

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO
DE UNA TAPA PARA POZO DE DRENAJE UTILIZANDO
ROSETAS DE DEFORMACIÓN.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

LUIS ALBERTO ARAUJO TEJADA

**DIRECTOR: ING. JOSÉ PEREZ
CODIRECTOR: ING. GONZALO MORA**

Sangolquí, 2006 – 08

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “Simulación y análisis del comportamiento mecánico de una tapa para pozo de drenaje utilizando rosetas de deformación.” fue realizado en su totalidad por Luis Alberto Araujo Tejada, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Pérez
Director

Ing. Gonzalo Mora
Codirector

Sangolquí, 2006 - 08 -18

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA TAPA PARA POZO DE DRENAJE UTILIZANDO ROSETAS DE DEFORMACIÓN.”

ELABORADO POR:

Luis Albero Araujo Tejada

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**CORONEL ING. JUAN DÍAZ
COORDINADOR - FIME**

Sangolquí, 2006 - 08

DEDICATORIAS

A Anita Isabel y José Andrés, regalos de la vida vestidos de alegría e inocencia; les brindo estos años de estudio, en tributo al incesante carnaval que le brindan a mi carácter de niño viejo; con su jugar, son mi remedio de cualquier angustia o quebranto.

su tío Luis

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, que con su constancia, ejemplo, entereza, entrega y paciencia, me han criado como hombre de bien; a mi hermana, mi amiga incondicional y soporte espiritual; a mis sobrinos, por su eterna calidez; a mi basta familia, que desde mi niñez ha estado presente a lo largo de mi vida con voz de apoyo y cariño; a Gabriela, por tu valioso consejo y por haberme brindado nuevas formas de pensar y de ver la vida; a mis amigos y amigas que me han dado su confianza, amistad y presencia; a aquellos docentes, quienes durante años han compartido su conocimiento y experiencia en busca de buenos profesional con una clara conciencia social, ética y moral.

Al creador, por haberme traído al mundo en el mejor lugar, y por haberme rodeado de la mejor gente.

Gracias a todos!.

INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	<i>i</i>
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	<i>iii</i>
DEDICATORIAS.....	<i>v</i>
AGRADECIMIENTOS.....	<i>vi</i>
INDICE DE CONTENIDOS	<i>vii</i>
INDICE DE ECUACIONES Y TABLAS	<i>xi</i>
INDICE DE FIGURAS Y GRAFICOS.....	<i>xiii</i>
RESUMEN	<i>xvii</i>

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES	<i>1</i>
1.1 INTRODUCCIÓN	<i>1</i>
1.2 ANTECEDENTES	<i>2</i>
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	<i>2</i>
1.4 OBJETIVOS.....	<i>2</i>
1.4.1 GENERAL	<i>2</i>
1.4.2 ESPECÍFICOS	<i>3</i>
1.5 ALCANCE.....	<i>3</i>

CAPÍTULO 21

FUNDAMENTOS TEÓRICOS5

2.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LA FUNDICIÓN EN HIERRO	<i>5</i>
2.1.1 HISTORIA	<i>5</i>
2.1.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES	<i>7</i>
2.1.3 FUNDICIÓN DEL HIERRO.....	<i>19</i>
2.1.3.1 Hornos.....	<i>23</i>
2.2 CÍRCULO DE MOHR	<i>25</i>
2.2.1 TRANSFORMACIÓN DEL ESFUERZO PLANO.....	<i>25</i>

2.2.2	ESFUERZOS PRINCIPALES	27
2.2.3	ESFUERZOS CORTANTES MÁXIMOS	28
2.2.4	CIRCULO DE MOHR PARA ESFUERZO BIAxIAL	30
2.2.5	TRANSFORMACION DE DEFORMACION PLANA	32
2.2.6	CIRCULO DE MOHR PARA ESFUERZO TRIAXIAL.....	35
2.3	DIAFRAGMAS.....	41
2.3.1	ESFUERZO	42
2.3.2	MOMENTOS FLECTORES	45
2.3.3	ECUACIÓN GENERAL PARA LA PENDIENTE Y DEFLEXIÓN....	46
2.3.4	PLACA CIRCULAR CON CARGA UNIFORME Y CON BORDES LIBREMENTE APOYADOS.....	48
2.3.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS: LIMITACIONES DE LA TEORÍA..	48
2.4	ROSETA DE DEFORMACIÓN	49
2.4.1	RELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS EXTENSIÓMETROS ELÉCTRICOS.....	50
2.5	SOFTWARE DE DISEÑO POR ELEMENTOS FINITOS.....	52
2.5.1	SOLIDWORKS 2005 Profesional.....	53
2.5.2	COSMOSWORKS SPo 2005 Profesional.....	53
2.5.2.1	Criterios de análisis de esfuerzos en COSMOSWORKS SPo 2005 Profesional	54
2.5.2.2	Selección del criterio de análisis de esfuerzos.....	57
 CAPÍTULO 3		
	CARACTERIZACIÓN.....	59
3.1	ANÁLISIS METROLÓGICO	59
3.2	ENSAYOS MECÁNICOS	60
3.3	TIPO DE MATERIAL	61
3.3.1	ENSAYOS DE TRACCIÓN:.....	61
3.3.2	ENSAYOS DE COMPRESIÓN:	62
3.3.3	ENSAYOS DE DUREZA:.....	63
3.3.4	ENSAYOS METALOGRAFICO:	63
 CAPÍTULO 4		
	SIMULACIÓN.....	71

4.1	MODELAMIENTO.....	71
4.2	ESTADO DE CARGAS.....	72
4.3	SIMULACIÓN.....	74
4.4	PUNTOS CRÍTICOS Y RESULTADOS.	75

CAPÍTULO 5

	COMPORTAMIENTO MECÁNICO UTILIZANDO STRAIN GAUGES	79
5.1	ANÁLISIS DE CARGAS Y APOYOS.....	79
5.2	EQUIPOS E INSTRUMENTOS A UTILIZAR.	80
5.3	COLOCACIÓN DE LA ROSETA DE DEFORMACIÓN.	81
5.4	MEDICIÓN DE ESFUERZOS, DEFORMACIONES UNITARIAS Y DEFLEXIONES.	82

CAPÍTULO 6

	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	89
6.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.	89
6.2	RETROALIMENTACIÓN.	93
6.3	CONSIDERACIONES Y FACTORES DE CORRECCIÓN.....	93
6.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	96

CAPÍTULO 7

	ESTUDIO ECONÓMICO FINANCIERO	99
7.1	ANÁLISIS ECONÓMICO	99
7.2	ANÁLISIS FINANCIERO	100

CAPÍTULO 8

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
8.1	CONCLUSIONES	101
8.2	RECOMENDACIONES	102

INDICE DE ECUACIONES Y TABLAS

Tab. 2.1: Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A48-41. F: ferrita; P: perlita; G: grafito; B: bainita	12
Tabla. 2.2: Propiedades mínimas de los hierros blanco, gris, dúctil y maleable. MATERIALES DE INGENIERÍA Y SUS MATERIALES, Flinn Trojan, tercera edición, pg 26	
Tab. 2.1: Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A48-41. F: ferrita; P: perlita; G: grafito; B: bainita	12
Tabla. 2.2: Propiedades mínimas de los hierros blanco, gris, dúctil y maleable. MATERIALES DE INGENIERÍA Y SUS MATERIALES, Flinn Trojan, tercera edición, pg 268.....	13
Tabla. 2.3: Propiedades físicas de metales típicos de fundición.....	22
Tabla 2.4: Tipos de extensiómetros eléctricos.....	49
Tabla 3.1: Resultados de ensayos a tracción.....	61
Tabla 3.2: Resultados de ensayos a compresión.....	62
Tabla 3.3: Resultados de ensayos de dureza	63
Tabla 3.4: Resultados ensayo metalográfico.....	68
Tabla 5.1: Hoja técnica, Vibroforo de baja frecuencia AMSLER.....	80
Tabla 5.2: Datos de deformaciones unitarias reales.....	84
Tabla 5.3: Esfuerzos principales determinados por roseta de deformación....	87
Tabla 5.4: Módulo de elasticidad, Coeficiente de Poisson, Módulo de rigidez.	87
Tabla 6.1: Resultados promedio de los dos esfuerzos principales de la primera roseta de deformación, determinados en la simulación por COSMOSWORKS SPo 2005.....	91

Tabla 6.2: Resultados promedio de los dos esfuerzos principales de la segunda roseta de deformación, determinados en la simulación por COSMOSWORKS SPo 2005.....	92
Tabla 7.1: Detalle de costos de realización del proyecto de tesis.	100

INDICE DE FIGURAS Y GRAFICOS

Figura 2.1: Diagrama Hierro – Carburo de Hierro al 2% de silicio. Fuente Metal Handbook, ASTM.	8
Figura 2.2: Las hojuelas de grafito eutéctico aparecen en esta fotomicrografía de color negro, y es común de que la fractura de la fundición gris se dé a través de las líneas que forman estas.	14
Figura 2.3: Clasificación de las láminas de grafito según la forma, tamaño y distribución	14
Figura 2.4: Microestructura del hierro gris (ferrita y perlita).....	15
Figura 2.6a: Efecto en la resistencia a la tracción en el centro de un espécimen de fundición para cinco clases de fundición gris. Fuente: METALS HANDBOOK, Vol 1, Novena edición, pg. 14.	17
Figura 2.7: Elemento diferencial sometido a cargas normales y cortantes	25
Figura 2.8: Rotación del eje coordenado de elemento diferencial.....	26
Figura 2.9: Estado de tensiones en un plano inclinado del elemento diferencial.	26
Figura 2.10: Estado de carga de un elemento diferencial con ejes rotados. ...	31
Figura 2.11: Circulo de Mohr de estado biaxial.....	32
Figura 2.12: Esquema de deformación plana, eje Z perpendicular a planos de deformación.....	33
Figura 2.13: Barra larga sometida a cargas transversales uniformemente distribuidas	33
Figura 2.14: Esquema de elemento diferencial cuadrado antes de deformación	34

Figura 2.16: Elemento diferencial con esfuerzos presentes en los tres ejes. ..	35
Figura 2.17: Elemento diferencial en rotación respecto del eje Xp.....	36
Figura 2.18: Circulo de Mohr para estado triaxial.	36
Figura 2.19: Elemento diferencial en rotación respecto del eje Yp.....	37
Figura 2.20: Círculo de Mohr para $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, con $\sigma_3 = 0$	38
Figura 2.21: Círculo de Mohr para $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, con $\sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$	38
Figura 2.22: Elemento diferencial tanto con esfuerzos normales como cortantes en todas sus caras.	40
Figura 2.23: Convención de signos para el esfuerzo cortante.....	41
Figura 2.27: Diagrama de cuerpo libre de elemento diferencial de placa circular.	46
Figura 2.28: Ubicación de deformímetros para la medición de ε_1 , ε_2 y ε_3	52
Figura 2.29: Roseta de deformación a 45°	52
Figura 3.1: Esquema de medidas tomadas de las tapas estudiadas.....	59
Figura 3.2: Ubicación y disposición de probetas para ensayos a tracción y compresión.	60
Figura. 3.3: Esquema de puntos de indención para ensayo de dureza Rockwell.	63
Figura 3.4: Ubicación y disposición de corte para ensayo metalográficos.....	64
Figura 3.5: Corte de probetas de la tapa de pozo de inspección.....	64
Figura 3.6: Cortadora de disco abrasivo de probetas en frío.....	65
Figura 3.7: Desbaste de rebaba con piedra de esmeril.	65
Figura 3.8: Secuencia de pulido mecánico y manual.	66

Figura 3.9: Materiales, equipos y proceso de pulido espejo.	66
Figura 3.10: Equipo para brillado con disco de seda.	66
Figura 3.11: Puntos de estudio para ensayos metalográficos.....	67
Figura 3.12: Microfotografías del análisis de tamaño, tipo y distribución del grafito.	67
Figura 4.1: Despiece en tres componentes de la tapa, placa, nervios, cerco central y cerco base.	71
Figura 4.2: Disposición del ensayo para la capacidad de carga a flexión de juegos de alcantarillado. Norma CAPRE – ANDESAPA 026 – 1997. ...	72
Figura 4.3: Disposición del punzón para el ensayo para la capacidad de carga a la flexión de juegos de alcantarillado. Norma CAPRE – ANDESAPA 026 – 1997.	73
Figura 4.4: Diagrama de cuerpo libre de tapa de alcantarilla.....	73
Figura 4.5: Ensamble de la tapa de inspección sobre su cerco.	74
Figura 4.6: Distribución del factor de diseño para una carga de 16 [Tm].	76
Figura 4.7: Isovalor de sectores en los que el FDS = 1 para una carga de 16 [Tm].	76
Figura 4.8: Resultado de estudio en COSMOSWorks Spo 2005 de para material homogéneo promedio obtenido cargado con 16 [Tm].	77
Figura 4.9: Deformación del cerco central, carga de 16 [Tm], deformación definido en exceso 100 veces.	78
Figura. 5.1: Vibroforo de baja frecuencia AMSLER.....	80
Figura 5.3: Sensores y equipo para medición de deformaciones unitarias.	82
Figura 5.5: Disposición geométrica de galgas de roseta de deformación.	85

Figura 6.2: Ejemplo de diámetros para la definición de la resistencia a la tracción de fundición gris en secciones delgadas..... 95

RESUMEN

Las empresas relacionadas con el ambiente metalúrgico están empezando a encontrar una considerable competencia en el mercado de las tapas de pozos de drenajes debido a la presencia de productos similares o sustitutos provenientes de empresas internacionales, y ante inminentes TLC no únicamente con los Estados Unidos sino con el mundo entero, esta amenaza se tornará más latente.

Este ambiente competitivo de la industria de hoy, día a día busca nuevas herramientas que faciliten el trabajo, agilicen los procesos y mejoren las prestaciones de los productos, siendo tal vez la más explotada la computación, que para el caso de la ingeniería mecánica, ha desarrollado aplicaciones para teorías como la de elementos finitos que son fácilmente programables y arrojan resultados muy aproximados al comportamiento real del fenómeno.

La Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable Quito, en su constante afán por brindar un mejor servicio a la ciudadanía tiene especial interés en el desarrollo tecnológico y ha mostrado especial interés en comprender el comportamiento que tienen las tapas que adquieren, pues comprende que al conocer de sus deficiencias puede atacarlas, llevando a la mejora de estas, lo que puede traducirse como el desarrollo de un diseño adecuado a sus necesidades y en función de la realidad del mercado.

El presente proyecto busca generar un conocimiento por medio de un estudio serio del comportamiento mecánico de las tapas de pozos de drenaje, que entregue criterios claros que se deben tomar para un diseño realizado en un ambiente computacional, lo que permitirá un ahorro del tiempo de diseño y una reducción considerable de ensayos de laboratorio. También se piensa puede servir de plataforma para la generación de un estándar sobre para tapas de pozo de drenaje hasta la fecha inexistente en el país.

También es la intención de este proyecto, el proponer por medio de una práctica de laboratorio determinar el comportamiento mecánico de una tapa para pozo de drenaje y llegar a la comparación entre los resultados reales y simulados, empleando para ello un software de diseño, determinando así las bondades o limitaciones de los métodos analíticos y establecer recomendaciones para su uso.

En el proyecto se realizó primeramente la caracterización tanto del material como de la geometría de la tapa de pozo de drenaje, simulándolo en el programa COSMOSWORKS SPo 2005 para obtener los puntos críticos de su estructura, para que sobre ellos, instalar rosetas de deformación y tras ensayar en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la ESPE, obtener los resultados de los esfuerzos principales en dichos puntos, datos que serían nuevamente cotejados con los arrojados por una nueva simulación en el mismo programa, obteniéndose así las consideraciones y factores de correlación necesarios para lograr un resultado fiable de la simulación.

Para lograrlo primeramente se requirió del estudio de la Mecánica de Materiales, profundizando en la teoría de las placas, diafragmas y el funcionamiento de las rosetas de deformación, teorías de diseño por elementos finitos, así como el estudio de la Ciencia de los Materiales, especialmente en lo referente a la fundición gris. Posteriormente se realizó un estudio metrológico de la geometría de la tapa, para luego obtener muestras del material de sus diferentes componentes y así determinar tanto la resistencia a la compresión, tracción, dureza y característica metalográfica.

La realidad arrojada por el trabajo realizado indica que el material no presenta problemas en la gran mayoría de su estructura mas, en el cerco central la característica de resistencia a la tracción se ve reducida en un 42% debido a la propiedad de sensibilidad a la sección que esta tiene, la que indica que ante un enfriamiento drástico del material durante la colada se genera una estructura semejante a la martencita al no tener tiempo la fundición de formar ferrita, perlita y grafito laminar, este efecto sería, por poner un ejemplo,

semejante a comparar la resistencia de la piedra caliza con la de una piedra empleada en la construcción como es la andesita .

También se determinó que el programa seleccionado, COSMOSWORKS SPo 2005, es adecuado para el diseño de este tipo de elementos, siempre y cuando se tome en cuenta las características sugeridas respecto al material y tipo de mallado.

Cabe señalar que una de las mayores conclusiones es que el diseño exigido por la Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable Quito a quienes quieran ser proveedores de tapas de pozos de drenaje, no tiene concordancia con el material que exigen para cumplir con el estándar de resistencia del conjunto de 16 [Tm] como mínimo.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Debido al ambiente tan competitivo de la industria a nivel mundial, cada día se buscan nuevas herramientas que faciliten el trabajo, agilicen los procesos y mejoren las prestaciones de los productos, siendo tal vez la más explotada la computación, que para el caso de la ingeniería mecánica, ha desarrollado aplicaciones para teorías como la de elementos finitos que son fácilmente programables y arrojan resultados muy aproximados al comportamiento real del fenómeno. Sin embargo, estos programas no tienen la capacidad de poder generar una respuesta completa al problema planteado, siendo esta la principal misión del ingeniero.

