultados (FCTmax.) se muestra que los valores no son obtenidos en los extremos del catetos del cordón de soldadura, si no en el medio del espesor de la línea de soldadura en la zona del CROWN, lo que a nuestro criterio acontece debido al radio obtenido de forma cóncava, figura 5.

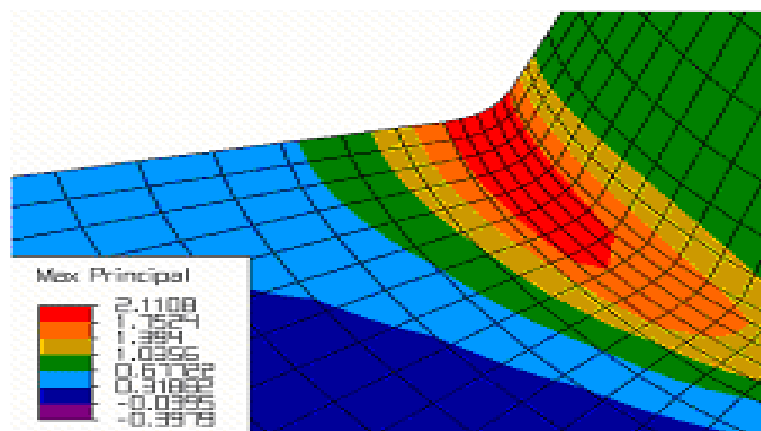


Fig. 5. FTCmax en el medio de la línea de soldadura en la zona del CROWN.

Tabla I. FCT máximo de las uniones en (Y) con ángulos de 60, 70, 80 y 90, Cargadas con momento en el plano.

Exp.	GANMA	BETA	TAO	GAP (mm)	Ángulos de Heel			
					60°	70°	80°	90°
					Angulo de bisel: 30°	Angulo de bisel: 35°	Angulo de bisel: 40°	Angulo de bisel 45°
1	14	0.3	0.5	13.25	1.7492	1.9641	2.0254	2.007
2	14	0.3	1	27	1.6978	1.9324	2.06465	20594
3	14	0.8	0.5	13.25	2.1108	2.2459	2.2855	2.222
4	14	0.8	1	27	2.3835	2.6177	2.7001	2.6124
5	24	0.3	0.5	8	2.5532	2.8607	3.0131	3.008
6	24	0.3	1	16	2.9377	3.3893	3.6263	3.6263
7	24	0.8	0.5	8	2.7769	3.004	3.1217	3.102
8	24	0.8	1	16	3.2403	3.57	3.72	3.638
9	14	0.3	0.5	12.95	1.7254	1.9422	2.0068	1.985
10	14	0.3	1	25.9	1.662	1.8962	2.021	2.0159
11	14	0.8	0.5	12.95	2.0876	2.227	2.2658	2.189
12	14	0.8	1	25.9	2.3285	2.559	2.644	2.5827
13	24	0.3	0.5	7.55	2.5467	2.8562	3.0088	3.009
14	24	0.3	1	15.1	2.9362	3.3870	3.6245	3.6248
15	24	0.8	0.5	7.55	2.7431	2.9705	3.0873	3.073
16	24	0.8	1	15.1	3.1889	3.51	3.6718	3.605

Con el software de estadística STATISTICS, se ajustaron los resultados de FCTmax. de la unión sometida a momento en el plano a un modelo exponencial;

$$FCT_{max.} = b_0 * \gamma^{b_1} * \beta^{b_2} * \tau^{b_3} * \text{seno}^{b_4} \alpha_c \quad (3)$$

$$b_0 = 0,378988$$

$$b_1 = 0,730076$$

$$b_2 = 0,095164$$

$$b_3 = -0,030854$$

$$b_4 = 1,026079$$

Como coeficiente de regresion se obtubo R= 0,9694

El comportamiento de la formula (3) con respecto a los diferentes valores de heel se aprecia en la figura 6.

