

CAPÍTULO 3

CÁLCULO Y ANÁLISIS DE ESFUERZOS RESIDUALES EN ESTRUCTURAS

Introducción

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, los esfuerzos residuales en las estructuras metálicas, componentes mecánicos, etc., se originan por varias causas como los procesos de conformado, de manufactura y fabricación, proceso de soldadura, mecanizado, moldeado, tratamientos térmicos, enfriamientos y calentamientos irregulares, entre otros.

Sin importar el origen de estos esfuerzos la consecuencia es la misma, disminuyen la capacidad de carga de las estructuras. Los esfuerzos residuales pueden ser introducidos a lo largo de la vida útil de la estructura por procedimientos de instalación o montaje, por sobrecargas ocasionales, por efectos de asentamiento del suelo o estructuras subterráneas, o por cargas muertas que pueden llegar a ser parte integrante de la estructura¹.

Por lo que es importante el control o la disminución de las concentraciones de los esfuerzos residuales, con el objetivo de lograr una estabilidad dimensional.

En este capítulo se realizará una descripción para las diferentes aplicaciones de las estructuras, del análisis del comportamiento de estos esfuerzos. Los métodos de cálculo que se presentan pueden ser utilizados en cualquier de las siguientes aplicaciones.

¹ <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/cálculo-de-maquinas/material-de-clase-1/08Tema8.pdf>. Medida de tensiones residuales por el método de las galgas extensiométricas y la perforación de un agujero, Español

3.1 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE ESFUERZOS RESIDUALES TUBERÍAS

La seguridad en las tuberías y sistemas de tuberías es necesaria porque cualquier tipo de falla puede producir pérdidas tanto humanas como económicas. Estos sistemas deben cumplir con abastecimiento continuo del fluido, deben tener eficiencia económica, y el cumplimiento de las normas. Algunas funciones importantes de estos sistemas son los oleoductos, sistemas de vapor, tubería para aire, tubería para agua caliente o fría, tubería de ventilación, entre otras.

En función de la carga a la que esté sometida la tubería o sistema de tubería, a las condiciones de trabajo, al material utilizado, pueden presentar fallas o abolladuras. Por ejemplo los oleoductos pueden fallar por causas internas como las descritas anteriormente, o externas como los desastres naturales, por cualquiera de las dos causas las pérdidas pueden ser graves, por lo tanto es preferible que se controle los parámetros que están a nuestro alcance para poder evitar fallas que pueden ser fatales. “En el año 2005, solo en Estados Unidos, se registró un total de 492 incidentes en el sistema nacional de tuberías de transporte de gas natural y líquidos peligrosos, incluyendo petróleo, generando pérdidas económicas de alrededor de 800 millones de dólares y causando la muerte de 19 personas”².

Se han realizado algunos estudios sobre este tema, por ejemplo tenemos “Respuesta Dinámica No Lineal de Tuberías Curvas bajo cargas Explosivas Mediante una Formulación de Elementos Finitos”, de Jairo F. Useche Vivero, en Colombia; este consiste en analizar el comportamiento de las tuberías de oleoductos cuando están bajo la carga a de alguna carga explosiva, esto se realizó debido a que en Colombia existen atentados terroristas y los resultados no son específicamente rotura de la tubería sino una deformación plástica, estas tuberías pueden seguir operando de una forma segura por un tiempo adicional, con el estudio se pretende descubrir el comportamiento de las tuberías curvas,

² <http://enginzone.com.pe/abstracts/An%E1lisis%20en%20la%20Soldabilidad%20de%20Aceros.pdf>, Estudios de caso de fallas y accidentes en gasoductos y oleoductos, Español

que están sometidos a cargas dinámicas, y también se analiza el comportamiento de esfuerzos residuales porque su presencia si afecta el tiempo adicional de trabajo de las tuberías.

Un análisis de los esfuerzos residuales en el estudio al que se hace referencia se presenta en la grafica 3.1, que muestra una simulación realizada de las tuberías curvas sometidas a una carga de impacto como es en este caso de explosión.

Se nota claramente como aumenta la concentración de esfuerzos residuales directamente con el tiempo de duración de la explosión y su deformación también es más evidente.