Es la intención de este proyecto, el proponer por medio de una práctica de laboratorio determinar el comportamiento mecánico de una tapa para pozo de drenaje y llegar a la comparación entre los resultados teóricos, empleando un software de diseño, y prácticos, determinando así las bondades o limitaciones de los métodos analíticos y establecer conclusiones y recomendaciones sobre su uso.

Para este fin se requiere del estudio de la Mecánica de Materiales, profundizando en la teoría de las placas, diafragmas y el funcionamiento de las rosetas de deformación, así como el estudio de la Ciencia de los Materiales, especialmente en lo referente a la fundición gris.

1.2 ANTECEDENTES

Los programas computacionales son el resultado de muchos años de estudio y análisis basados en diferentes teorías de diseño y los resultados de ensayos en laboratorios, pero estos aun no logran un nivel de perfeccionamiento suficiente como para que sean absolutamente confiables, factor que debe ser tomado en cuenta al momento de realizar un diseño.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Las empresas relacionadas con el ambiente metalúrgico están empezando a encontrar una considerable competencia en el mercado de las tapas de pozos de drenajes debido a la presencia de productos provenientes de empresas internacionales, más aún con el inminente advenimiento de la firma del TLC con los Estados Unidos.

Este proyecto busca generar una herramienta funcional que, por medio de un estudio serio del comportamiento mecánico de las tapas de pozos de drenaje, entregue un criterio claro de las consideraciones y ajustes que se deben tomar para un diseño realizado en un ambiente computacional, lo que permitirá un ahorro del tiempo de diseño y una reducción considerable de ensayos de laboratorio.

También servirá de plataforma para la generación de un estándar, hasta la fecha inexistente, para estos elementos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL

“Simulación y análisis del comportamiento mecánico de una tapa para pozo de drenaje utilizando rosetas de deformación.”

1.4.2 ESPECÍFICOS

- Recopilar todo el sustento teórico necesario para el desarrollo del proyecto.
- Describir detalladamente la tapa de pozo de drenaje y las características mecánicas del material
- Simular utilizando un software el comportamiento del elemento y realizar una predicción de los posibles puntos de falla.
- Medir los parámetros que intervienen en el comportamiento mecánico mediante la instalación de rosetas de deformación “strain gauges” en lugares críticos de la superficie de la tapa.
- Definir y cuantificar los parámetros determinantes para la obtención de resultados más confiables en el diseño de este elemento al comparar los resultados obtenidos en laboratorio con los arrojados por el programa.
- Realizar un estudio económico-financiero del costo del proyecto.
- Concluir y recomendar.

1.5 ALCANCE

El fin puesto a consideración con este proyecto de grado es el determinar la relación existente entre los resultados expuestos por ensayos realizados en el laboratorio respecto a los obtenidos de la simulación mediante un software de diseño por elementos finitos bajo condiciones idénticas de prueba, para lo cual se deberá adquirir de una tapa de pozo de drenaje de la cual se tomarán muestras del material y otra idéntica a la cual se le instalará, en puntos críticos previamente determinados por una primera simulación, las rosetas de deformación. Para, tras los respectivos ensayos, determinar y cuantificar los parámetros más influyentes y las correcciones necesarias a realizarse en un ambiente computacional para con ello obtener resultados más precisos con el menor número de ensayos en laboratorio.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LA FUNDICIÓN EN HIERRO

2.1.1 HISTORIA

El hombre desde sus inicios ha podido desarrollar una gran cantidad de herramientas para poder satisfacer sus necesidades, siendo uno de sus principales logros el desarrollo de los metales. No se conoce con exactitud la fecha en que se descubrió la técnica de fundir mineral de hierro para producir un metal susceptible de ser modelado, pero los primeros utensilios de hierro descubiertos por los arqueólogos en Egipto datan del año 3000 a.C., y se sabe que antes de esa época se empleaban adornos de hierro. Los griegos ya conocían hacia el 1000 a.C. la técnica, con cierta complejidad, para endurecer armas de hierro mediante tratamiento térmico, y en contexto, el hombre ha desarrollado los metales con la finalidad de obtener nuevas herramientas para poder satisfacer sus necesidades.

El continuo avance en la tecnología de los materiales ha logrado que en la actualidad los ingenieros cuenten con varios métodos para poder conseguir fabricar los elementos que necesite con las características ideales para un proyecto; dentro de estos métodos, los más comunes para el conformado de los metales tenemos:

- Piezas metálicas obtenidas por fundición o colado.
- Metales laminados o perfilados
- Metales forjados
- Elementos metálicos unidos entre sí por medio de ensambles o soldadura

Siendo la fundición el método más utilizado para la fabricación de piezas metálicas, debido en parte a la facilidad con la que se puede obtener elementos de diversas formas y tamaños de elevadas complejidades y pudiendo utilizar, de modo conveniente, algunos metales y aleaciones cuyas características particulares no los hacen aptos para otros procesos de conformado como la laminación, la forja o la soldadura, por ejemplo, el hierro colado.

La fundición es un proceso de producción de piezas metálicas a través del vertido de un metal o una aleación fundida sobre un molde hueco, por lo general hecho de arena. La fundición es un antiguo arte que todavía se emplea, y con el tiempo y el avance de la tecnología, está dando paso a otros métodos como el fundido a presión, la forja, la extrusión, el mecanizado y el laminado, procesos que pueden entregar un material con mejores características tanto mecánicas como físicas.

Es común el confundir entre las diferentes clases de aleaciones de hierro por la nomenclatura empleada, por lo cual llamaremos *hierros dulces* a aquellos que contienen un porcentaje de carbono inferior a 0.022%. Llamaremos *aceros* a aleaciones de hierro y carbono que contengan entre el 0,022% y 2%¹ de carbono, a estas se suele añadir otros elementos para proporcionarle diferentes características químicas y mecánicas. *Fundiciones* son aquellas que contienen más carbono que algunos aceros comerciales, contienen entre un 2% y un 7%² de carbono.

El término fundición de hierro, como el término acero, identifica una larga familia de aleaciones de hierro, siendo su principal característica la concentración de carbón así como un 1% al 3% de silicio³; puede mezclarse con otros elementos metálicos o no metálicos, pueden variarse también los procedimientos de fundido, colado, y tratamientos térmicos, factores que de

¹ Fuente: Diagrama Hierro – Carburo de Hierro,

² Fuente: Ing. Gonzalo Mora, Caracterización de las Fundiciones Grises, 2003, pg 12.

³ Fuente: ASME Metals Manual, novena edición, Volumen 1, pg. 3.

darse de forma controlada, pueden modificar las propiedades del material terminado, ajustando a los requerimientos del diseñador.

En las etapas iniciales de la manufactura del hierro y del acero, la fusión del metal no constituía una parte integral de proceso. El mineral se reducía químicamente empleando carbón vegetal y masa esponjosa. El resultante se forjaba para darle una consistencia compacta. La técnica de la producción de las altas temperaturas no había avanzado lo suficientemente en una época para hacer posible la fusión del hierro en una escala industrial, aun hoy en día, algunos metales como por ejemplo: el tungsteno, que tienen punto de fusión muy elevados, se producen más convenientemente por métodos de metalúrgica de polvo. Sin embargo, en el grueso de la producción metalúrgica, la fusión y vaciado constituyen los pasos primarios de los procesos de manufactura.

Cabe recalcar que la industria nacional se encuentra muy retardada en cuanto a la tecnología de la fundición, puesto que las más de 20 empresas existentes producen únicamente fundición gris, debido a las bajas temperaturas que requiere para su conformado y la inexistencia de hornos capaces de resistir altas temperaturas como por ejemplo un horno de inducción, por lo que para la realización de este proyecto tomaremos como única opción este material y debido a esto, solo haremos un recuento de los diferentes tipos de fundiciones, pero centraremos nuestro estudio en este material.

2.1.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES

Para poder realizar una explicación clara de lo que es una fundición, primero debemos partir por comprender el diagrama Hierro – Carburo de Hierro, el cual nos permite visualizar las diferencias básicas entre las aleaciones de hierro y el control de sus propiedades. El diagrama comúnmente utilizado es el mostrado a continuación:

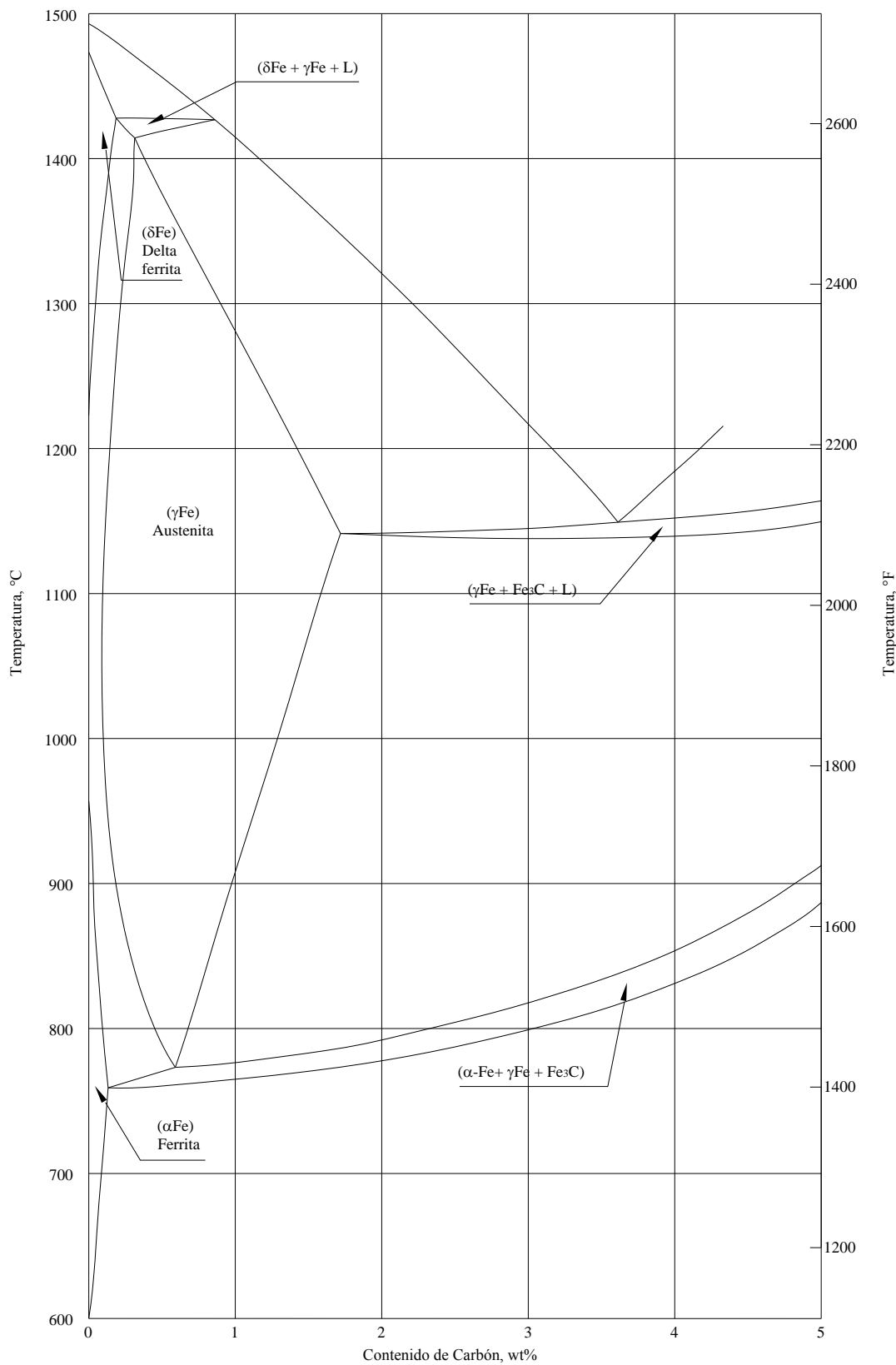


Figura 2.1: Diagrama Hierro – Carburo de Hierro al 2% de silicio. Fuente Metal Handbook, ASTM.

Para empezar con la explicación de este diagrama, es importante dar la definición de una *fase* y de *transformación de fase*, para lo que nos apoyaremos en el ejemplo del agua. Todos sabemos que el H₂O puede existir como gas (vapor), un líquido y un sólido (hielo), siendo estos tres estados tres fases diferentes; una fase por definición general, es un conglomerado homogéneo de materia.

Pero si al agua en su estado sólido la sometemos a diferentes temperaturas y presiones, podemos encontrar diferentes estructuras cristalinas (diferentes celdas unitarias), a las que se les reconoce como Hielo I, II, III, etc, estas son diferentes fases sólidas con la misma composición química.

De manera análoga, encontramos en las aleaciones de hierro diferentes estructuras cristalinas; En una barra de hierro a temperatura ambiente encontraremos una estructura BCC. Sin embargo si la calentamos por encima de 912 °C (1647 °F), encontraremos que la estructura cambia a FCC, y en lugar de llamar a estos Hierro I y hierro II como en el caso del hielo, al hierro BCC se lo conoce como α (alfa) y al hierro FCC γ (gamma), por lo general se emplean letras griegas para nombrar las diferentes fases.

Existen metales que exhiben una única estructura cristalina como el caso del vanadio, níquel, cobre o zinc, sin embargo la mayoría de los elementos tienen varias estructuras cristalinas, y decimos que estos materiales presentan *alotropía* y que tienen diversas formas *alotrópicas*.

Como se puede observar, este diagrama tiene un conjunto de zonas en las que se tienen diferencias en la estructura cristalina del hierro y en la distribución del carburo, en función de la temperatura y la concentración de carbono en la aleación. Y es así que para bajas concentraciones de carbono, hasta un 0.022%, a temperatura ambiental se tiene únicamente ferrita (α Fe), pero si se calienta hasta los 906 °C⁴, su estructura cristalina cambia a γ Fe

⁴ Fuente: TECNOLOGÍA DE LA FUNDICIÓN, Eduardo Capello, pg. 256

hasta los 1401 °C, donde regresa a la estructura inicial, pero bajo el nombre de hierro δ , hasta los 1528 °C donde se da la liquefacción.

Poniéndonos en un plano más orientado hacia la finalidad de este estudio, apuntaremos al campo de las fundiciones, que como ya se mencionó anteriormente van desde el 2% al 7% de carbono y cuyos principales tipos de son:

- Hierro blanco: carburo masivo
- Hierro gris: grafito laminar
- Hierro dúctil: grafito esferoidal
- Hierro maleable: grafito en forma de terrones (carbono de revenido)

La diferencia básica entre estos cuatro tipos de fundiciones es principalmente la concentración de carbono, de silicio y el tipo de tratamiento térmico que es necesario darlos antes de ser utilizados. Estas características especifican a cada tipo de aleación a ser utilizada con ciertos fines específicos.

El *hierro blanco* tiene la característica de que es formado cuando el carbón en la solución en la colada no forma grafito en la solidificación, pero permanece combinado con el hierro, usualmente en la forma de carburos masivos. Los hierros blancos son duros pero frágiles y presentan en las superficies de fractura cristales blancos, de aquí su nombre. También presentan alta resistencia a la compresión a más de mantener sus propiedades a elevadas temperaturas, mas su principal característica es su excelente resistencia a la corrosión y al desgaste.

Cuando en una fundición el enfriamiento de la colada y la presión de operación son las adecuadas durante la solidificación, una importante parte del carbón contenido se separa del líquido para formar hojuelas de grafito, debido a lo que cuando una pieza de este material se rompe, la fractura sigue el camino de las hojuelas de grafito, y la superficie expuesta de la fractura aparece de color gris debido a la presencia predominante del grafito.

El *hierro dúctil* que también es conocido como el hierro nodular tiene una composición muy parecida a la del hierro gris, con la diferencia de que durante la solidificación el carbono tiene a nuclear como partículas esféricas más que hojuelas, esto es debido principalmente a la adición de una muy pequeña pero significativa cantidad de magnesio durante un proceso denominado *nodulización*,

La tabla 2.1 indica las composiciones típicas, resistencias a la tracción, compresión, dureza, elasticidad y aplicaciones típicas de algunas de las variedades de materiales dentro de los cuatro grupos de fundiciones antes mencionados.

En adelante nos concentraremos únicamente en el estudio de la fundición gris, que como ya hemos mencionado, es una de las limitantes que nos impone el sector industrial ecuatoriano para el desarrollo de nuestro proyecto.

La *fundición gris* es probablemente la más antigua de la que se tenga conocimiento, ha sido producida desde el siglo seis antes de Cristo. Es una aleación de hierro con contenido variable de carbono (2-4.5%), silicio (0.5-3.5%), manganeso (0.5-1.5%), fósforo (0.1-1.0%), y azufre (hasta 0.15%), los cuales determinan las diferencias en las propiedades de la fundición. Los elementos de aleación modifican la microestructura de las fundiciones y con ello sus propiedades mecánicas y físicas. La presencia de estos elementos de aleación modifican también la situación de los puntos críticos y además ejercen una acción muy importante y compleja de la grafitización, o la templabilidad.

Durante los últimos 30 años las propiedades mecánicas de las piezas de fundición se han elevado en más de 3 veces si en 1920 el límite de resistencia a la rotura era de 20 Kg/mm², en el tiempo presente este límite alcanza de 60-70 Kg/mm². En la tabla 2.2 se presenta la clasificación de las fundiciones dependiendo de su resistencia.