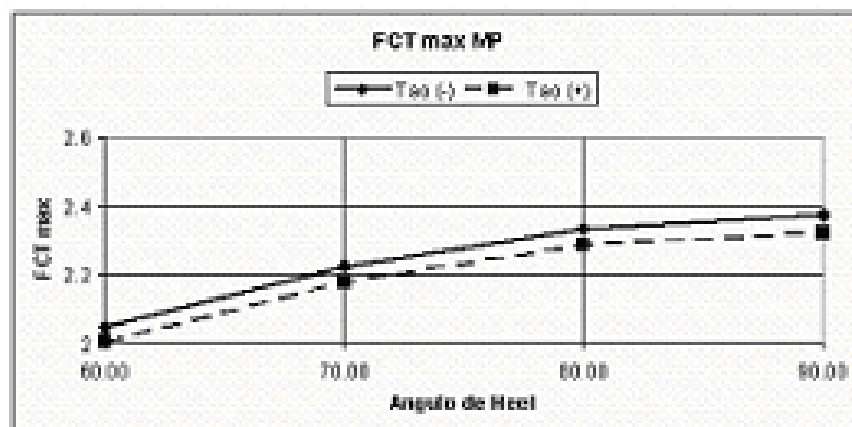
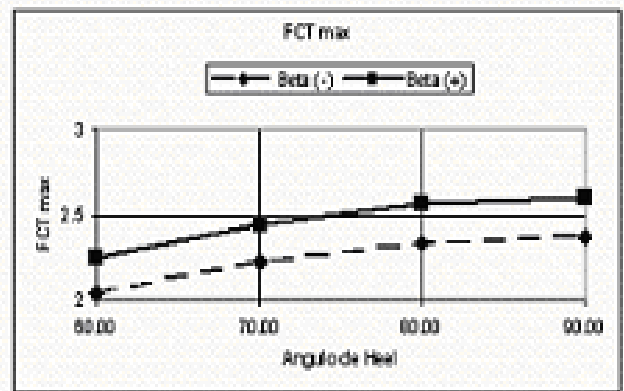
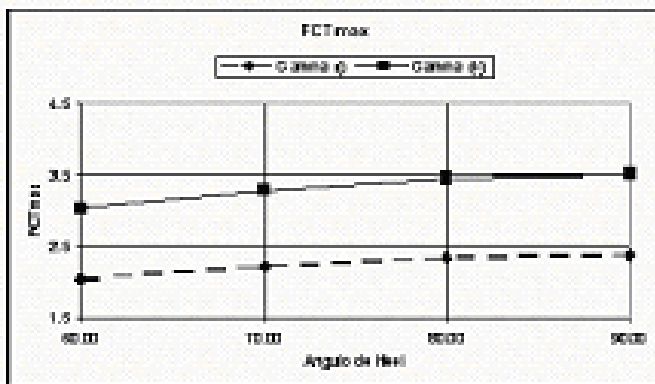


Fig. 6. Comportamiento de la fórmula (3) con respecto a los diferentes ángulos de heel para cada variable.

Uniones tubulares tipo (Y) cargadas axialmente.

Para los análisis de las uniones tipo (Y) sometidas a carga axial, fue usada la misma metodología empleada en las uniones sometidas a momento en el plano, de hecho se usó la misma matriz experimental, siendo el objetivo obtener los modelos matemáticos de FCTmax bajo este tipo de carga.

Las uniones fueron sometidas en los extremos de los tubos secundarios a fuerzas axiales que generan valores unitarios de tensiones nominales, lo que permite que sean obtenidos directamente los resultados de FCTmax, tabla II.

De los análisis realizados, resultó que como en los casos de las uniones en (Y) bajo momento en el plano los valores de FCT max. se presentaron en el medio del espesor del cordón de soldadura en la zona del CROWN HEEL y del SADDLE.

En la tabla II se muestran los valores de FCTmax obtenidos en la zona de CROWN HEEL y de SADDLE, y por excepción en la zona del CROWN para diferentes ángulos de heel. En este punto se debe notar que cuando los valores de FCTmax no coinciden exactamente con la zona del SADDLE están desplazados una pequeña distancia a la zona del CROWN.

En la figura 7 se presenta el modelo obtenido para las tensiones máximas principales (FCTmax) en el medio del espesor l de la línea de soldadura en la zona del SADDLE.