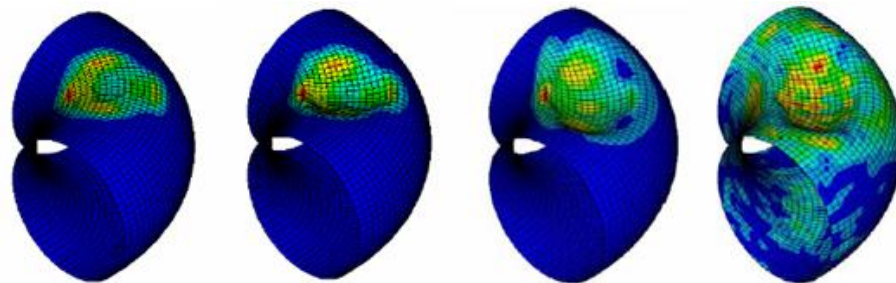


Figura. 3.1 Distribución de las deformaciones en tiempos de 0.1ms, 0.6ms y 0.05ms a partir de iniciado el evento. (La grafica de la derecha presenta la distribución de esfuerzos residuales)

3.2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE ESFUERZOS RESIDUALES Puentes

Los puentes son estructuras metálicas en las que es de vital importancia la seguridad en su funcionamiento, los análisis o estudios que se realicen son para garantizar una buena operación y servicio durante la vida útil. Algunas de estas estructuras han fallado, por ejemplo tenemos el Puente Silver en Virginia, en diciembre de 1967, se comprobó que la causa principal fue la concentración de esfuerzos residuales en los componentes críticos de la estructura.

La falla empezó con pequeños agrietamientos, estos fueron aumentando, provocando la deformación y la posterior fractura, como una reacción en cadena de toda la estructura, y en menos de un minuto el puente desapareció.



Figura 3.2 Puente Silver (Silver Bridge) antes y después del colapso

Para la detección de fallas o grietas en las estructuras metálicas en este caso puentes se usa el proceso de líquidos penetrantes porque tiene una fácil aplicación y se puede utilizar en varios materiales, como ya se explicó en el capítulo anterior, este proceso consiste en que un líquido penetre por hendiduras o grietas para que se puedan observar con facilidad, se basa en los principios de acción capilar. Pero presenta la desventaja cuando existen concentraciones de esfuerzos residuales en el elemento, se dificulta la medición porque estas no permiten una penetración completa de las tintas y no se puede obtener resultados confiables.

Se utilizan algunas técnicas para la detección de las concentraciones de esfuerzos residuales en estas estructuras por ejemplo tenemos: las corrientes inducidas o Eddy, o la medida de deformaciones por difracción de rayos-x, que son técnicas no destructivas pero presenta grandes desventajas; porque el equipo que se requiere para su realización es demasiado complejo y de grandes dimensiones lo que reduce el campo de aplicación³.

3.3 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE ESFUERZOS RESIDUALES EDIFICIOS

Las estructuras metálicas que son base para los edificios, no deben tener ningún tipo de fallas por las consecuencias que estas conllevarían, como el daño material y la pérdida humana.

³ <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt231.pdf> , Evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes, Español

Los esfuerzos residuales y su distribución son factores muy importantes que afectan la resistencia de las columnas de acero cargados axialmente. Una causa muy importante de los esfuerzos residuales es el enfriamiento desigual que sufren los perfiles después de haber sido laminados en caliente, por ejemplo, en un perfil W los extremos de los patines y la parte media del alma se enfrían rápidamente, en tanto que las zonas de intersección del alma con los patines lo hacen más lentamente. Las partes de la sección que se enfrían con más rapidez al solidificarse resisten posteriores acortamientos, en tanto que aquellas partes que están aun calientes tienden a acortarse aun más al enfriarse. El resultado es que las áreas que se enfrían más rápidamente que dan con esfuerzos residuales de compresión, en tanto que las áreas de enfriamiento más lento quedan con esfuerzos residuales de tensión. En consecuencia una columna con esfuerzos residuales se comporta como si tuviese una sección transversal más pequeña. Otra causa de esfuerzos residuales puede ser también la soldadura.