Clase	Resistencia a la tracción-psi	Dureza Brinell	Estructura
20	24000	130-180	F,P
30	34000	170-210	F,P,G
40	44000	210-260	P,G
50	54000	240-280	P,G
60	64000	260-300	B,G

Tab. 2.1: Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A48-41. F: ferrita; P: perlita; G: grafito; B: bainita

Esta clasificación proviene de la especificación ASTM A48, la cual clasifica los varios tipos en términos de la resistencia a la tensión, expresada en KSi. Cabe recalcar que esta clasificación no representa una inferioridad de las fundiciones de menor clase respecto a los de clase 60 o 50, pues en ciertas ocasiones la resistencia a la tracción no es el principal criterio para la elección de una clase adecuada para un servicio determinado.

Refiriéndonos a los efectos del enfriamiento en la fundición gris, la tasa de enfriamiento durante la solidificación es uno de los más importantes factores que determinan el tamaño y forma de las hojuelas de grafito; si se somete a la pieza a un enfriamiento lento y controlado, puede lograrse las mismas características entre la superficie y el interior, pero si se realiza un enfriamiento brusco, las propiedades mecánicas pueden variar en la misma pieza entre la superficie y su núcleo a razón de 10,000 lb/in².

Las tasas de transferencia de calor desde la pieza hacia el exterior, propias de los moldes son determinante para la formación de uno u otro material, donde los moldes de arena, de baja conductividad térmica, favorecen a la formación del grafito y por consecuencia la obtención de una fundición gris, pero si se usa para colar un molde metálico se obtendrá una fundición blanca, debido a la elevada conductividad de los metales.

Nombre y Número	Análisis Químico, porcentaje	Condición	Resistencia a la tracción lb/plg ² x 10 ³	Resistencia a la fluencia lb/plg ² x 10 ³	Porcentaje de elongación	BHN	Uso Típico
HIERRO BLANCO							
Hierro Fundido blanco sin alear	3,5 C, 0,5 Si	Fundición	40	40	0	500	Piezas resistentes al desgaste
HIERRO GRIS							
Ferrítico, clase 25	3,5 C, 2,5 Si	Fundición	25	20	0,4	150	Tubos, artefactos sanitarios
Perlítico clase 40	3,2 C, 2 Si	Fundición	40	35	0,4	220	Herramientas para máquinas, bloques
Martensítico templado	3,2 C, 2 Si	Templado	80	80	0	500	Superficies de desgaste
Bainítico templado	3,2 C, 2 Si	Templado	70	70	0	300	Ejes de levas
HIERRO DÚCTIL							
Ferrítico (60 - 40 - 18)	3,5 C, 2,5 Si	Recocido	60	40	18	170	Tubería de servicio pesado
Perlítico (80 - 55 - 06)	3,5 C, 2,2 Si	Fundición	80	55	6	190	Cigüeñales
Templado (120 - 90 - 02)	3,5 C, 2,2 Si	Temple y recocido	120	90	2	270	Piezas de máquinas de alta resistencia
HIERRO MALEABLE							
Ferrítico (35018)	2,2 C, 1 Si	Recocido	53	35	18	130	Ferretería, accesorios
Perlítico (45010)	2,2 C, 1 Si	Recocido	65	45	10	180	Cuerpos de bombas
Templado (80002)	2,2 C, 1 Si	Temple y recocido	100	30	2	250	Yudos de alta resistencia

Tabla. 2.2: Propiedades mínimas de los hierros blanco, gris, dúctil y maleable. MATERIALES DE INGENIERÍA Y SUS MATERIALES, Flinn Trojan, tercera edición, pg 268



Figura 2.2: Las hojuelas de grafito eutéctico aparecen en esta fotomicrografía de color negro, y es común de que la fractura de la fundición gris se dé a través de las líneas que forman estas.

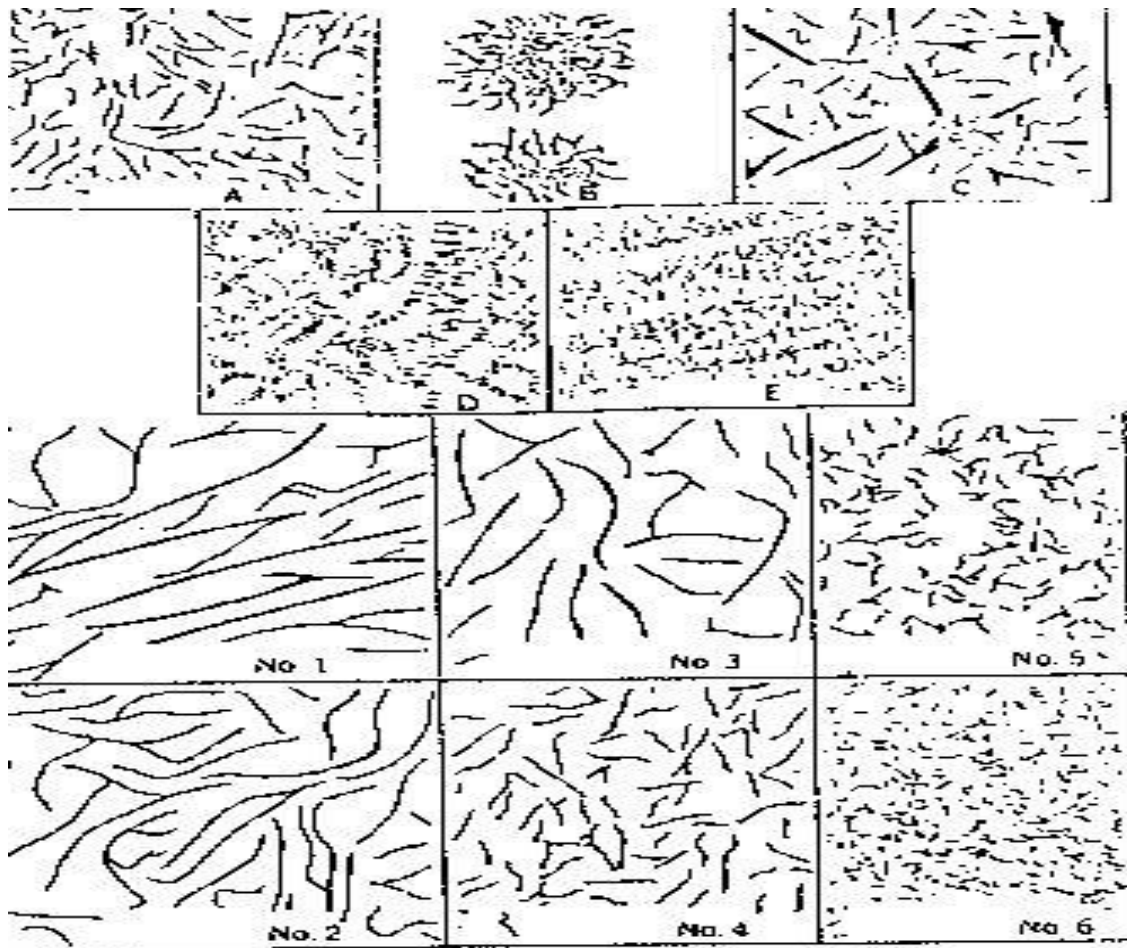


Figura 2.3: Clasificación de las láminas de grafito según la forma, tamaño y distribución

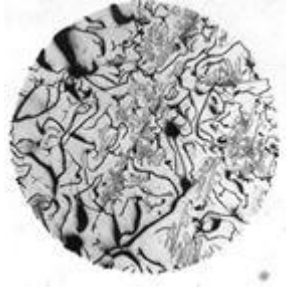


Figura 2.4: Microestructura del hierro gris (ferrita y perlita)

El hierro gris tiene alta maquinabilidad, capacidad de templado y buena fluidez para el colado, pero es quebradizo y de baja resistencia a la tracción.

Ciertamente las características físicas pueden variar mucho dependiendo los elementos de aleación, pero debemos recalcar el hecho de que la materia prima fundamental es la chatarra, ya que de esta se obtiene el material base, el hierro; si se utiliza material de baja calidad como la proveniente de maquinaria textil en la fundición, se tendrá poca resistencia, llegándose máximo a clase 30 por a la cantidad de incrustaciones e impurezas existentes, más si se utiliza bloques de motores diesel, que es un material mucha más pureza a más de contar con ciertos aleantes como el magnesio, se puede llegar con facilidad a la clase 40 e inclusive 60.

Una propiedad importante que debe ser mencionada es la sensibilidad a la sección, que es la variación de las propiedades del material dependiendo del espesor de la muestra, siendo los efectos típicos un incremento de la dureza y un paulatino decremento de la resistencia a la tensión mientras que se adelgaza la muestra en ciertos rangos.

Los efectos típicos en la dureza que se suscitan en una barra acuñada a un ángulo aproximado de 10° , fundida en un molde de arena, se presentan en el siguiente gráfico:

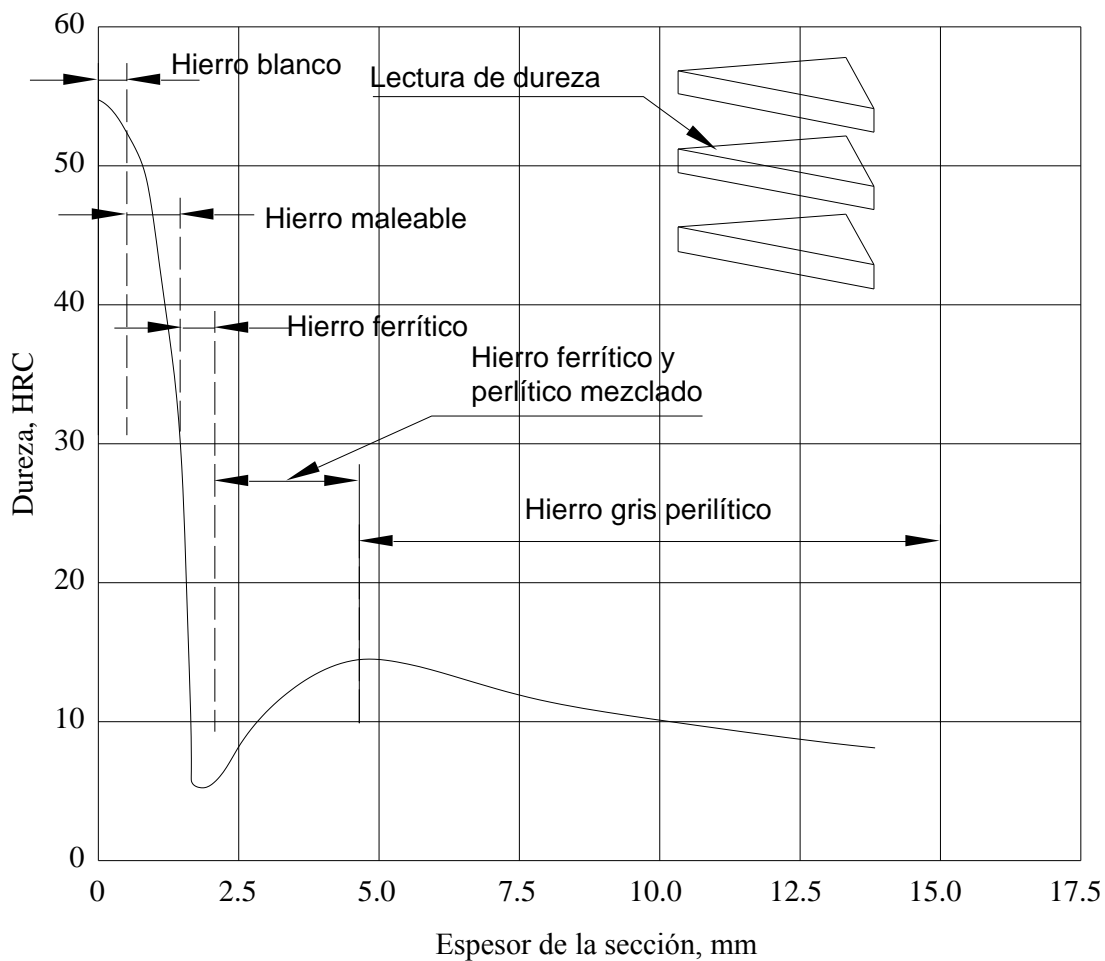


Figura 2.5: Efecto del espesor de la sección en la dureza. Fuente: METALS HANDBOOK, Vol 1, Novena edición, pg. 14.

Como podemos observar, a la izquierda de la curva existe un incremento considerable de la dureza, esto se debe a que en la punta de la cuña, debido al rápido enfriamiento de la pieza, es hierro blanco con durezas de hasta 50 HRC. Moviéndonos hacia la derecha encontramos una fuerte caída en la curva, lo que es debido a la presencia de una mezcla entre el hierro blanco y el gris, hasta que llegamos a un mínimo en la curva, esto es debido a una zona en la que se presenta un grafito del tipo D, que usualmente se encuentra asociado a una gran presencia de ferrita. Con un ligero aumento en el tiempo de enfriamiento, se produce una estructura del grafito del tipo A; esta estructura es la más deseable para el diseño resistente a la corrosión.

Con respecto a la resistencia a la tracción, esta incrementa de la siguiente manera:

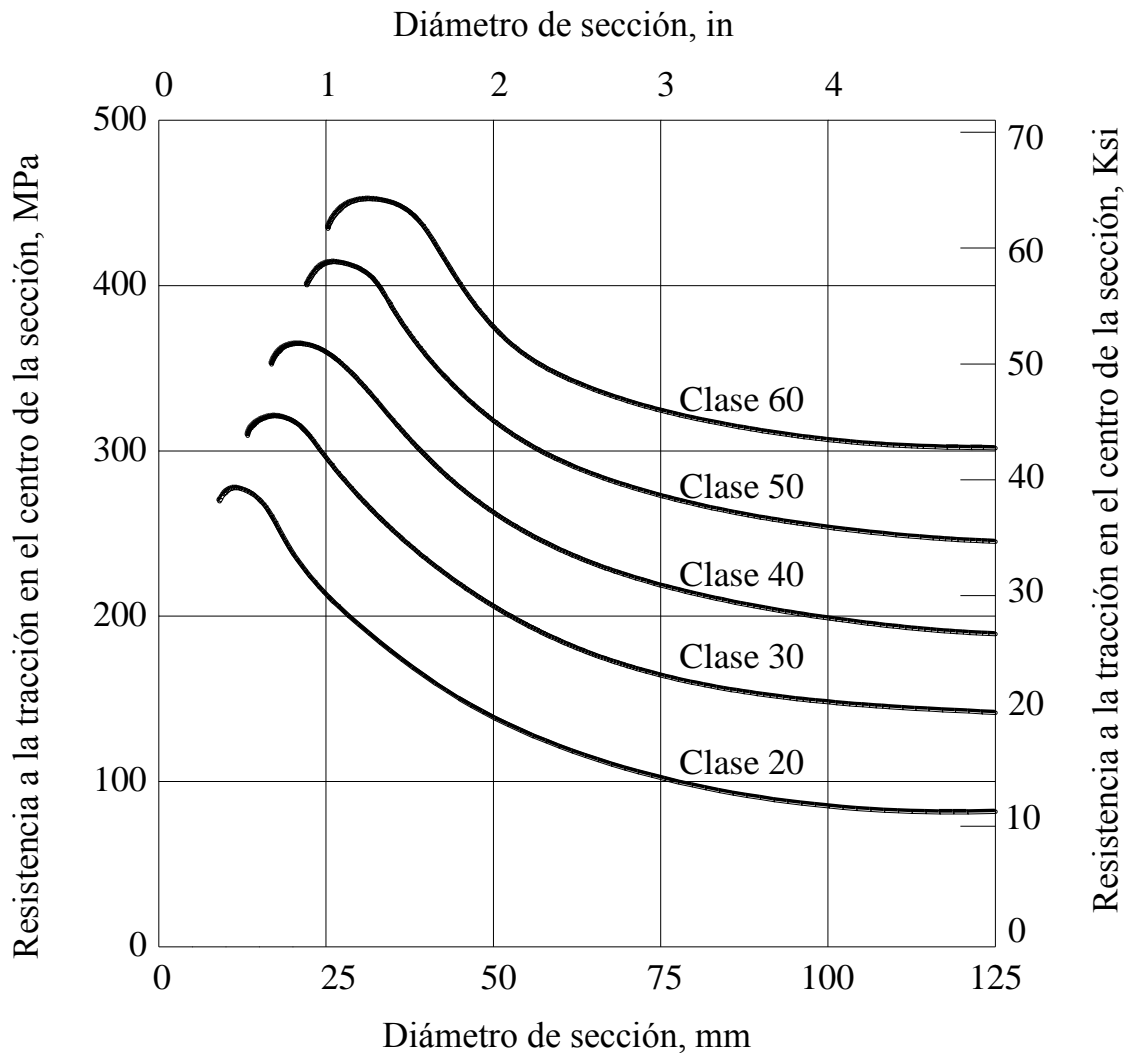


Figura 2.6a: Efecto en la resistencia a la tracción en el centro de un espécimen de fundición para cinco clases de fundición gris. Fuente: METALS HANDBOOK, Vol 1, Novena edición, pg. 14.

Podemos apreciar que la resistencia a la tracción incrementa tanto con la disminución de la sección de la barra como con el incremento de la clase del material, mas está claro que también el material se vuelve menos estable cuando la sección es demasiado pequeña, por lo que es de mucha importancia el poder tomar en cuenta el que si se desea fundir piezas delgadas es preferible emplear una fundición de clase baja, pero si se requiere de alta resistencia y grandes dimensiones, se debe preferir una clase elevada.