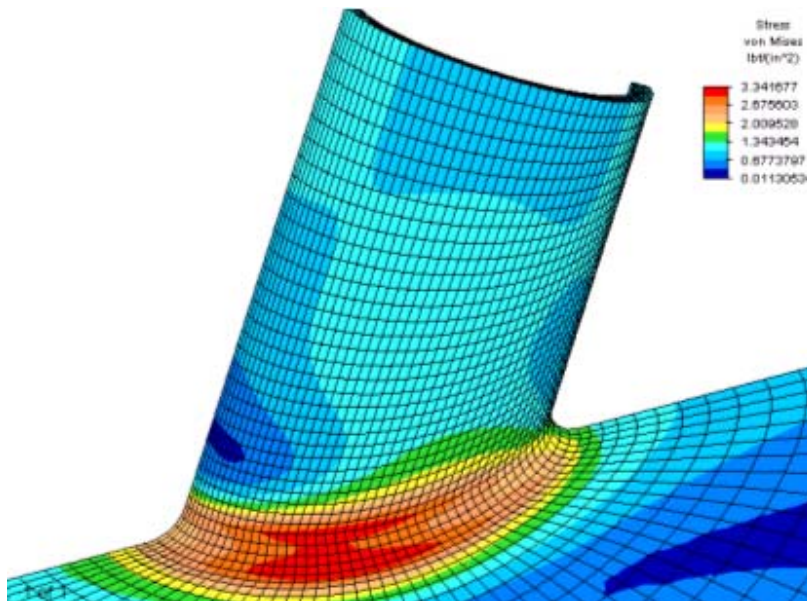


Fig. 7. FCT max en la zona del SADDLE.

Tabla II. Valores de FCT max obtenidos en la zona del CROWN y del SADDLE para diferentes ángulos de heel

Exp.	GAP (mm)	α	γ	β	τ	Ángulos de Heel ($^{\circ}$)							
						60		70		80		90	
						Angulo de bisel: 30°		Angulo de bisel: 35°		Angulo de bisel: 40°		Angulo de bisel: 45°	
						FCT max	Lugar de ocurrencia	FCT max	Lugar de ocurrencia	FCT max	Lugar de ocurrencia	FCT max	Lugar de ocurrencia
1	13.25	7	14	0.3	0.5	4.573	SADDLE	5.323	SADDLE	5.597	SADDLE	5.696	SADDLE
2	27	7	14	0.3	1	6.515	SADDLE	7.732	SADDLE	8.215	SADDLE	8.152	SADDLE
3	13.25	7	14	0.8	0.5	3.346	CROWN HEEL	3.801	CROWN HEEL	3.940	CROWN HEEL	3.830	CROWN
4	27	7	14	0.8	1	4.279	CROWN	4.616	CROWN	4.719	CROWN	4.633	CROWN
5	8	7	24	0.3	0.5	6.774	SADDLE	7.818	SADDLE	8.392	SADDLE	8.455	SADDLE
6	16	7	24	0.3	1	10.865	SADDLE	12.403	SADDLE	13.165	SADDLE	13.114	SADDLE
7	8	7	24	0.8	0.5	4.629	CROWN HEEL	5.168	CROWN HEEL	5.265	CROWN HEEL	5.071	CROWN
8	16	7	24	0.8	1	6.192	CROWN HEEL	6.674	CROWN HEEL	6.699	CROWN HEEL	6.442	CROWN
9	12.95	11	14	0.3	0.5	4.433	SADDLE	5.594	SADDLE	5.906	SADDLE	5.802	SADDLE
10	25.9	11	14	0.3	1	7.040	SADDLE	8.054	SADDLE	8.556	SADDLE	8.464	SADDLE
11	12.95	11	14	0.8	0.5	3.964	CROWN HEEL	4.331	CROWN HEEL	4.394	CROWN HEEL	4.423	CROWN
12	25.9	11	14	0.8	1	4.914	CROWN	5.364	CROWN HEEL	5.466	CROWN HEEL	5.434	CROWN HEEL
13	7.55	11	24	0.3	0.5	6.987	SADDLE	8.423	SADDLE	9.029	SADDLE	9.791	SADDLE
14	15.1	11	24	0.3	1	11.723	SADDLE	13.38	SADDLE	14.19	SADDLE	14.14	SADDLE
15	7.55	11	24	0.8	0.5	6.341	CROWN HEEL	6.513	CROWN HEEL	6.494	CROWN HEEL	6.379	CROWN
16	15.1	11	24	0.8	1	7.677	CROWN HEEL	7.974	CROWN HEEL	7.800	CROWN HEEL	7.385	CROWN

Con el software de estadística STATISTICS, se ajustaron los resultados de FCTmax, obteniéndose un modelo exponencial da forma:

$$FCT_{max.} = b_0 * \alpha^{b_1} * \gamma^{b_2} * \beta^{b_3} * \tau^{b_4} \text{sen}^{b_5} \alpha_c \quad (4)$$

Onde:

b0 = 0,3333

b1 = 0,2180

b2 = 0, 8221

b3 = -4942

b4 = 0,5288

b5 = 1,1948

Como coeficiente de regressão foi obtido R= 0,9.