Lo óptimo para la realización de cualquier tipo de estructura sería poder eliminar completamente las concentraciones de estos esfuerzos, pero lamentablemente por su naturaleza es imposible, únicamente se los puede atenuar. El proceso de atenuación se realiza mediante los métodos que fueron descritos en el capítulo anterior.

Por la función que estos desempeñan, y por las cargas a las que están sometidos existen concentraciones de esfuerzos residuales, algunos elementos tienen cargas axiales que pueden ser de tracción o compresión, cargas a flexión, o cargas a torsión. En estos tres casos el principio de creación de las concentraciones es el mismo, y se explica a continuación.

Una diferencia por las cargas es que cuando estas son de torsión, y se retira el par de torsión el esfuerzo residual creado es cortante. Y en los dos casos restantes el esfuerzo es de fluencia.

Como ya se explicó en capítulos anteriores, las cargas externas excesivas también crean estas tensiones, cuando causan la fluencia del material, es decir

cuando la carga es retirada del elemento; la principal causa es la recuperación elástica del material.

Cuando las estructuras son estáticamente determinadas tienen una recuperación de solo una parte de la deformación plástica, pero llega al valor de cero en los esfuerzos; es decir, a su estado inicial de esfuerzo. Al contrario de las estructuras estáticamente indeterminadas que al retirar la carga externa ocasionará que las fuerzas en los soportes respondan a una recuperación elástica. Como estas fuerzas impiden que el miembro se recupere plenamente, inducen esfuerzos residuales en el miembro.⁴

Se detalla de mejor manera este comportamiento en la figura 3.3, que se presente a continuación:

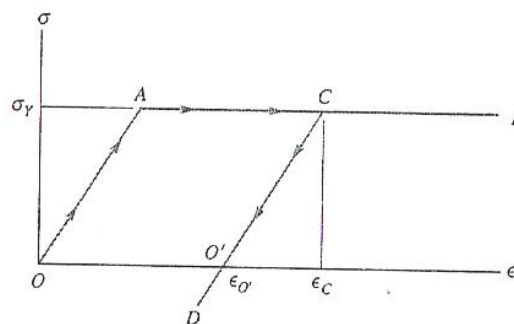


Figura. 3.3 Diagrama esfuerzo-deformación

La recuperación elástica de la que se habló es la que muestra la línea CD, que demuestra que el elemento, después de retirar la carga tiene una recuperación parcial de la deformación y el esfuerzo es cero; esto en estructuras estáticamente determinadas. Pero en estructuras indeterminadas la deformación que tiene el elemento cuando se descarga es el valor de ϵ_C , esta circunstancia induce la creación de esfuerzos residuales.

Para las tres cargas mencionadas, se puede calcular la distribución de los esfuerzos residuales aplicando los principios de la superposición y de recuperación elástica.

⁴ HIBBELER, C. Mecánica de materiales. pp 173,253, 360

3.4 OTRAS APLICACIONES.

Existen otras estructuras metálicas que también son propensas a las concentraciones de esfuerzos residuales por lo que están en peligro de fallar.

Por ejemplo tenemos las carrocerías de los autobuses que por sus dimensiones y la importancia de su funcionamiento porque permanentemente están bajo una carga (personas), también por su propio peso, pueden existir fallos estructurales.

Para todas las estructuras es necesario conocer el comportamiento de estos esfuerzos, porque no se pueden saber los valores exactos de los esfuerzos durante el ensamblaje, por esto se han realizado estudios acerca de las concentraciones de esfuerzos residuales en carrocerías.

En estos estudios se comprueba que el problema incrementa cuando las cargas de trabajo se redistribuyen por algún daño en la estructura o alguna modificación de la misma, como consecuencia de procesos de mantenimiento y rehabilitación⁵.

El estudio al que hace referencia tiene por nombre “Determinación Experimental de Tensiones Residuales en un Autobús Urbano”, y plantea la posibilidad de aplicar la técnica de liberación de tensiones por perforación, pero previamente se determinan estas tensiones por otras técnicas.