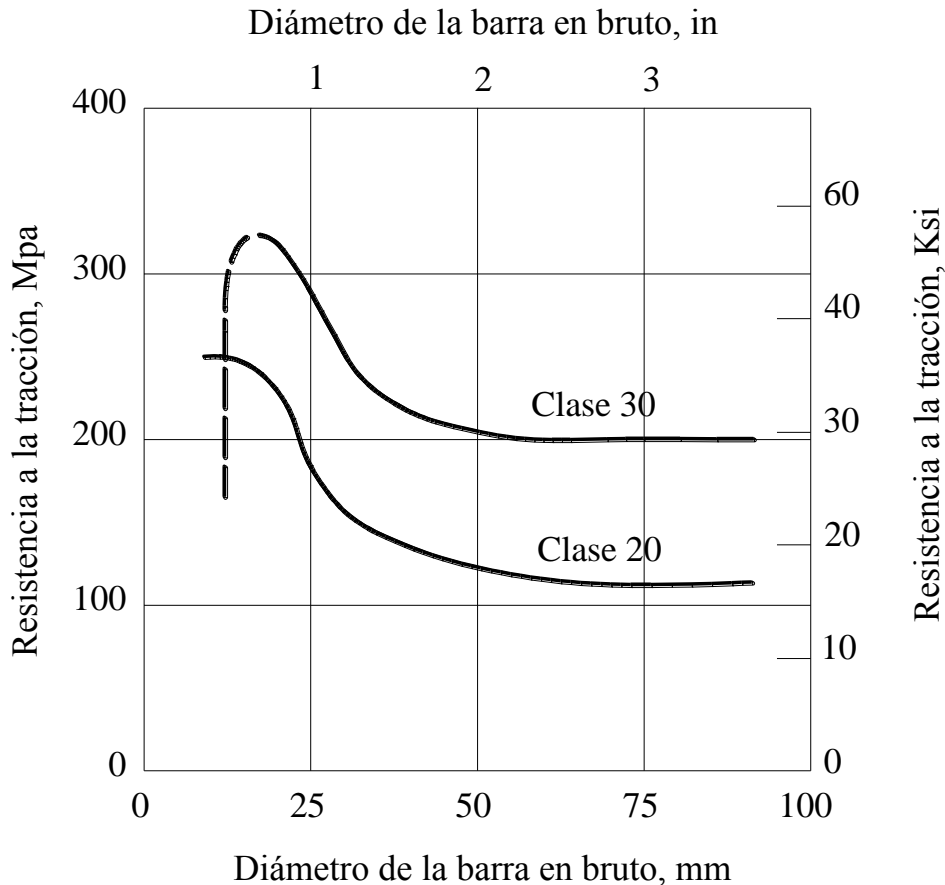


Figura 2.6b: Efecto en la resistencia a la tracción de un espécimen de fundición para dos clases de fundición gris. Fuente: METALS HANDBOOK, Vol 1, Novena edición, pg. 14.

Podemos comparar la clase 20 con la clase 30, debido a que en estas dos presentan comportamientos diferentes a medida de que decrece la sección, inclusive por debajo de los 6 mm de diámetro, cosa que no ocurre con la clase 30, en la que se denota una drástica caída de la resistencia debido a la formación de hojuelas del tipo D, referir figura 2.6b .

Otro hecho particular de la fundición gris que resulta interesante es el que para un diseño a fatiga, es prácticamente innecesario el incrementar drásticamente los factores de seguridad, debido a que la fundición gris, al estar compuesta por miles de hojuelas de grafito, se puede considerar que de por sí tiene miles de concentradores de esfuerzos, por lo que un concentrador de esfuerzos adicional prácticamente no influye, en contraste con, por ejemplo, en

un acero cuya microestructura es mucho más homogénea, por esta razón es que los diseñadores suelen emplear factores de diseño muy semejantes a 1.

2.1.3 FUNDICIÓN DEL HIERRO

La fundición implica tres procesos diferentes: en primer lugar se construye un modelo de madera, plástico o metal con la forma del objeto terminado; más tarde se realiza un molde hueco rodeando el modelo con arena y retirándolo después, y a continuación se vierte metal fundido en el molde (este último proceso se conoce como colada).

El modelo suele manufacturarse en madera barnizada en los casos en que el número de piezas a fundirse sea limitado, pero cuando el número es elevado, puede ser de plástico, hierro colado, acero, aluminio u otro metal con el fin de mejorar las características de la pieza terminada, y la durabilidad del modelo. Al ser confeccionado, deben tomarse en cuenta dos diferencias importantes con respecto al original: sus dimensiones son algo mayores para compensar la contracción de la pieza fundida al enfriarse, y los modelos de objetos huecos tienen proyecciones que corresponden a los núcleos. Pueden hacerse de una sola pieza, cuando su forma es complicada resulta más fácil sacar el objeto fundido del molde si tiene dos o más partes. Con el fin de facilitar el desmolde, los modelos de objetos con lados rectos se suelen fabricar con un ligero rebaje en su espesor. Las distintas partes de un modelo tienen salientes y entrantes coincidentes para alinearlas de forma correcta al montarlas.

El molde es un contenedor en el cual se da la forma en negativo del modelo, quedando un volumen vacío en el cual se verterá posteriormente el material fundido. Comúnmente se utiliza para la elaboración del molde *arena* que contenga suficiente arcilla para mantener la cohesión si se humedece antes de usarla. Se utiliza arena para los moldes porque permite que escape una cierta cantidad de vapor y gas cuando se vierte el metal. La arena de separación (*bentonita*) sirve tan sólo para que las cajas se desprendan sin dificultad; esta es una arena seca con un contenido de arcilla bajo o nulo. Para

los metales con puntos de fusión bajos, como el latón, cobre, estaño, plomo, es posible emplear materiales de moldeado sólidos, como escayola o yeso. Estos moldes, igual que los metálicos, tienen superficies más lisas que los moldes de arena, por lo que las piezas fundidas tienen un acabado más fino y detallado.

La fundición además de una industria es también un arte: el moldeador, sin más ayuda que la de un modelo y algunas herramientas rudimentarias, puede producir piezas muy complejas realizando un trabajo que puede llamarse de escultor.

Cuando se tiene el molde listo, se procede a fundir el material en un horno, que es un recinto cerrado donde se produce calor por la combustión de un material, por la resistencia de un conductor, o por otras fuentes de calor, que en el caso de la fundición, es utilizado para someter a un cambio de estado sólido líquido a un metal.

Una vez fundido el metal se transporta desde el horno, dependiendo del volumen, desde un crisol, cucharón o cubo de gran tamaño, hasta el molde, donde se lo vierte hasta que este quede totalmente lleno. Cuando la pieza se haya enfriado, se la saca del molde para proceder con los acabados

Para terminar la pieza, por lo general es necesario el dar acabados como retirar los salientes de metal formados en las bocas y respiraderos, limar asperezas o rebabas formadas por una mala junta entre las cajas de los moldes, pero en general, a la pieza fundida se la debe someter a una serie de ordenadas de operaciones sucesivas que constituyen el llamado *diagrama de acabados*.

Para la fundición del hierro gris es necesario un conjunto de elementos, muchos de los cuales no se encuentran disponibles en el mercado interno, por lo que se debe importar desde Colombia (bentonita), o de Perú (carbón coque), pero el material principal (chatarra) se encuentra en grandes cantidades a diferencia de otros países en el mundo como España en donde es común el robo de piezas fundidas que se puedan encontrar en las calles como las tapas

de pozos de desagüe, desagües o rejillas para ser nuevamente fundidas para la fabricación de otros elementos.

El primer paso para la elaboración del hierro fundido es la obtención de la chatarra, a la cual se la debe retacear en el caso de que sea de gran tamaño y no quepa por la boca de carga del cubilote, para posteriormente introducirla en el horno junto con el carbón. A la par se elabora los moldes de arena.

El cubilote se enciende con diesel que es inyectado al interior del horno hasta que el carbón se encienda y se eleva la temperatura del horno hasta los 1200 °C alcanzado la temperatura o punto de fusión de este material, es necesario aplicar más calor para poder transformar el metal o la aleación de sólido a líquido. Durante este periodo la temperatura no aumenta y la cantidad de calor generada está destinada solamente a disgregar el estado sólido, este calor es conocido como *calor latente de fusión*, el cual está bien definido y caracterizado para cada metal o aleación. Para cuando toda la masa ha pasado a estado líquido, se continúa generando calor para sobrecalentar la fundición hasta los 1300 °C, para evitar que por la caída de la temperatura del material fundido durante el transporte este se pueda solidificar antes de que sea vertido dentro de los moldes de arena. Debe tenerse la precaución de no sobrepasar esta temperatura puesto que si la temperatura sigue aumentando, el metal puede acercarse a su punto de ebullición, volviendo inestable al líquido provocándose así explosiones y probables accidentes.

Metal o aleación	Temperatura de fusión °C	Calor específico del sólido	Calor específico del líquido	Calor latente de fusión
Estaño	232	0.056	0.061	14
Plomo	327	0.031	0.04	6
Zinc	420	0.094	0.121	28
Magnesio	650	0.25	-----	72
Aluminio	657	0.23	0.39	85
Latón	900	0.092	-----	-----

Bronce	900 a 960	0.09	-----	----
Cobre	1083	0.094	0.156	43
Fundición gris	1200	0.16	0.20	70
Fundición blanca	1100	0.16	----	----
Acero	1400	0.12	----	50
Níquel	1455	0.11	----	58

Tabla. 2.3: Propiedades físicas de metales típicos de fundición.

Dependiendo el volumen de producción, de la calidad que se requiera en la superficie de la pieza terminada y del tamaño de esta, se disponen de diversos métodos para la fundición:

Fundición de moldes permanentes (en coquilla), el molde está hecho de metal o grafito. La tasa de enfriamiento es más rápida que en el moldeo en arena

Fundición por inyección, también emplea moldes permanentes, pero en éstos el metal se inyecta bajo presión. Esto es particularmente útil para magnesio, los cuales no atacan rápidamente el metal de la matriz.

Fundición o colada centrífuga: método útil para fundir objetos de pequeñas dimensiones y que requieran mucho detalle y precisión; consiste en hacer girar rápidamente un molde circular con la boca de acceso en el medio para que el metal durante el fundido por acción de la fuerza centrífuga se dirija hacia la cavidad del molde, disminuyéndose así las imperfecciones por burbujas de aire o por un llenado inadecuado. No hace falta núcleo, porque la rotación del molde mantiene el metal apretado contra él debido a la fuerza centrífuga. Esta técnica es útil para fabricar tubos metálicos.

El moldeo de precisión (cera perdida), es un método para producir pequeñas piezas fundidas de precisión. Se hace una réplica en cera de la

parte que se desea réplica, en un molde. Después de que se ha secado el cemento, se calienta el molde para eliminar la cera y precalentar el molde. Luego se vierte el metal líquido en la cavidad.

Fundición inversa: es una adaptación del proceso de cera perdida para la fabricación de piezas fundidas ornamentales, el modelo se construye en cera, a menudo con una máquina de fundido a presión, y se recubre con una pasta de material refractario que se deja secar. Esta capa refractaria, con el modelo de cera dentro, se recubre de arena y después se cuece todo el molde. La cera se derrite y se vierte fuera del molde, con lo que éste queda listo para recibir el metal. Las piezas fabricadas con este proceso tienen una gran precisión y reproducen bien detalles finos.

Fundición continua: se vierte acero fundido a un ritmo constante sobre la parte superior de un molde de sección transversal uniforme refrigerado por agua, y se extrae acero sólido de la parte inferior del molde de forma continua.

2.1.3.1 Hornos

La mayoría de los metales son procesados fundiendo primeramente el metal en una horma cuya función es servir como un depósito de metal fundido. Los elementos para formar aleaciones pueden ser añadidos al metal fundido con el fin de producir diferentes tipos de aleaciones.

Los hornos que se usan para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en capacidad y diseño. Varían desde los pequeños hornos de crisol que contienen unos cuantos kilogramos de metal a hornos de hogar abierto hasta 200 toneladas de capacidad. El tipo de horno usado para un proceso de fundición queda determinada por los siguientes factores:

- Necesidades de fundir la aleación tan rápidamente como sea posible y elevarla a la temperatura de vaciado requerida.
- La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga, como precisión de su composición.
- La producción requerida del horno.

- El costo de operación del horno.

Los hornos para fusión de metales pueden clasificarse convenientemente en cuatro grupos principales, según el grado de contacto que tenga lugar entre la carga y combustible o sus productos de combustibles.

Hornos en los cuales la carga se encuentra en contacto íntimo con el combustible y los productos de combustión. El horno más importante en este grupo es el de *cubilote*.

Hornos en los que la carga esta aislada del combustible pero en contacto con los productos de la combustión. Este tipo de hornos es el *horno hogar abierto* para la fabricación de acero.

Hornos de combustión indirecta, en que la carga se encuentra aislada tanto del combustible como de los productos de la combustión. El principal es el horno que se emplea un crisol que puede calentarse ya sea por coque, gas o petróleo.

Hornos eléctricos. Pueden ser de tipo de acero o de inducción.

2.1.3.1.1 Tipos de Hornos usados en la Fusión:

- El cubilote de fundición.
- Los hornos de reversos.
- Hornos rotatorios.
- Hornos de crisol.
- Hornos de crisol de tipo sosa.
- Hornos basculantes.
- Hornos de aire.
- Hornos eléctricos. Pueden ser de acero o de inducción.

Convertidores: no es fundamentalmente un horno de fusión, aun cuando se use en la producción de acero para manufactura de vaciado.

2.2 CÍRCULO DE MOHR

Desde el punto de vista del material, las características propias determinan si es más resistente a las cargas normales o a las cargas cortantes, de aquí nace la importancia de transformar un estado de tensiones general en otro particular que puede ser más desfavorable para un material que las cargas visibles.

2.2.1 TRANSFORMACIÓN DEL ESFUERZO PLANO

Se considera un elemento plano que se ve sometido a las tensiones normales σ_x y σ_y , así como a la tensión cortante τ_{xy} como se muestra en la siguiente figura.

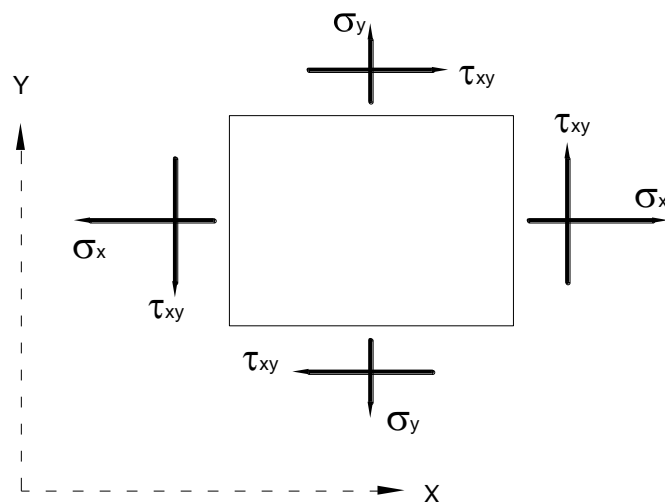


Figura 2.7: Elemento diferencial sometido a cargas normales y cortantes

Un cambio de ejes coordenados rotando el sistema original en un ángulo α .

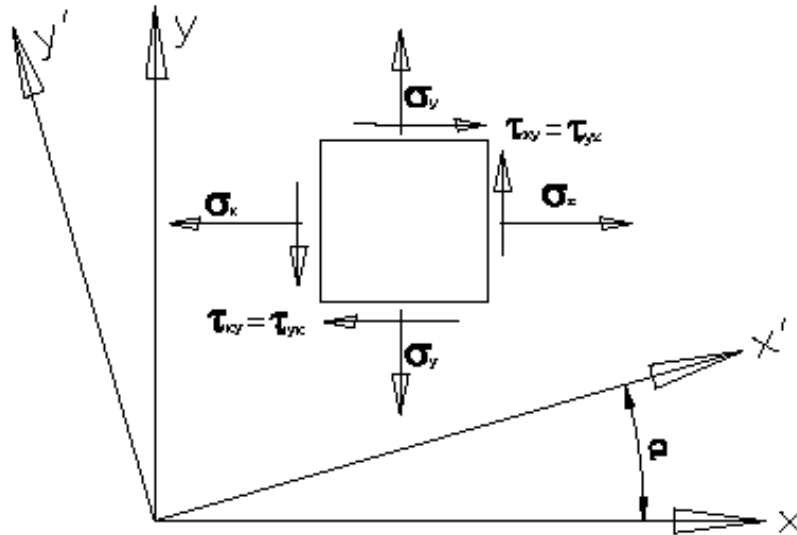


Figura 2.8: Rotación del eje coordenado de elemento diferencial.

El estado de esfuerzos cambia a otro equivalente $\sigma_{x'}$ $\sigma_{y'}$ $\tau_{x'y'}$ que deben calcularse en base a los esfuerzos originales. Tomando un trozo de elemento plano se tiene que:

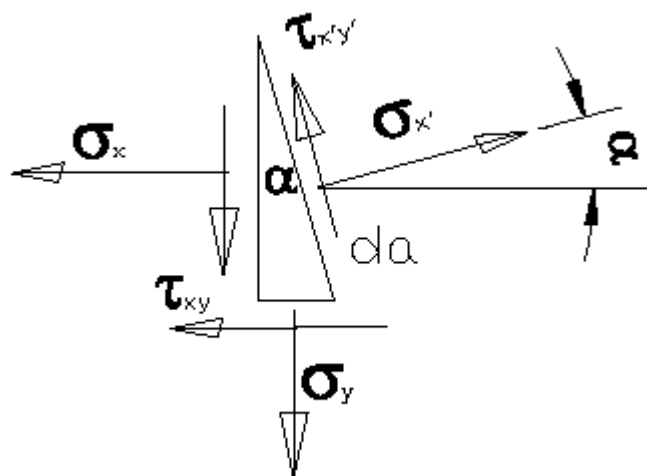


Figura 2.9: Estado de tensiones en un plano inclinado del elemento diferencial.