El comportamiento de la formula (4) con respecto a los diferentes angulos de heel se aprecia en la figura 8.

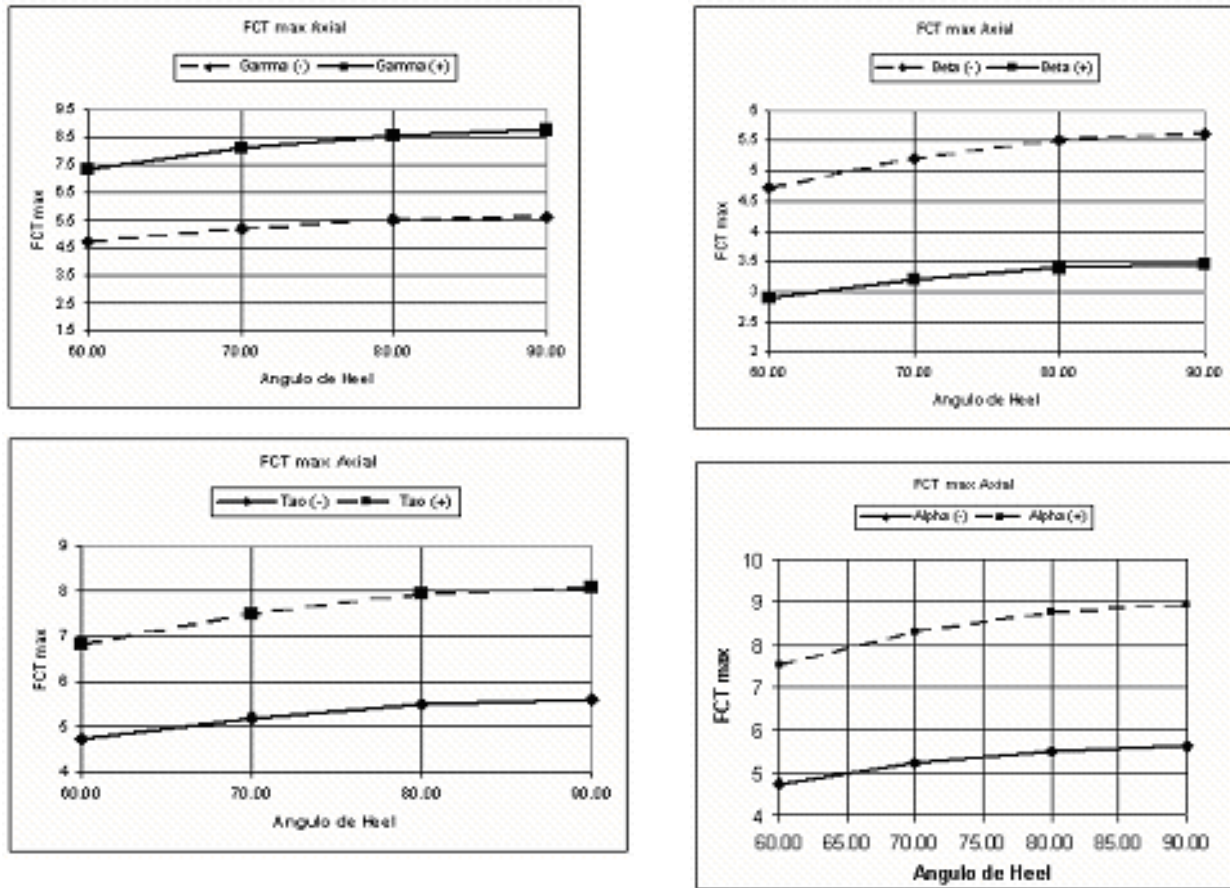


Fig. 8. comportamiento de la formula (4) con respecto a los diferentes angulos de heel para cada variable.