En el estudio usan la técnica utilizada por Rendler y Vigness, que es similar a la que se usa en este proyecto, pero ellos determinan los coeficientes de calibración y comparan con los coeficientes tabulados. Con esto se demuestra que los esfuerzos residuales afectan a todas las estructuras metálicas, sea por los procesos de mecanizado, soldadura, tratamientos térmicos, etc., o por la acción de cargas externas aplicadas a los elementos. Y por eso es importante su determinación o por lo menos conocer su comportamiento.

Otra aplicación de la medición de esfuerzos residuales es en los materiales cerámicos especiales. Gracias a la inducción de esfuerzos residuales superficiales

⁵ <http://www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/31/31-10.pdf>, Determinación experimental de tensiones residuales en un autobus urbano, Español

las propiedades de algunos materiales cerámicos pueden mejorar, esto se ha comprobado con algunos estudios realizados, se toma de referencia una tesis que se titula “Aumento de las Propiedades Mecánicas de Y-TZP producido por Tensiones Residuales”, desarrollada por A. Juy y M Angala en el Departamento de Ciencia de los Materiales E ingeniería metalúrgica ETSEIB, en la Universidad Politécnica de Cataluña, para explicar esta afirmación.

El material Y-TZP es un cerámico avanzado, una aleación cerámica de circona estabilizada con itria, estas aleaciones presentan propiedades como la resistencia al contacto y al choque térmico, por esto las principales aplicaciones son las que están en contacto entre superficies y sometidos a cambios de temperatura, y no presentan desgaste, ni daño por contacto o grietas.

La tesis a la que se hace referencia se basa en que los procesos de mecanizado pueden afectar las propiedades mecánicas de los materiales, y también pueden inducir tensiones residuales que según su concentración pueden influir positivamente en las propiedades de las aleaciones. Generalmente el proceso que se emplea es el desbaste abrasivo, para poder obtener dimensiones exactas finales de la pieza.

Las tensiones residuales superficiales de compresión mejoran la resistencia a la fractura de estos materiales, pero el mecanizado puede aumentar el daño en la capa superficial y como consecuencia se tiene una disminución de la resistencia.

Los procesos de medición que se usó en el estudio nombrado son, como proceso no destructivo, la difracción de rayos X y como semidestructivo, la eliminación de capas y realizar la medición por difracción de rayos X.

Para realizar el proceso de difracción de rayos X es necesario que las mediciones sean con una incidencia de poca penetración para poder obtener valores de la capa más externa, ya que las tensiones residuales son superficiales. Si se realiza el proceso de eliminación de capas para la medición con difracción de rayos X es necesario tomar en cuenta que cuando se eliminan capas se pueden redistribuir o

relajar las tensiones expuestas en la superficie especialmente si el elemento es delgado.

Esta es una de las aplicaciones de la medición de esfuerzos residuales que se está utilizando en la actualidad, como en el caso descrito para conocer las propiedades de los materiales y conocer la influencia de las concentraciones de estos esfuerzos.

Con eso se puede acotar que la concentración de esfuerzos residuales puede ser benéfica en algunas situaciones, como la de incrementar las propiedades mecánicas de ciertos materiales, pero en otras como las estructuras metálicas pueden ser perjudiciales porque pueden provocar catástrofes.

3.4.1. APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE MEDICIÓN

3.4.1.1 Difracción de rayos – x

Se han desarrollado algunas investigaciones utilizando el método de rayos x, aquí se presenta el resultado del proyecto “DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES EN PELÍCULAS UTILIZANDO DIFRACCIÓN DE RAYOS-X DISPERSIVO EN ENERGÍA”, por J A Alfonso, B Lavelle E.D. Greaves y L Sajo-Bohus; en Caracas Venezuela; este utiliza el sistema DRXDE que consiste en un generador de Rayos-x convencional, un goniómetro con aditamento de medir textura por el método de Schutz y un detector de estado sólido de alta resolución de germanio de alta pureza conectado a un espectrómetro de rayos-x.

El aditamento de textura utilizado permite la medición de esfuerzos residuales mediante el método de goniómetro Ψ , lo que permite que la muestra pueda ser rotada en los ángulos θ , Ψ y ψ

Para la evaluación de esfuerzos, es importante la precisión en la medición de la posición del pico de la línea de difracción, porque se mide a través de la detección del corrimiento de la línea.