Para poder hacer suma de fuerzas y equilibrar este elemento, es necesario multiplicar cada esfuerzo por el área en la que se aplican para obtener las fuerzas involucradas. Considerando que los esfuerzos incógnitos se aplican en un área ' da '. Se tiene que este trozo de cuña tiene un área basal ' $da \cos \alpha$ ' y un área lateral ' $da \sin \alpha$ '

Suma de fuerzas en la dirección x':

$$\sigma_{x'} \cdot \partial a = \sigma_x \cdot \partial a \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\alpha) + \sigma_y \cdot \partial a \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\alpha) + \tau_{xy} \cdot \partial a \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sen}(\alpha) + \tau_{xy} \cdot \partial a \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sen}(\alpha)$$

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cdot \text{sen}(2\alpha) + \sigma_y \cdot \cos(2\alpha) + 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sen}(\alpha)$$

$$\sigma_{x'} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cdot \cos(2\alpha) + \tau_{xy} \cdot \text{sen}(2\alpha) \quad \text{ec: 2.1}$$

Suma de fuerzas en la dirección y':

$$\tau_{x'y'} = \sigma_y \cdot \partial a \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sen}(\alpha) - \tau_{xy} \cdot \partial a \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\alpha) + \tau_{xy} \cdot \partial a \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\alpha) - \sigma_x \cdot \partial a \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sen}(\alpha)$$

$$\tau_{x'y'} = \sigma_y \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sen}(\alpha) - \tau_{xy} \cdot \text{sen}(2\alpha) + \tau_{xy} \cdot \cos(2\alpha) - \sigma_x \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sen}(\alpha)$$

$$\tau_{x'y'} = \tau_{xy} \cdot \cos(2\alpha) - \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cdot \text{sen}(2\alpha) \quad \text{ec: 2.2}$$

Con estas expresiones es posible calcular cualquier estado de esfuerzo equivalente a partir de un estado inicial

2.2.2 ESFUERZOS PRINCIPALES

Siempre es importante obtener los valores máximos de los esfuerzos tanto los normales como los de corte para compararlos con los valores admisibles del material que se está evaluando.

El esfuerzo normal máximo se deduce derivando $\sigma_{x'}$ con respecto al ángulo α :

$$\frac{d\sigma_{x'}}{d\alpha} = 0 = 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \cos(2\alpha) - (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \text{sen}(2\alpha)$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad \text{ec: 2.3}$$

La solución de esta ecuación son dos ángulos que valen: α y $\alpha + 90$

Al evaluar usando estos valores para el ángulo α se obtienen los esfuerzos normales máximo (σ_1) y mínimo (σ_2). Es importante destacar que si se iguala $\tau_{x'y'} = 0$ se obtiene la misma expresión que la derivada, esto implica que cuando el elemento se rota para encontrar los esfuerzos principales (σ_1 y σ_2) se produce que el esfuerzo cortante vale cero.

En definitiva:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{ec: 2.4}$$

El esfuerzo cortante máximo se obtiene de forma similar, derivando la expresión correspondiente con respecto al ángulo α .

$$\frac{d\tau_{x'y'}}{d\alpha} = 0 = (\sigma_y - \sigma_x) \cdot \cos(2\alpha) - 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \text{sen}(2\alpha)$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2 \cdot \tau_{xy}}$$

Esta expresión nos entrega el ángulo para el cual se producen los esfuerzos cortantes máximos, queda en definitiva:

$$\tau_1 \text{ y } \tau_2 = \pm \sqrt{\left(\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{ec: 2.5}$$

2.2.3 ESFUERZOS CORTANTES MÁXIMOS

El esfuerzo cortante máximo difiere del esfuerzo cortante mínimo solo en signo, como muestran las formulas explicadas el tema Esfuerzos Principales.

Además, puesto que las dos raíces de la ecuación $\tan(2\alpha) = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2 \cdot \tau_{xy}}$ sitúan el

plano a 90° , este resultado significa también que son iguales los valores numéricos de los esfuerzos cortantes en planos mutuamente perpendiculares.

En esta deducción, la diferencia de signo de los dos esfuerzos cortantes surge de la convención para localizar los planos en que actúan estos esfuerzos. Desde el punto de vista físico dichos signos carecen de significado, por esta razón al mayor esfuerzo cortante, independientemente de su signo, se llama esfuerzo cortante máximo.

El sentido definido del esfuerzo cortante siempre se puede determinar por la sustitución directa de la raíz particular de α en la ecuación

$$\tau_{x'y'} = \tau_{xy} \cdot \cos(2\alpha) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin(2\alpha) \quad \text{ec: 2.6}$$

Un esfuerzo cortante positivo indica que este actúa en el sentido supuesto y viceversa. La determinación del esfuerzo cortante máximo es de mayor importancia para materiales de baja resistencia al corte.

A diferencia de los esfuerzos principales cuyos planos no ocurren esfuerzos cortantes, los esfuerzos cortantes máximos actúan en planos que usualmente no están libres de esfuerzos normales. La situación de α de la ecuación

$$\tan(2\alpha) = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2 \cdot \tau_{xy}}$$

en la

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos(2\alpha) + \tau_{xy} \cdot \sin(2\alpha) \quad \text{ec: 2.7}$$

Muestra que los esfuerzos normales que actúan en los planos de los esfuerzos cortantes máximos son

$$\sigma_c = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad \text{ec: 2.8}$$

por consiguiente, el esfuerzo normal actúa simultáneamente con el esfuerzo cortante máximo a menos que se anule $\sigma_x + \sigma_y$.

Si σ_x y σ_y de la ec: 2.5 son esfuerzos principales, τ_{xy} es cero y la ecuación se simplifica en

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \quad \text{ec: 2.9}$$

□ □ □ □ □ □ □ □

2.2.4 CIRCULO DE MOHR PARA ESFUERZO BIAxIAL

Las ecuaciones desarrolladas en los puntos anteriores pueden describirse para formar una ecuación de circunferencia:

Se tiene que:

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos(2\alpha) + \tau_{xy} \cdot \text{sen}(2\alpha) \quad \text{ec: 2.10}$$

$$\tau_{x'y'} = \tau_{xy} \cdot \cos(2\alpha) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \text{sen}(2\alpha) \quad \text{ec: 2.11}$$

La ec: 2.10 se acomoda de la siguiente forma:

$$\sigma_{x'} - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos(2\alpha) + \tau_{xy} \cdot \text{sen}(2\alpha)$$

Elevando al cuadrado se tiene:

$$\left(\sigma_{x'} - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)^2 = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4 \cdot (\cos(2\alpha))^2} + (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos(2\alpha) \cdot \tau_{xy} \cdot \text{sen}(2\alpha) + \tau_{xy}^2 \cdot (\text{sen}(2\alpha))^2$$

Elevando al cuadrado la ec: 2.11 se tiene:

$$\tau_{x'y'}^2 = \tau_{xy}^2 \cdot (\cos(2\alpha))^2 - \tau_{xy} \cdot \cos(2\alpha) \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \text{sen}(2\alpha) + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} \cdot (\text{sen}(2\alpha))^2$$

Sumando ambas expresiones:

$$\left(\sigma_{x'} - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{x'y'}^2 = \tau_{xy}^2 + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4}$$

Los esfuerzos originales son datos, y por lo tanto constantes del problema, se tiene entonces:

$$\tau_{xy}^2 + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} = b^2 \quad \text{ec: 2.12}$$

$$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = a \quad \text{ec: 2.13}$$

Rescribiendo queda:

$$(\sigma_{x'} - a)^2 + \tau_{x'y'}^2 = b^2$$

Si los ejes son:

$$x = \sigma_{x'}$$

$$y = \tau_{x'y'}$$

Tenemos:

$$(x - a)^2 + y^2 = b^2 \quad \text{ec: 2.14}$$

Que representa a una circunferencia con centro en $x = a$; $y = 0$ con un radio $r = b$. Esta circunferencia se denomina Círculo de Mohr (Otto Mohr 1895) que en definitiva tiene las siguientes características:

$$\text{Centro en: } x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}; \quad y = 0$$

$$\text{Radio de: } r^2 = \tau_{xy}^2 + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4}$$

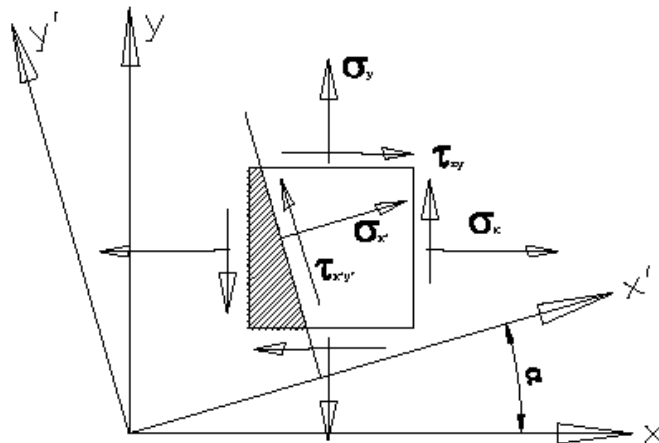


Figura 2.10: Estado de carga de un elemento diferencial con ejes rotados.

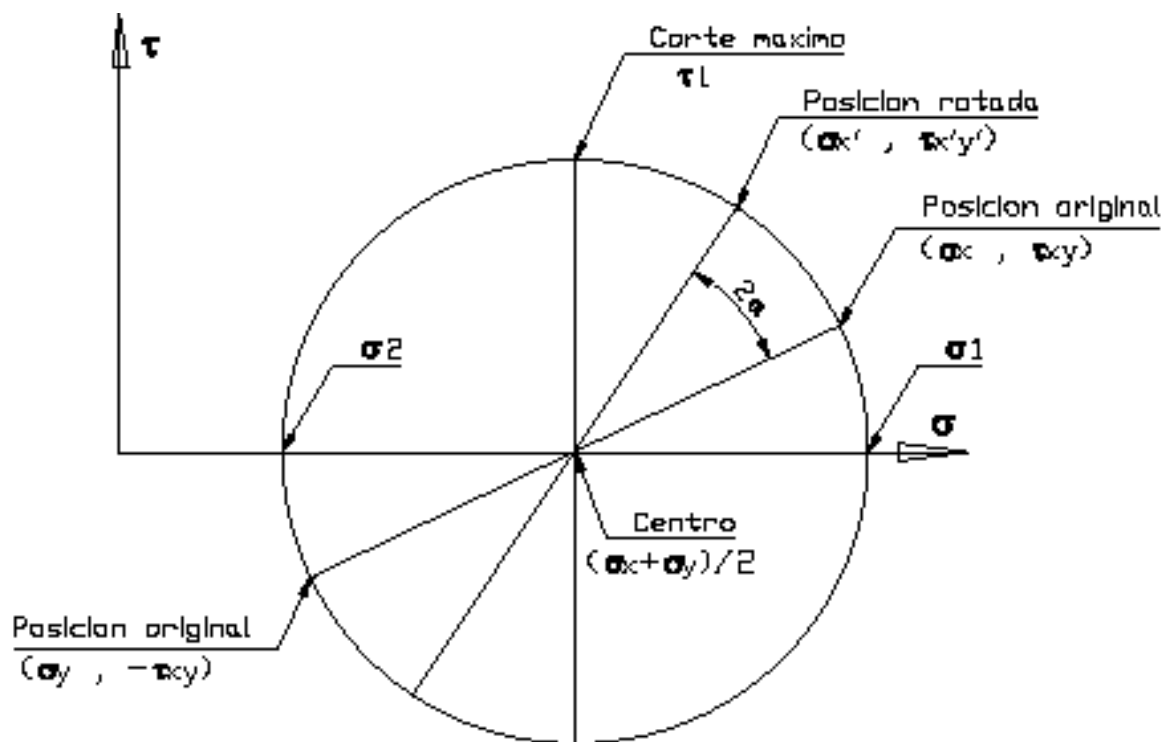


Figura 2.11: Círculo de Mohr de estado biaxial.

2.2.5 TRANSFORMACION DE DEFORMACION PLANA

En este tema se ha de analizar las transformaciones de la deformación cuando los ejes coordenados giran. Este análisis se limitará a estados de deformación plana, es decir, a situaciones en donde las deformaciones del material tienen lugar dentro de planos paralelos y son las mismas en cada uno de estos planos. Si se escoge el eje z (ver figura: 2.12) perpendicular a los planos en los cuales la deformación tiene lugar, tenemos $\varepsilon_z = \gamma_{zx} = \gamma_{zy} = 0$, las únicas componentes de deformación que restan son $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ y γ_{xy} . Tal situación ocurre en una placa sometida a cargas uniformemente distribuidas a lo largo de sus bordes y que este impedida para expandirse o contraerse lateralmente mediante soportes fijos, rígidos y lisos (ver figura: 2.12). También se encontrarán en una barra de longitud infinita sometida, en sus lados, a cargas uniformemente distribuidas ya que, por razones de simetría, los elementos situados en un plano transversal no pueden salirse de él. Este modelo idealizado muestra que en el caso real de una barra larga sometida a cargas

transversales uniformemente distribuidas (ver figura: 2.13), existe un estado de esfuerzo plano en cualquier sección transversal que no este localizada demasiado cerca de uno de los extremos de la barra.

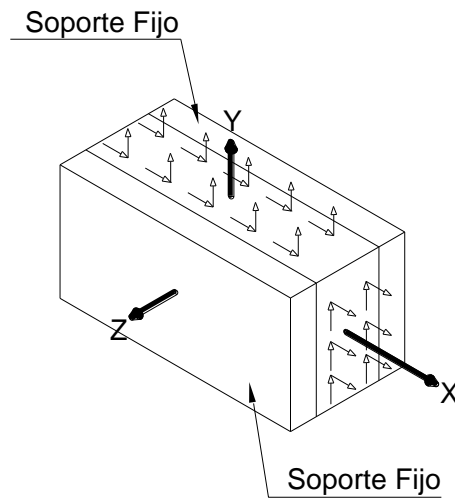


Figura 2.12: Esquema de deformación plana, eje Z perpendicular a planos de deformación

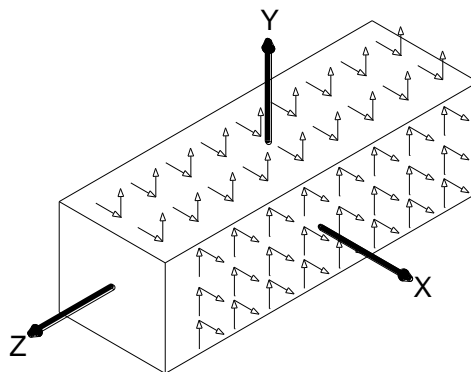


Figura 2.13: Barra larga sometida a cargas transversales uniformemente distribuidas

Supóngase que existe un estado de esfuerzo plano en el punto $Q: [z = \gamma_{zx} = \gamma_{xy} = 0]$, definido por las Componentes de deformación ϵ_z , ϵ_y y γ_{xy} asociadas Con los ejes x e y.

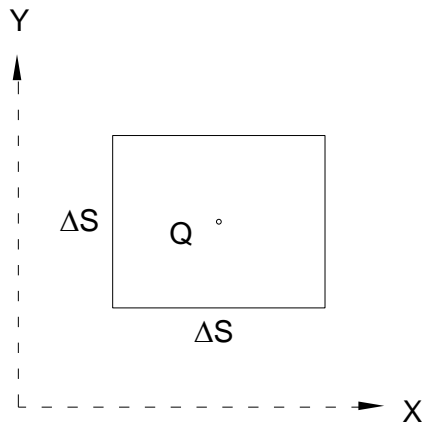


Figura 2.14: Esquema de elemento diferencial cuadrado antes de deformación

Esto significa que un elemento cuadrado de centro Q, con lados de longitud Δs respectivamente paralelos a los ejes x y y (ver figura 2.14), se transforma en un paralelogramo con lados de longitud $\Delta s = (1 + \varepsilon_x)$ y $\Delta s = (1 + \varepsilon_y)$, formando ángulos de $\frac{\pi}{2} - \gamma_{xy}$ y $\frac{\pi}{2} + \gamma_{xy}$ entre si (vea figura 2.15). Como resultado de las deformaciones de los otros elementos localizados en el plano xy , el elemento considerado también puede experimentar un movimiento de cuerpo rígido, pero tal movimiento es insignificante en lo referente a la determinación de las deformaciones en el punto Q y no se tendrá en cuenta en este análisis.

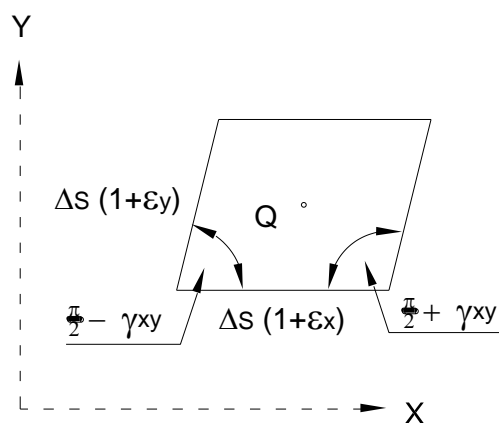


Figura 2.15: Elemento diferencial deformado

El propósito es determinar en términos de $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ y γ_{xy} y 0 las componentes de deformación $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ y γ_{xy} asociadas con el marco de

referencia $x' y'$ obtenido mediante la rotación de los ejes x y y un ángulo θ . Como se muestra en la figura 2.15, estas nuevas componentes de la deformación definen el paralelogramo en que se transforma un cuadrado con lados respectivamente paralelos a los ejes x' y y' .

2.2.6 CIRCULO DE MOHR PARA ESFUERZO TRIAXIAL

Teniendo como sustento lo estudiado en el círculo de Mohr biaxial, se procede a su estudio en tres direcciones, para esto se parte del estado de esfuerzos correspondiente a los esfuerzos principales.