Conclusiones:

- Las fórmulas obtenidas en esta investigación por MEF pueden caracterizarse como mucho más realista que las obtenidas experimentalmente, dada la imposibilidad de medición de las tensiones en la línea del cordón de soldadura por otros métodos.
- Como conclusión final, se puede decir que la comparación con otros investigadores no es recomendable en nuestro caso, ya que para hacer la misma, se precisa de la realización de la interpolación lineal, lo que crea una reducción de los valores de FCTmax en dos ocasiones, en consecuencia de que la zona de HOP-SPOT en nuestras modelos aparecen en el medio del espesor de la línea del cordón de soldadura, figura 9.
 1. La primera reducción aparece al desplazarse el valor de FCT max (1) del medio del espesor del cordón de soldadura al extremo del cateto del mismo, punto (2).
 2. La segunda reducción del valor de FCT tiene lugar al realizar el proceso mismo de extrapolación lineal, punto (3).

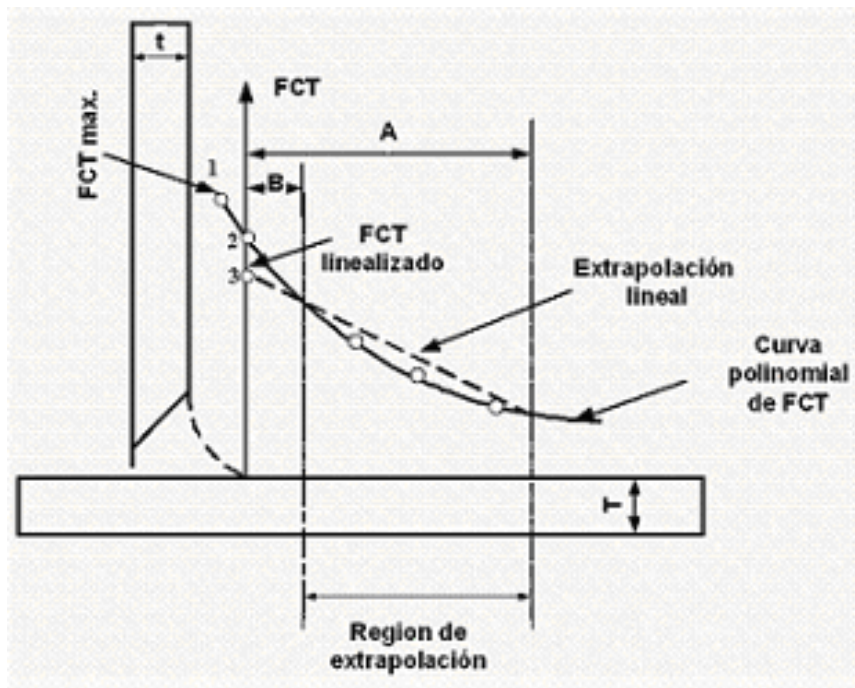


Fig. 9. Esquema de extrapolación.

Bibliografia:

- [1] KUANG J G, POTVIN A B and LEICK R D Stress concentration in tubular joints OTC 2205, Houston, Texas, 1975
- [2] KUANG J G, POTVIN A B, LEICK R D and KAHLICK J L Stress concentration in tubular joints Society of Petroleum Engineers Journal, August 1977.
- [3] GIBSTEIN MB. Parametric stress analysis of T joints. European Offshore Steels Research Seminar, Paper 26, Cambridge, U.K., November, 1978.
- [4] EFTHYMIOU and DURKIN Stress concentrations in T/Y and gap/overlap K joints Behaviour of Offshore Steel Structures, Delft, 1985.
- [5] EFTHYMIOU M Development of SCF formulae and generalised influence functions for use in fatigue analysis. Offshore Tubular Joints, Surrey 1988.
- [6] SPYROS A. KARAMANOS *, ARIE ROMEIJN, JAAP WARDENIER. Stress concentrations in tubular gap K-joints: mechanics and fatigue design. Engineering Structures 22 (2000) 4–14
- [7] Stress concentration factor for simple tubular joints. OTH 354. Prepared by Loyd's Register of Shipping for the Health and Safety Executive.
- [8] VICENTE MARCELO MASSAROTI. Concentração de Tensões em Juntas Tubulares Tipo Y: Análise da Influência da Geometria do Cordão de Solda. Sao Paulo. 1997) (Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia).
- [9] V. M. MASSAROTI, C. A. NUNES DIAS. FEM Parametric solid modelling for welded tubular joint analysis. Proceedings of the IASTED. International Conference APPIED MODELLING AND SIMULATION. Hela July 27-August 1, 1997. Banff, Canada.