Las líneas de DRXDE son casi gaussianas perfectas, lo que facilita su análisis; ya que, la energía del pico de esta línea es el centro de la curva gaussiana.

Se realiza la evaluación del esfuerzos residual en una película de Ni; de espesor 0.8mm, también se necesita una muestra libre de esfuerzos de similares características.

Se evalúan varios ángulos de incidencia para minimizar la intensidad del pico de grafito, encontrando como ángulo optimo de 11°; con este ángulo constante se variaron algunos ángulos de inclinación, en la grafica se presenta el espectro obtenido para el ángulo de inclinación de cero; medido durante 30 minutos.

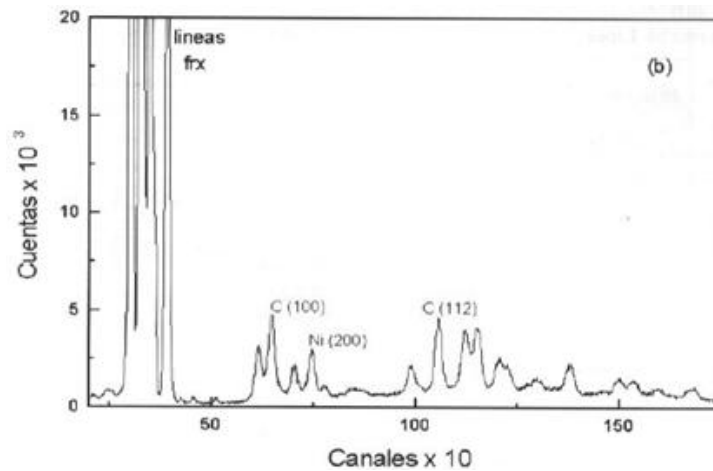


Figura. 3.5 Espectros de difracción de rayos-x dispersiva en energía de una película de Ni sobre grafito

Para las constantes elásticas se utilizó el modelo de Kroner y medidas experimentales con rayos-x; las ecuaciones que se usaron son:

$$\frac{1}{2}S_2 = 6.810 \times 10^{-6} (\text{MPa})^{-1} = \frac{1+\nu}{E} \quad 3.4$$

$$S_1 = -1.570 \times 10^{-6} (\text{MPa})^{-1} = \frac{-\nu}{E} \quad 3.5$$

El esfuerzo residual en cada película fue evaluado utilizando la relación entre la deformación del plano y la energía de los rayos-x, que puede ser expresada como:

$$\epsilon_{\psi}^{hkl} = \frac{E_0^{hkl} - E^{hkl}}{E^{hkl}} \quad 3.6$$

Donde: E_0^{hkl} y E^{hkl} es la energía del pico de los rayos-x difractada en el plano de res de un material libre de deformación y de otro con deformación, respectivamente.

Asumiendo que el tensor de esfuerzos dentro de la placa es biaxial, se tiene:

$$\varepsilon_{\psi}^{hkl} = \left(\frac{S_2^{hkl}}{2}\right)\sigma_{\phi}\text{sen}^2\psi \quad 3.7$$

Así, los esfuerzos residuales de la película en el plano paralelo a ella puede ser calculado, con la siguiente expresión:

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{2}{S_2}\right)M \quad 3.8$$

Donde M es la pendiente de la línea recta ajustada sobre la dependencia grafica de $\left(\frac{E_0-E}{E}\right)$ con $\text{sen}^2\psi$.