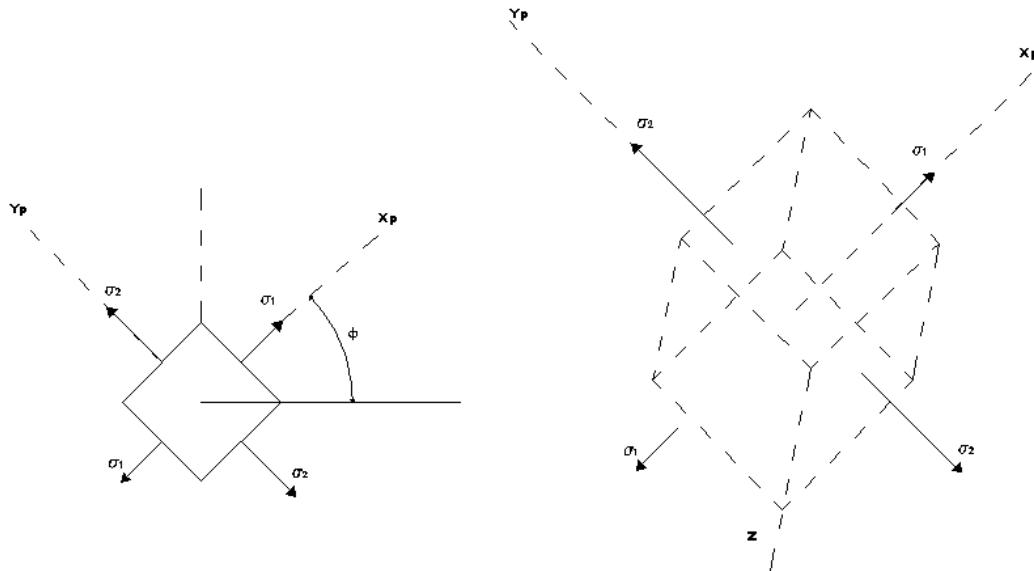


Figura 2.16: Elemento diferencial con esfuerzos presentes en los tres ejes.

Como se conoce que cuando en las caras del elemento diferencial existen los esfuerzos principales no existen esfuerzos cortantes. Imagínese, para el presente análisis, que al elemento diferencial se hace girar alrededor del eje X_p , con lo que el estado de esfuerzos se vería así:

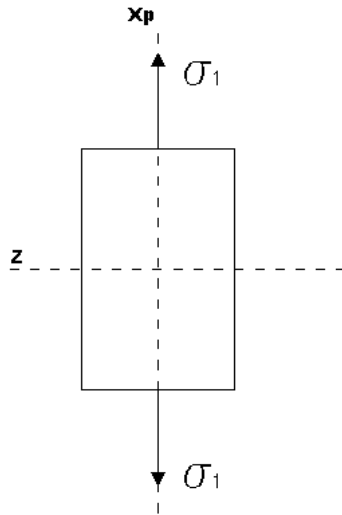


Figura 2.17: Elemento diferencial en rotación respecto del eje X_p .

Que graficando el círculo de Mohr sobre el mismo sistema de coordenadas en que se traza en el plano (puntos σ_1 y σ_2), para este estado de esfuerzo, en donde aparece el esfuerzo principal σ_2 correspondiente, se vería así:

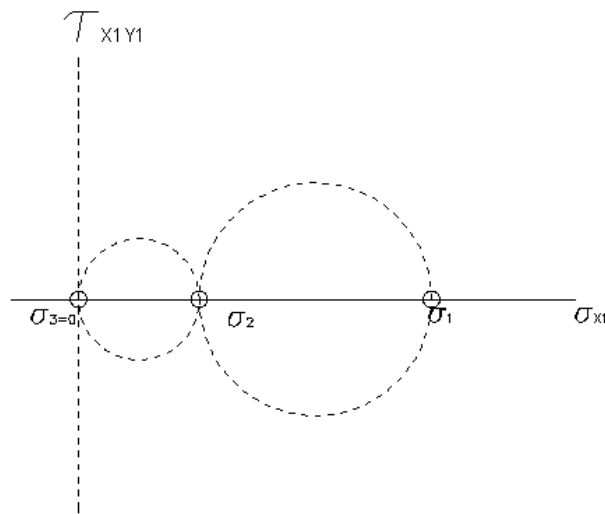


Figura 2.18: Círculo de Mohr para estado triaxial.

El círculo así trazado es el correspondiente a los puntos σ_2 y $\sigma_3=0$, que como se puede ver es un círculo tangente al anterior en el punto σ_2 , el punto de tangencia σ_2 y $\sigma_3=0$ tiene este valor porque en el estado de esfuerzos correspondiente a los esfuerzos principales el esfuerzo normal en dirección del

eje z , σ_2 es "0" y como en esa cara el esfuerzo cortante es "0" entonces el esfuerzo normal es otro de los tres esfuerzos principales, que se le conoce como σ_3 .

Volviendo al estado de esfuerzos correspondientes a los esfuerzos principales y si ahora el elemento diferencial se lo hace girar alrededor del eje Y_p , el estado de esfuerzos plano que se vería así:

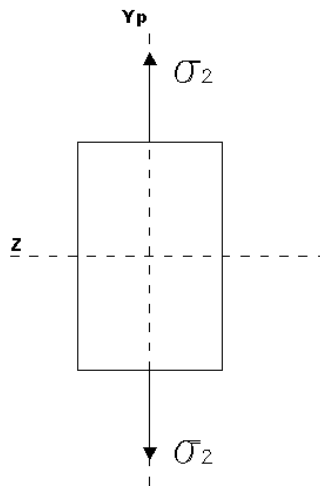


Figura 2.19: Elemento diferencial en rotación respecto del eje Y_p

Con lo que el círculo de Mohr del anterior estado de esfuerzos trazado sobre el mismo sistema de coordenadas se vería así:

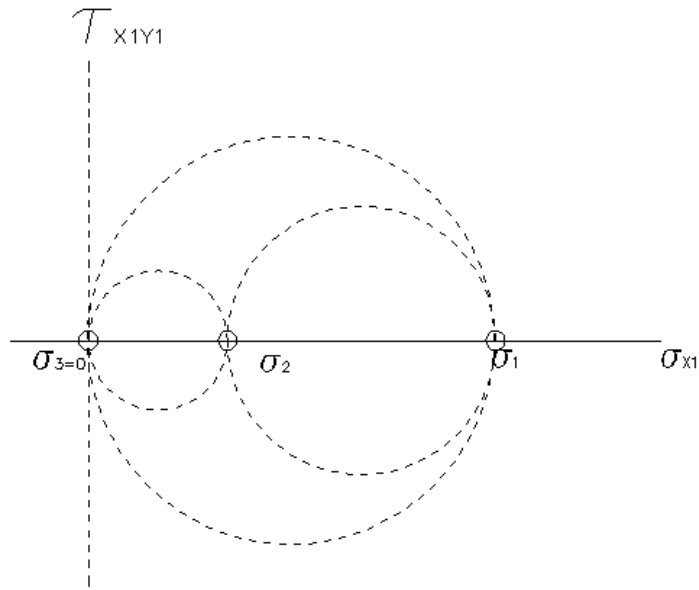


Figura 2.20: Círculo de Mohr para $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, con $\sigma_3 = 0$

El círculo así trazado es tangente a los otros dos en los puntos σ_1 y $\sigma_3=0$, de esta manera se forman tres círculos en el espacio. Ahora si se considera que el esfuerzo $\sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$, y si se considera que $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, los tres círculos de Mohr se verían así:

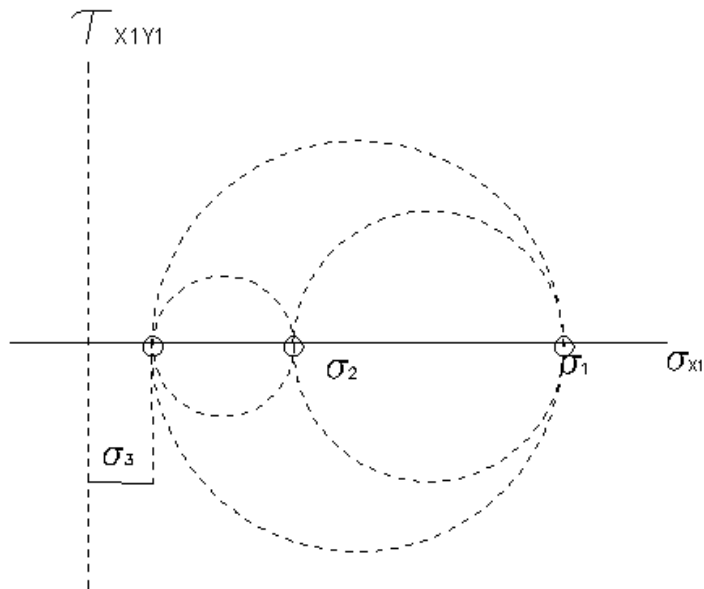


Figura 2.21: Círculo de Mohr para $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, con $\sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$

De donde los radios de cada círculo corresponden a los esfuerzos cortantes máximos y que vienen dados por:

$$\tau_{\max 1,2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = R_{1,2} \quad \text{ec. 2.15}$$

$$\tau_{\max 1,3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = R_{1,3} \quad \text{ec. 2.16}$$

$$\tau_{\max 2,3} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} = R_{2,3} \quad \text{ec. 2.17}$$

Cuando el material sea débil a soportar los esfuerzos normales importará conocer los esfuerzos principales σ_1, σ_2 y σ_3 , en cambio cuando el material sea débil a soportar los esfuerzos cortantes importará conocer los esfuerzos cortantes máximos $\tau_{\max 1,2}, \tau_{\max 1,3}, \tau_{\max 2,3}$.

Existen casos poco frecuentes en investigación de análisis de esfuerzos en los que en un elemento diferencial existen, tanto esfuerzos normales como cortantes en todas las caras del mismo, en tales casos ya no se sigue el procedimiento anterior para dibujar los tres círculos de Mohr en tres direcciones, lo que se hace es aplicar una ecuación de tercer grado cuyas tres soluciones proporcionan los valores de los tres esfuerzos principales σ_1, σ_2 y σ_3 que una vez conocidos, los tres círculos de Mohr se pueden dibujar fácilmente.

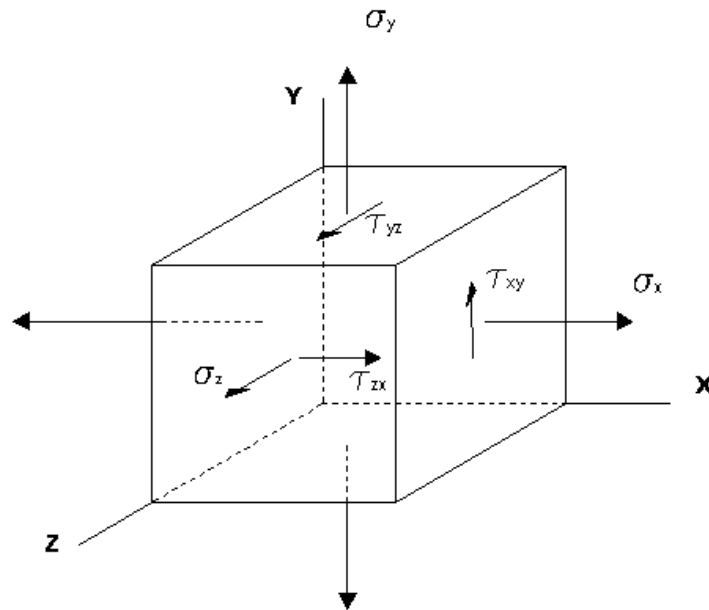


Figura 2.22: Elemento diferencial tanto con esfuerzos normales como cortantes en todas sus caras.

Se va suponer que se tiene un estado de esfuerzos del elemento diferencial con tres componentes de esfuerzo normal σ_x, σ_y y σ_z y tres componentes de esfuerzo cortante $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ todas las componentes se va a suponer que son positivas, con esto la ecuación de tercer grado que se aplica para determinar los valores de los tres esfuerzos principales es:

$$\sigma_n^3 - A\sigma_n^2 + B\sigma_n - C = 0$$

Donde

$$A = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$B = \sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2$$

$$C = \sigma_x\sigma_y\sigma_z - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 + 2\tau_{xy}\tau_{xz}\tau_{yz}$$

σ_n representa cualquiera de los tres esfuerzos principales

Adoptando la siguiente convención de signos para el esfuerzo cortante.

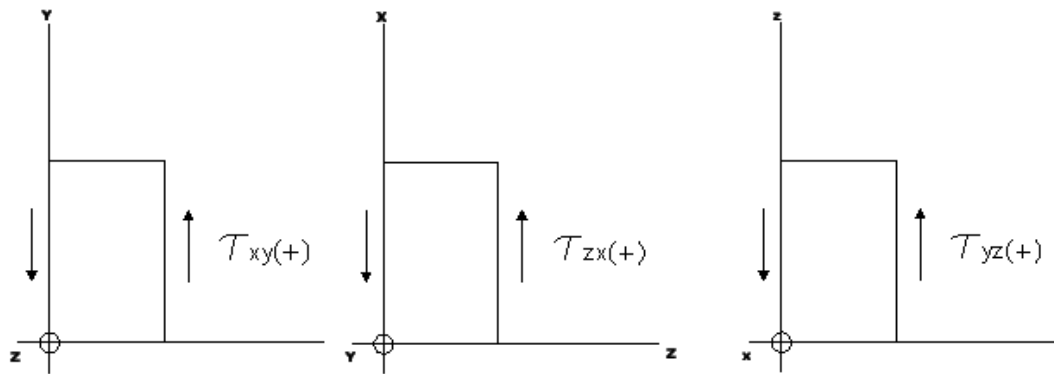


Figura 2.23: Convención de signos para el esfuerzo cortante.

2.3 DIAFRAGMAS

Al analizar la geometría de las tapas, vemos que estas tienen forma de placa circular, reforzada por un cerco central y nervaduras de disposición radial. Si a esto se le agrega el que están simplemente apoyadas en su cerco exterior, nos sugiere que es un elemento con un comportamiento muy similar al de los diafragmas, entendiéndose por tal a una placa plana cuya relación de espesor / diámetro no sea mayor que 0.1. Haciendo un símil, podríamos comparar a los diafragmas con las lozas de una edificación, pero circulares.

En una visión general, la pendiente y deflexión de placas circulares sometidas a diversos tipos de carga y condiciones de apoyo están dadas por la ecuación:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{dy}{dr} \right) \right] = -\frac{Q}{D} \quad \text{ec. 2.18}$$

Donde:

y = Deflexión en el radio r

r = Radio de giro

dy/dr = Pendiente para el radio r

Q = Carga aplicada o fuerza cortante por unidad de longitud

D = Rigidez a la flexión

t = Espesor de la placa

2.3.1 ESFUERZO

Considere la porción de una placa o diafragma delgados que se muestran en la figura 2.24, doblada con el radio R_{XY} en el plano XY y el radio R_{YZ} en el plano YZ. La relación entre esfuerzos y deformaciones en un sistema de deformación tridimensional está dada por las ecuaciones:

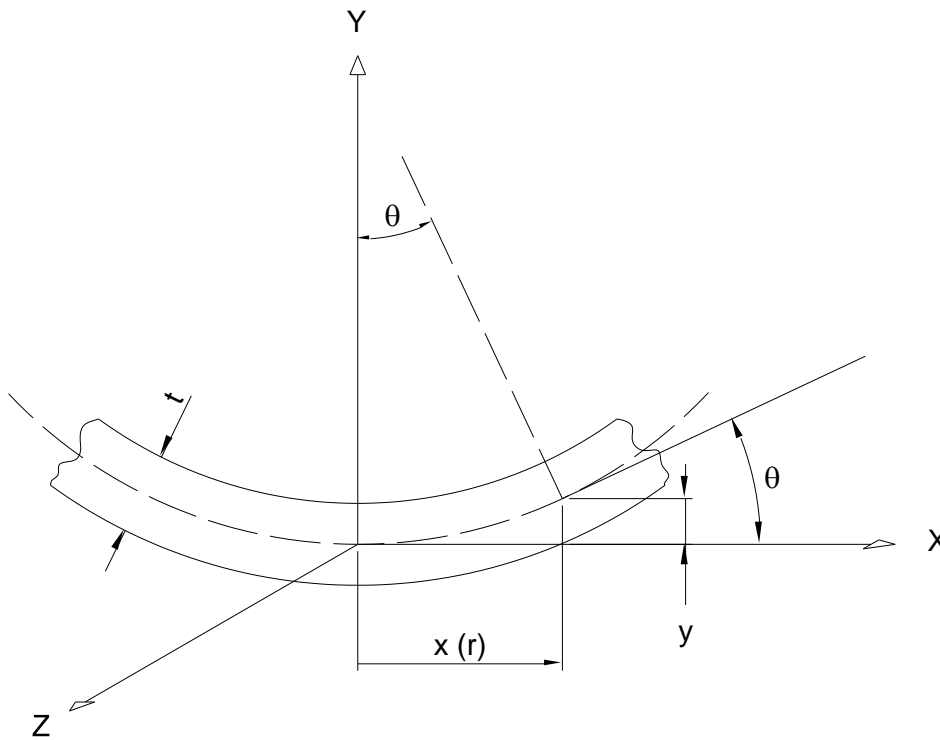


Figura 2.24 : Porción de placa delgada

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z] \quad \text{ec. 2.19}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \nu\sigma_x - \nu\sigma_y] \quad \text{ec. 2.20}$$

Ahora, las placas delgadas, siempre que se restrinja las deflexiones a un tamaño no mayor de la mitad del espesor de la placa⁵, puede suponerse que el esfuerzo directo en la dirección Y será cero, y con las ecuaciones anteriores se tiene:

⁵ Timoshenko, Theory of Plates and Shells, 2a. Ed, McGraw-Hill, 1959

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot [\varepsilon_x + \nu\varepsilon_z] \quad \text{ec. 2.21}$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot [\varepsilon_z + \nu\varepsilon_x] \quad \text{ec. 2.22}$$

Si u es la distancia hasta cualquier fibra desde el eje neutro, entonces, para la flexión pura en los planos XY y YZ,

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y} = \frac{E}{R} \quad \text{y} \quad \frac{\sigma}{E} = \frac{u}{R} = \varepsilon$$

$$\therefore \varepsilon_x = \frac{u}{R_{xy}} \quad \text{y} \quad \varepsilon_z = \frac{u}{R_{yz}}$$

En este caso $\frac{1}{R} = \frac{d^2y}{dx^2}$ y, para deflexiones pequeñas,

$$\frac{du}{dx} = \tan(\theta) = \theta \text{ (radianes)}.$$

$$\therefore \frac{1}{R_{xy}} = \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d\theta}{dx}$$

y

$$\varepsilon_x = u \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad \text{ec. 2.23}$$

Considere ahora el diagrama que se muestra en la figura 2.25, en el que los radios de los círculos concéntricos que pasan por C_1 y D_1 sobre la placa sin cargas aumentan a $[(x+dx) + (\theta+d\theta) \cdot u]$ y $[x+u \cdot \theta]$, respectivamente, cuando se carga la placa.

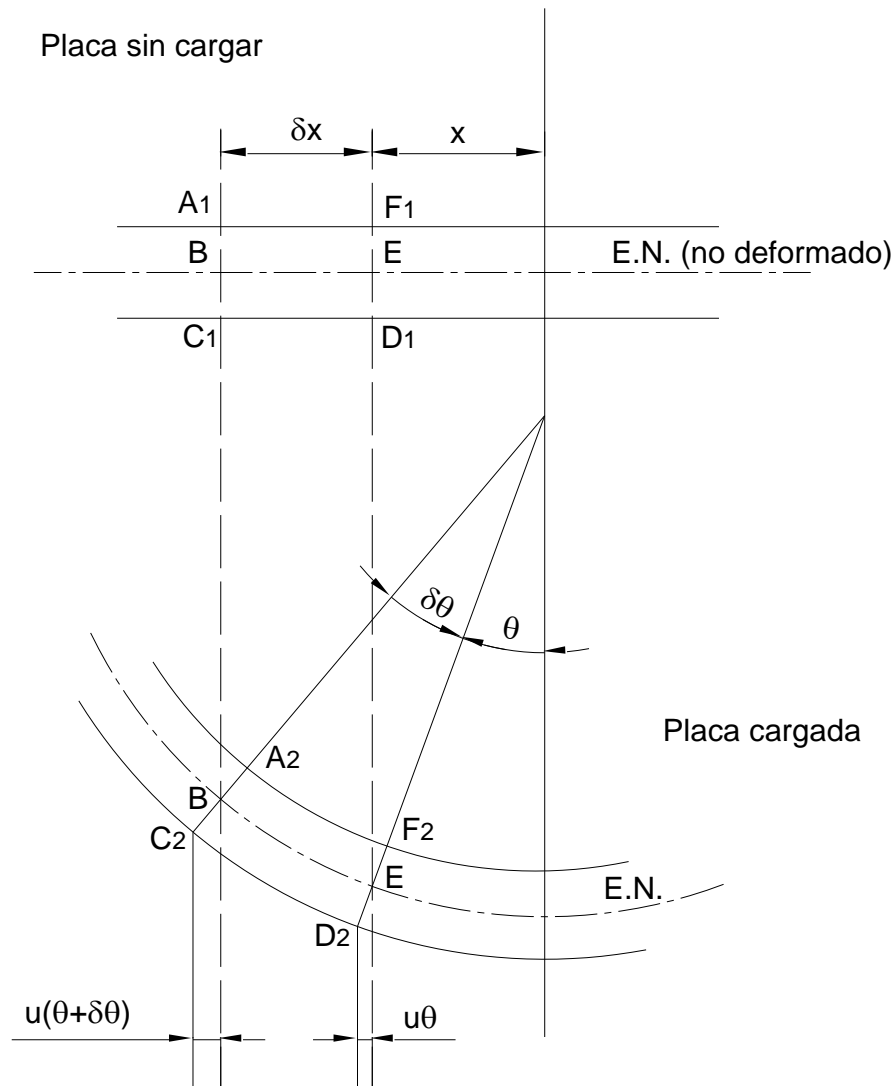


Figura 2.25: Deformación de placa plana al aplicar carga.

Deformación perimetral en D_2

$$= \varepsilon_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot (x + u\theta) - 2 \cdot \pi \cdot x}{2 \cdot \pi \cdot x}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{u \cdot \theta}{x}$$

ec. 2.24

Sustituyendo las ecuaciones 2.23 y 2.24 en las ecuaciones 2.21 y 2.22, se obtiene

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} \left[u \frac{d\theta}{dx} + \nu \frac{u \cdot \theta}{x} \right]$$

Es decir,

$$\sigma_x = \frac{E \cdot u}{(1-\nu^2)} \left[\frac{d\theta}{dx} + \nu \frac{\theta}{x} \right] \quad \text{ec. 2.25}$$

En forma semejante,

$$\sigma_z = \frac{Eu}{(1-\nu^2)} \left[\frac{\theta}{x} \nu + \frac{d\theta}{dx} \right] \quad \text{ec. 2.26}$$

2.3.2 MOMENTOS FLECTORES

Considere la pequeña sección de placa que se muestra en la figura 2.26 que resulta ser de longitud unitaria. Definiendo los momentos M como *momento por unidad de longitud* y aplicando la teoría de la flexión simple,

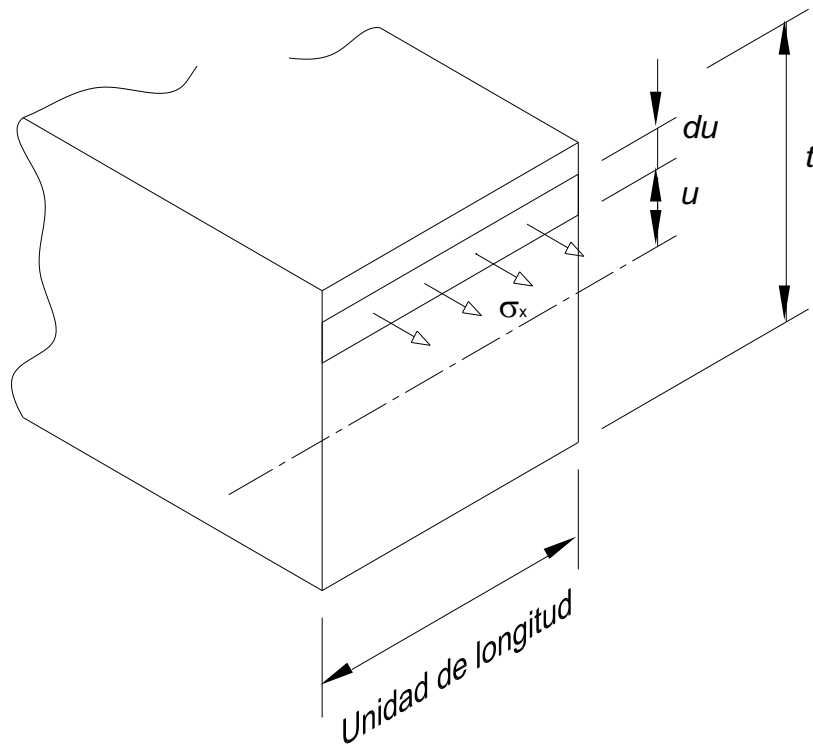


Figura 2.26: Elemento de sección de placa de longitud unitaria.

$$M = \frac{\sigma \cdot l}{y} = \frac{\sigma}{u} \left[\frac{l \cdot t^3}{12} \right] = \frac{\sigma \cdot t^3}{12 \cdot u}$$

De donde es posible expresar las ecuaciones de esfuerzo en términos de los momentos aplicados; es decir,

$$\sigma_x = M_{xy} \frac{12 \cdot u}{t^3} \quad \text{ec. 2.27}$$

$$\sigma_z = M_{yz} \frac{12 \cdot u}{t^3} \quad \text{ec. 2.28}$$

2.3.3 ECUACIÓN GENERAL PARA LA PENDIENTE Y DEFLEXIÓN

Considere ahora la figura 2.27, en la que se muestran las fuerzas y los momentos por unidad de longitud que actúan en un elemento diferencial de la placa que subtiende un ángulo ϕ en el centro. Así, M_{xy} y M_{yz} son los momentos por unidad de longitud en los dos planos, como se describió antes, y Q es la fuerza cortante por unidad de longitud en la dirección OY .

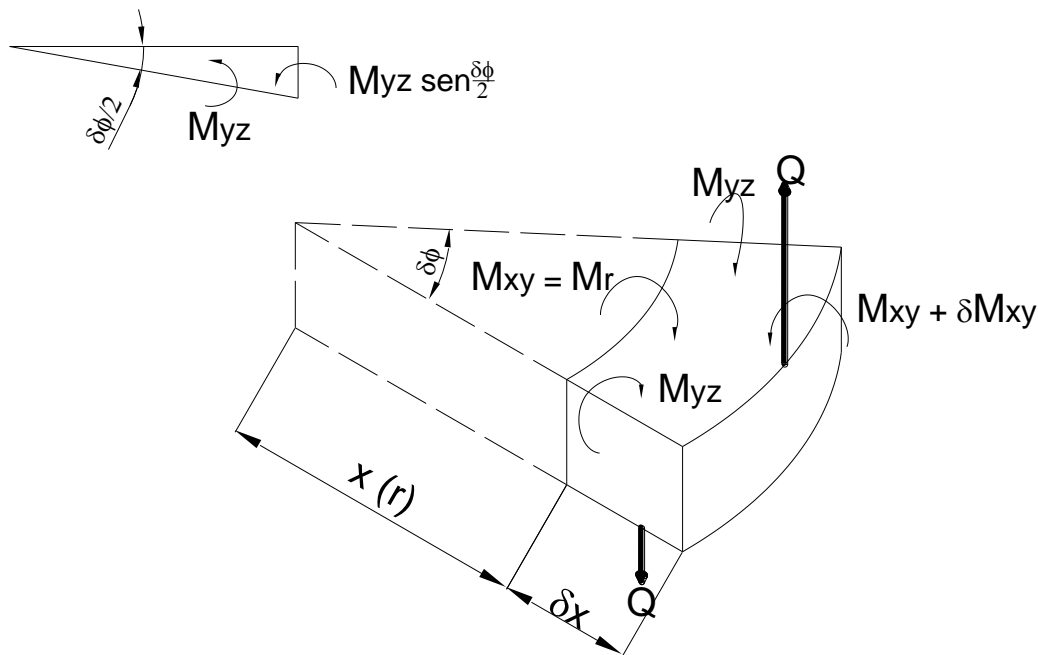


Figura 2.27: Diagrama de cuerpo libre de elemento diferencial de placa circular.

Para que haya equilibrio de momentos en el plano radial XY , se consideran los momentos respecto al borde exterior,

$$(M_{xy} + \delta M_{xy})(x + \delta x) \delta \phi - M_{xy} x \delta \phi - 2M_{yz} \delta x \cdot \text{sen}\left(\frac{1}{2} \delta \phi\right) + Qx \delta \phi \delta x = 0$$

Ahora $\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} = D$ es una constante denominada *rigidez a la flexión*;

Lo que al simplificar, llevar al límite y sustituir las ecuaciones 2.27 y 2.28

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d\theta}{dx} - \frac{\theta}{x^2} = -\frac{Q}{D}$$

Esta ecuación puede ser utilizada como ecuación general de las pendientes y deflexiones en la placas, siempre y cuando se conozca la carga Q en función de X.

Hasta el momento las expresiones se dedujeron usando coordenadas cartesianas (X, Y, Z). Sin embargo, para las placas circulares resulta conveniente sustituir la variable x por el radio general r, y resulta posible expresar las ecuaciones antes deducidas en la forma siguiente:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dy}{dr} \right) \right] = -\frac{Q}{D} \quad \text{ec. 2.29}$$

Esfuerzo radial

$$\sigma_r = \frac{Eu}{(1-\nu^2)} \left[\frac{d\theta}{dr} + \nu \frac{\theta}{r} \right] \quad \text{ec. 2.30}$$

Esfuerzo tangencial

$$\sigma_z = \frac{Eu}{(1-\nu^2)} \left[\nu \frac{d\theta}{dr} + \frac{\theta}{r} \right] \quad \text{ec. 2.31}$$

Momentos

$$M_r = D \left[\frac{d\theta}{dr} + \nu \frac{\theta}{r} \right] \quad \text{ec. 2.32}$$

$$M_z = D \left[\nu \frac{d\theta}{dr} + \frac{\theta}{r} \right] \quad \text{ec. 2.33}$$

En el caso de cargas uniformemente distribuidas, es decir presiones q, la carga cortante efectiva Q por unidad de longitud que se debe reemplazarse

$$Q = \frac{qr}{2}.$$

2.3.4 PLACA CIRCULAR CON CARGA UNIFORME Y CON BORDES LIBREMENTE APOYADOS

La deflexión máxima se encuentra en el centro y resulta una vez más igual a la deflexión de los apoyos respecto al centro; teniéndose,

$$\text{Deflexión máxima} = y_{\max} = \frac{qR^4}{64D} \left[\frac{(5+\nu)}{1+\nu} \right] = \frac{3qR^4}{16Et^3} (5+\nu)(1+\nu) \quad \text{ec. 2.34}$$

Para $\nu = 0.3$, este valor es aproximadamente cuatro veces mayor que para la condición de borde empotrado.

Para una placa circular con carga uniforme y con bordes apoyados libremente,

$$\sigma_{r_{\max}} = \sigma_{z_{\max}} = \frac{3qR^2}{8t^2} (3+\nu) \quad \text{ec. 2.35}$$

2.3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS: LIMITACIONES DE LA TEORÍA

Con base en lo antes estudiado, se observa que se aplican las siguientes relaciones aproximadas:

- La deflexión máxima de una placa circular con carga uniforme y bordes libremente apoyados es aproximadamente cuatro veces mayor que la de la condición de borde empotrado.
- Cuando se tienen bordes libremente apoyados, la deflexión máxima para una carga central es 2.5 veces mayor que la que se tiene para una carga uniformemente distribuida equivalente.
- Debe de recordarse que la teoría antes desarrollada se basa en la suposición de que las deflexiones son pequeñas en comparación con el espesor de la placa. Si las deflexiones exceden de la mitad del espesor del espesor, entonces debe considerarse el alargamiento de la superficie media de dicha placa. Bajo estas condiciones, las deflexiones ya no resultan proporcionales a las cargas aplicadas.

2.4 ROSETA DE DEFORMACIÓN

Haciendo dos marcas A y B a través de una línea dibujada en la dirección deseada, y midiendo la longitud del segmento AB antes y después de aplicar la carga se puede determinar la deformación normal en cualquier dirección en la superficie de un elemento estructural o componente de máquina.

El problema encontrado en la medición de la deformación es el determinar el movimiento entre dos puntos una distancia específica de separación. Este problema es fácilmente resuelto empleando los instrumentos denominados deformímetros, los cuales pueden ser ópticos, mecánicos, acústicos y eléctricos; siendo estos últimos los mayormente empleados, por tener poca influencia en el proceso, bajo costo, una excelente sensibilidad, precisión y exactitud.

Dentro de los extensiómetros eléctricos comúnmente se emplean de tres tipos:

Tipo	Material típico	Tamaño [mm]
Extensiómetro de alambre	Constantán 55% Cu - 45% Ni Nicrom 80% Ni – 20% Cr	$0.0127 < \phi < 0.0254$
Extensiómetro laminar	Constantán Nicrom Aleaciones de Pt	Espesor ≈ 0.0254
Extensiómetro semiconductor	Cristal dopado de Silicio	Espesor ≈ 0.0254

Tabla 2.4: Tipos de extensiómetros eléctricos⁶.

⁶ Fuente: Rahmani – Vásquez, Análisis estructural del pórtico del vibroforo de baja frecuencia del LRM y verificación utilizando un sistema de adquisición de datos, Proyecto de grado, Ing. Mecánica, 2005. pag. 30.

La mayoría de los extensiómetros son firmemente adheridos a la superficie a examinar con resina fenólica, o pegamento epóxico, posteriormente es recubierto con laca, silicón o poliuretano para prevenir de la oxidación al sensor.

2.4.1 RELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS EXTENSIÓMETROS ELÉCTRICOS

El principio de funcionamiento de estos dispositivos está basado en la variación de la resistencia eléctrica de un conductor o semiconductor en función de la variación de su sección, la misma que se da debido al alargamiento en su longitud, este efecto se denomina efecto piezorresistivo.