E_0 es la energía del pico medido sobre la muestra estándar libre de esfuerzo y E sobre la película que se analiza. En la figura se presentan los valores experimentales que se obtuvieron. Se ajusto la línea con mínimos cuadrados. El esfuerzo total es de 1.58+- 0.17GPa. el comportamiento lineal de los resultados en el diagrama $\text{sen}^2\psi$ confirma que el esfuerzos esta en el plano biaxial

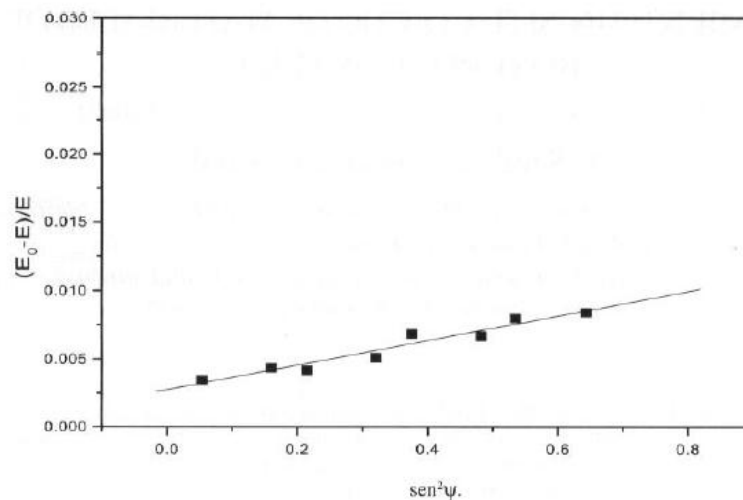


Figura 3.6 Variación de la deformación con $\text{sen}^2\psi$

3.4.1.2 Corrientes de Eddy

En este ensayo mide los cambios de impedancia inducidos en un material conductor eléctrico. Esto consiste en pasar una corriente alterna por un solenoide, la cual genera un campo magnético. Al colocar la pieza a inspeccionar en dirección perpendicular al campo magnético creado por el solenoide, se generan corrientes inducidas (Corrientes de Eddy) circulares en la pieza. Las corrientes eléctricas inducidas van a producir un campo magnético (secundario), que se va a oponer al campo magnético del solenoide (primario) y modificará la impedancia de la bobina.

La variación de la corriente eléctrica que circula por la bobina es el parámetro que se mide y registra. Los defectos existentes en la pieza interrumpen las corrientes de Eddy, lo que provoca que el campo magnético producido por dichas corrientes sea menor. Este proceso tiene algunas ventajas, por ejemplo: es utilizado para defectos en la superficie o cercanos a la superficie, no necesita preparación superficial, la evaluación es instantánea, es sensible a muchas variables físicas y metalúrgicas, no tiene contacto con la pieza a ensayar. Un limitante es que solo se trabaja con materiales conductores de electricidad, y se debe tener acceso libre a la superficie, la profundidad a la que llega es de 6mm.

Por una alta sensibilidad a la conductividad del material, se la usa para la detección de esfuerzos residuales, tamaño de grano, dureza. Y por su sensibilidad a la homogeneidad geométrica ayuda a detectar grietas, inclusiones, costuras, picaduras por corrosión.

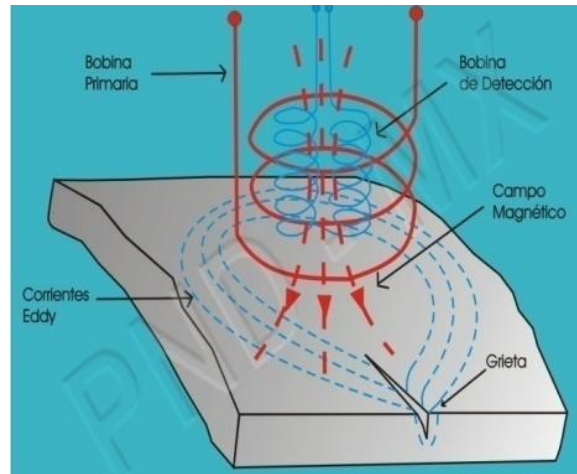


Figura 3.7 Aplicación de las corrientes de Eddy

3.4.1.3 Técnica del hole-drilling

Esta técnica se basa en la aliviación de tensiones producidas al perforar un agujero en la placas a medir, se colocan galgas extensiométricas o rosetas de deformación las cuales miden las deformaciones unitarias las cuales sirven para realizar el cálculo de los esfuerzos, este técnica se usará para la elaboración de este proyecto, antes de realizar las mediciones y realizar las probetas, se realizó una probeta de prueba para verificar si el método se lo puede realizar en el laboratorio de Mecánica de materiales.

Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

Tabla 3.1 Datos de la probeta de prueba

T(s)	ϵ_1 (10^{-6})	ϵ_2 (10^{-6})	ϵ_3 (10^{-6})
0	0	0	0
30	55	68	57
60	109	90	78
90	96	102	90
120	136	131	128
150	155	148	131

180	169	181	164	
210	196	208	195	
240	245	250	240	
260	160	110	146	Después Taladrado
320	100	62	72	ESTABILIZAR 2min
380	95	53	64	
440	85	47	35	
500	74	38	27	
560	60	34	23	
620	58	32	21	
680	54	29	18	
740	51	28	18	

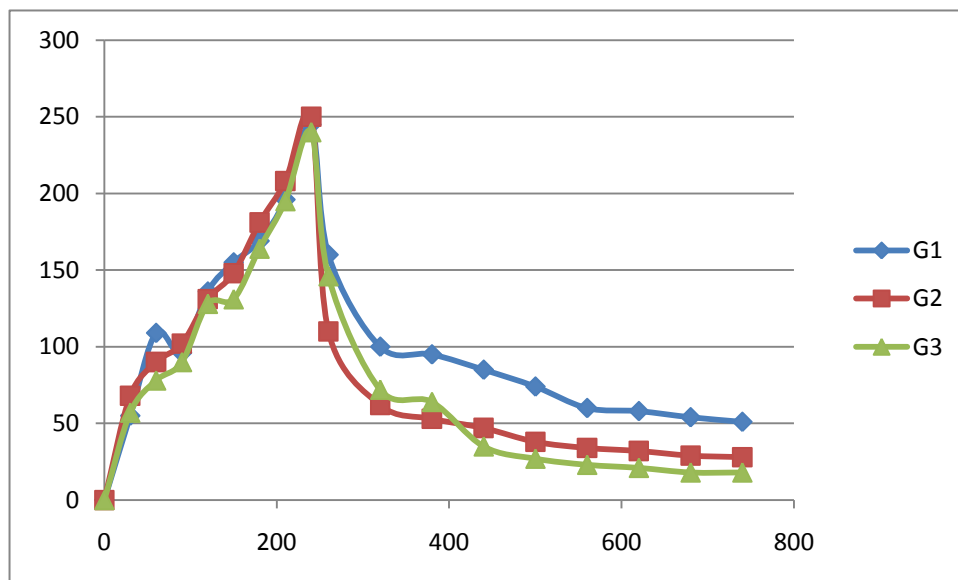


Figura. 3.4 Gráfica de proceso de la probeta de prueba

Después de esto, con los últimos valores de las deformaciones de las tres galgas extensiométricas (deformaciones locales en la superficie del objeto a ensayar) se

procede a calcular el cambio de tensiones en las regiones inmediatamente circundantes a la perforación, este principio de medición de los esfuerzos residuales, fue propuesto por Mathar. Esta técnica fue desarrollada por Kirsch en 1898 y se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\sigma_{\max}^{\text{res}} = \frac{\epsilon^1 + \epsilon^3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon^3 - \epsilon^1)^2 + (\epsilon^3 + \epsilon^1 - 2\epsilon^2)^2} \quad 3.1$$

$$\sigma_{\min}^{\text{res}} = \frac{\epsilon^1 + \epsilon^3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon^3 - \epsilon^1)^2 + (\epsilon^3 + \epsilon^1 - 2\epsilon^2)^2} \quad 3.2$$

$$\tan 2\theta = \frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \quad 3.3$$

Estas fórmulas son las que se usan en esta investigación para obtener el valor de los esfuerzos residuales que fueron aliviados en las probetas por la perforación del agujero.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 3.2 Resultados de los esfuerzos residuales de la probeta de prueba

	VALOR	UNIDADES
ESFUERZO MÁXIMO	-37.11	MPa
ESFUERZO MÍNIMO	-58.92	MPa
ÁNGULO	-30.92	°

En el capítulo 4 se explica con más detalle el proceso de medición de esfuerzos residuales. Y con los resultados de las 24 probetas se realiza una comparación de los valores, para poder establecer un posible comportamiento de estas concentraciones en las probetas.