Las fuerzas de compresión, tracción o flexión aplicadas sobre un material que trabaje sobre su límite elástico, genera deformaciones y al estar firmemente adheridos los extensiómetros, detectan esa variación mínima de longitud como una variación de su resistencia. Esta característica es conocida como factor de galga, cuantificada por:

$$G = \frac{\Delta R / R}{e} \quad \text{ec. 2.36}$$

Al ser estos sensores transductores pasivos, el proceso de medida es indirecto, esto quiere decir que previo al cálculo de la fuerza o esfuerzo, es preciso realizar la correspondencia entre la resistencia y tensión a partir de un círculo adaptador. La primera relación necesaria para la determinación

$$R = \rho \frac{l}{a} \quad \text{ec. 2.37}$$

Donde:

R = Resistencia del alambre

ρ = Resistividad

l = Longitud del alambre

a = Sección del alambre

Estos factores en una condición real de operación varían, y si en el caso de que una galga sea sometida a esfuerzo en el sentido efectivo de medición tenemos:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{ec. 2.38}$$

En esta expresión, puesta en función de la deformación unitaria longitudinal y transversal, el coeficiente de Poisson y simplificando tenemos:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu)e_1 + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{ec. 2.39}$$

Tomando en cuenta el factor de galga obtenemos:

$$G = 1 + 2\nu + \frac{1}{e} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{ec. 2.40}$$

Para la mayoría de los metales, basándonos en el coeficiente de Poisson y el factor piezorresistivo, notamos que es común un factor de galga aproximado a 2; pero para galgas de materiales semiconductores tipo N este factor oscila entre -100 y -140 y para tipo P de +100 a +175. En caso de presentarse un valor negativo de la galga representa una disminución en la resistencia ante una deformación en tracción.

Debe advertirse que las componentes de la deformación unitaria normal ε_x , ε_y y y_{xy} en un punto dado pueden obtenerse de la medida de deformación normal hecha a lo largo de tres líneas dibujadas por ese punto. Designando respectivamente por θ_1 , θ_2 y θ_3 el ángulo que cada una de las líneas forma con el eje x, reemplazando en la ecuación anterior, se tienen las tres ecuaciones

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x \cos^2(\theta_1) + \varepsilon_y \text{sen}^2(\theta_1) + y_{xy} \text{sen}(\theta_1) \cos(\theta_1) \quad \text{ec. 2.41}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_x \cos^2(\theta_2) + \varepsilon_y \text{sen}^2(\theta_2) + y_{xy} \text{sen}(\theta_2) \cos(\theta_2) \quad \text{ec. 2.42}$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_x \cos^2(\theta_3) + \varepsilon_y \text{sen}^2(\theta_3) + y_{xy} \text{sen}(\theta_3) \cos(\theta_3) \quad \text{ec. 2.43}$$

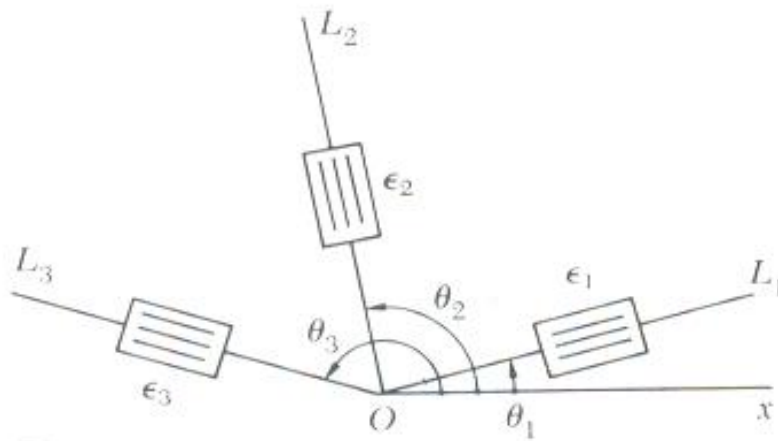


Figura 2.28: Ubicación de deformímetros para la medición de ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3

La colocación de los deformímetros utilizados para medir las tres deformaciones normales ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3 se conoce como *Roseta de Deformación*.

La roseta usada para medir deformaciones normales a lo largo de los ejes x y y , siendo su bisector se conoce como roseta de 45° . Otra roseta muy utilizada es la de 60° .

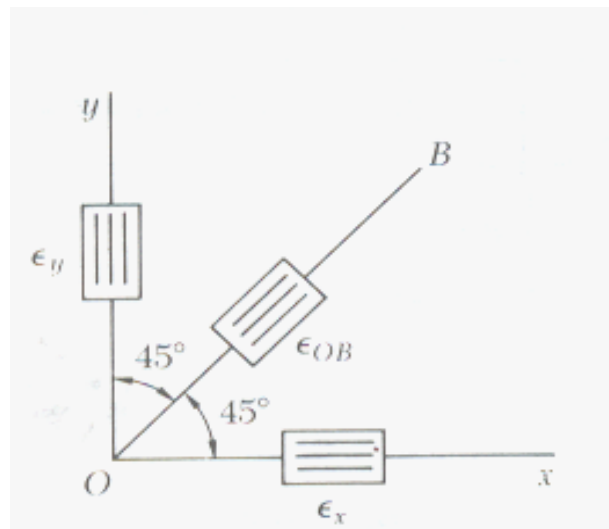


Figura 2.29: Roseta de deformación a 45° .

2.5 SOFTWARE DE DISEÑO POR ELEMENTOS FINITOS

Los programas de diseño por elementos finitos son el resultado de la aplicación de la teoría del mismo nombre, la cual surge de la necesidad de

poder agilizar el proceso de producción al reducir el tiempo de diseño empleando un ambiente computacional.

El Método de Elementos Finitos es una técnica numérica para el diseño en ingeniería, ha sido aceptado como el método estándar de análisis debido a su generalización y adaptabilidad para aplicaciones computacionales. Consiste en dividir el modelo en varias piezas pequeñas de perfiles básicos denominados elementos, con lo que se reemplaza a un problema complejo en varios problemas simples que deben ser resueltos simultáneamente.

Estos elementos cuentan con puntos comunes entre sí denominados *nodos*. El proceso de división del modelo es llamado *mallado*. La reacción en cualquier punto en un elemento es interpolado de la reacción en el nodo del elemento. Cada nodo es completamente descrito por un número de parámetros dependiendo del tipo de elemento y de análisis usado.

2.5.1 SOLIDWORKS 2005 Profesional

Es un software de diseño mecánica automatizado que toma ventaja del interfase gráfico de Microsoft Windows. Ha sido pensado en función de brindar una mayor facilidad al usuario para aprender su manejo, esquematizar ideas, experimentar con diversas características y dimensiones y generar fácilmente modelos y gráficas detalladas.

2.5.2 COSMOSWORKS SPo 2005 Profesional

COSMOSWORKS es una aplicación de análisis de diseño y automatización integrado con SolidWorks. Este software emplea los Elementos Finitos para simular las condiciones de trabajo del diseño y predecir su comportamiento. Cuenta con poderosas herramientas para la resolución de grandes sistemas de ecuaciones rápidamente, lo que hace posible para los diseñadores el verificar la integridad de su diseño y buscar varias soluciones.

Ofrece herramientas para el análisis de diseños y optimización. Es empleado para mejorar la calidad del diseño, evitar errores de campo, reducir los costes de los materiales y conseguir que los productos tarden menos tiempo en llegar al mercado. Permite además llevar a cabo una inspección detallada del rendimiento del producto, algo que no era hasta ahora posible incluso utilizando los prototipos más detallados. Además, al utilizarse la geometría nativa de SolidWorks, los cambios realizados en uno de los programas se actualizan automáticamente en el otro. Este análisis rápido y barato suele proporcionar soluciones no intuitivas y ventajas, acercando a los ingenieros a una mejor comprensión de las características del producto.

Reduce los obstáculos para el desarrollo de prototipos. Aproximadamente el 80% de los costes de fabricación de un producto están situados en la fase de aprobación del diseño, por lo que la capacidad de realizar iteraciones de diseño rápidas y baratas antes de sacar el diseño se ha convertido en una ventaja clave para la competitividad.

2.5.2.1 Criterios de análisis de esfuerzos en COSMOSWORKS SPo 2005 Profesional

En el software COSMOSWORKS, encontramos algunos importantes criterios a considerar:

2.5.2.1.1 Factor de seguridad

El software evalúa el factor de seguridad en cada “nodo” basado en un criterio de falla. Es decir el usuario puede dibujar la distribución de dicho factor a través del modelo o se puede hacerlo sobre zonas específicas, esto nos ayuda a identificar las zonas de donde nosotros podemos eliminar material, esto en el caso de obtener un factor de seguridad considerablemente alto ó podemos rediseñar las áreas del modelo en las cuales el factor de seguridad sea muy bajo.

2.5.2.1.2 Interpretación del factor de seguridad

- Un factor de seguridad mas bajo a 1.0 indica que el material en esa locación ha fallado.
- Un factor de seguridad igual a 1.0 indica que el material en esa locación ha comenzado a fallar.
- Un factor de seguridad mayor a 1.0 indica que el material en esa locación ha pasado las pruebas y es seguro.

2.5.2.1.3 Criterios de Falla

El criterio de falla predice la falla de un material sujeto a un estado de stress. Debido a la variedad de materiales que existen y las innumerables condiciones de prueba a las cuales pueden estar sometidas las muestras, no se puede unificar los criterios de análisis.

Es por esto que el CosmosWorks viene provisto de los siguientes criterios:

- Criterio de esfuerzo máximo de von Mises

Este criterio está basado en la teoría von Mises-Hencky, también conocida

Como la teoría de la energía cortante o la teoría de la energía de distorsión máxima.

En términos de los esfuerzos principales σ_1, σ_2 y σ_3 , el esfuerzo de Von Mises es expresado así:

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$

La teoría se basa en que un material dúctil comienza a fracturarse en un sitio donde el esfuerzo de Von Mises comienza a igualarse al esfuerzo límite. En la mayoría de casos, la fuerza de rotura es usada como el esfuerzo límite.

El factor de seguridad en este criterio se lo calcula de la siguiente manera:

$$\text{Factor de seguridad } (Fs) = \frac{\sigma_{\text{l\u00edmite}}}{\sigma_{\text{VonMises}}}$$

- Cortante Puro

En el caso del cortante puro τ el esfuerzo de Von Misses puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\sigma_{\text{VonMises}} = \sqrt{3}\tau$$

La falla ocurre si:

$$\tau_{\text{max}} = 0.577 \sigma_{\text{rotura}}$$

- Criterio de esfuerzo Mohr-Coulomb

Este criterio est\u00e1 basado en la teor\u00eda Mohr-Coulomb, tambi\u00e9n conocida como la Teor\u00eda de Fricci\u00f3n Interna. Este criterio es usado para materiales fr\u00e1giles con diferentes propiedades tensionales y compresibles. Los materiales fr\u00e1giles no tiene un punto de rotura especificado y por lo tanto no es recomendable el uso de la fuerza de rotura para definir el esfuerzo l\u00edmite en este criterio

Esta teor\u00eda predice que la falla ocurrir\u00e1 cuando:

$$\sigma_1 \geq \sigma_{\text{l\u00edmitetrac}} \quad \text{si } \sigma_1 > 0 \wedge \sigma_3 > 0$$

$$\sigma_3 \geq -\sigma_{\text{l\u00edmitecomp}} \quad \text{si } \sigma_1 < 0 \wedge \sigma_3 < 0$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{l\u00edmitetrac}}} + \frac{\sigma_3}{\sigma_{\text{l\u00edmitecomp}}} < 1 \quad \text{si } \sigma_1 \geq 0 \wedge \sigma_3 \leq 0$$

Siendo el factor de seguridad dado por:

$$F_S = \left\{ \frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{limite trac}}} + \frac{\sigma_3}{\sigma_{\text{limite comp}}} \right\}^{-1} \quad \text{ec. 2.44}$$

- Criterio de Esfuerzo Normal Máximo

El criterio del esfuerzo normal máximo también conocido como el criterio de Coulomb's esta basado en la Teoría del esfuerzo normal máximo. De acuerdo a esta teoría, las fallas ocurren cuando el esfuerzo principal máximo alcanza el valor de la fuerza máxima del material a simple tensión.

Este criterio es usado para materiales frágiles. Es decir se asume que el valor a tensión máxima es igual que el valor de a compresión.

La teoría predice que la falla ocurre cuando:

$$\sigma_1 \geq \sigma_{\text{limite}}$$

Donde σ_1 = esfuerzo máximo principal

Por lo tanto:

$$F_S = \frac{\sigma_{\text{limite}}}{\sigma_1}$$

2.5.2.2 Selección del criterio de análisis de esfuerzos.

Luego de un análisis de cada uno de los casos presentados, finalmente se opta por el criterio de esfuerzo de Mohr- Coulomb.

Esto debido a las características propias de la fundición gris como diferentes esfuerzos de compresión como de tracción y también debido al procesamiento, es decir factores tales como la velocidad de enfriamiento o la temperatura, que inciden directamente en la adopción de características mecánicas diferentes en sectores anexos entre si.

Este fenómeno se puede apreciar durante la elaboración de probetas de ensayos de tracción, en donde a pesar de ser probetas obtenidas de la misma colada y de la misma pieza, las propiedades mecánicas varían fuera de rangos aceptables, llegando a la conclusión que es por demás difícil obtener las mismas propiedades mecánicas en un mismo elemento.

Es por estas características del material que este criterio se presta de manera adecuada para obtener resultados más favorables durante el diseño.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN

3.1 ANÁLISIS METROLÓGICO

En el Anexo se puede apreciar las características geométricas de una tapa proporcionada por la Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable Quito. Las medidas tomadas de las tapas son las que se ilustran a continuación:

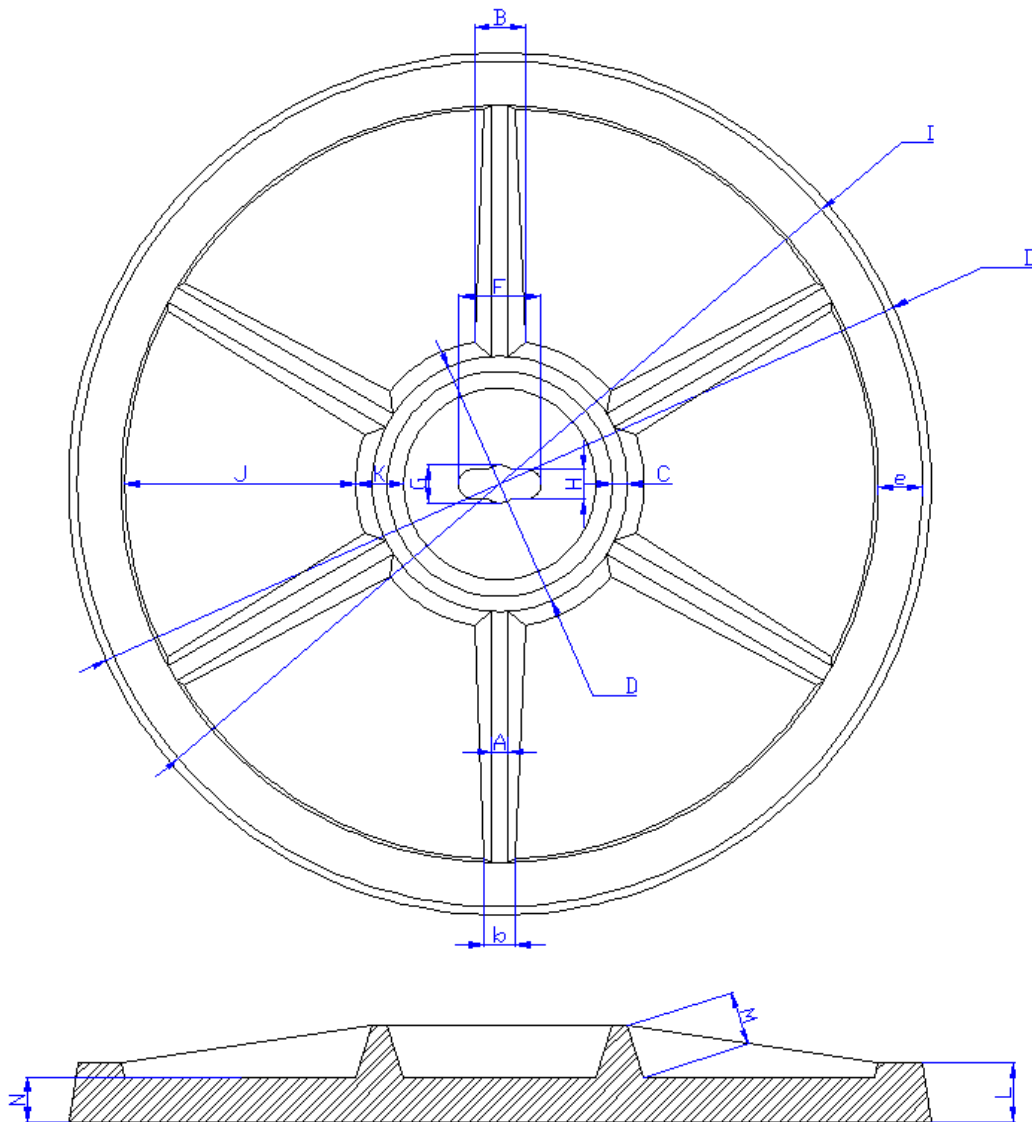


Figura 3.1: Esquema de medidas tomadas de las tapas estudiadas.

Debe recalcar que se realizará el estudio a tres tapas diferentes con lo que se consiguen datos promedio de estas. Estas también han de provenir de un mismo proveedor y de un mismo lote.

3.2 ENSAYOS MECÁNICOS

Como se trató en el capítulo anterior, la fundición gris tiene la propiedad de sensibilidad a la sección y debido a que las tapas cuentan con una geometría compleja, existen variaciones en la resistencia en distintos puntos de esta, por lo que se toma muestras de material para estudiar su comportamiento mecánico con ensayos de dureza, tracción, compresión y con el afán de determinar el tipo de fundición en cada zona, se realiza también ensayos metalográficos.

En las tapas existen cuatro componentes con distintas características geométricas, siendo estos el cerco central, cerco exterior, nervaduras y placa.

De cada una de estas partes se obtendrán tres muestras, se las maquina según las normas ASTM A48, de ser posible o según la disponibilidad del material como en el caso del cerco central. Los lugares seleccionados son los siguientes:

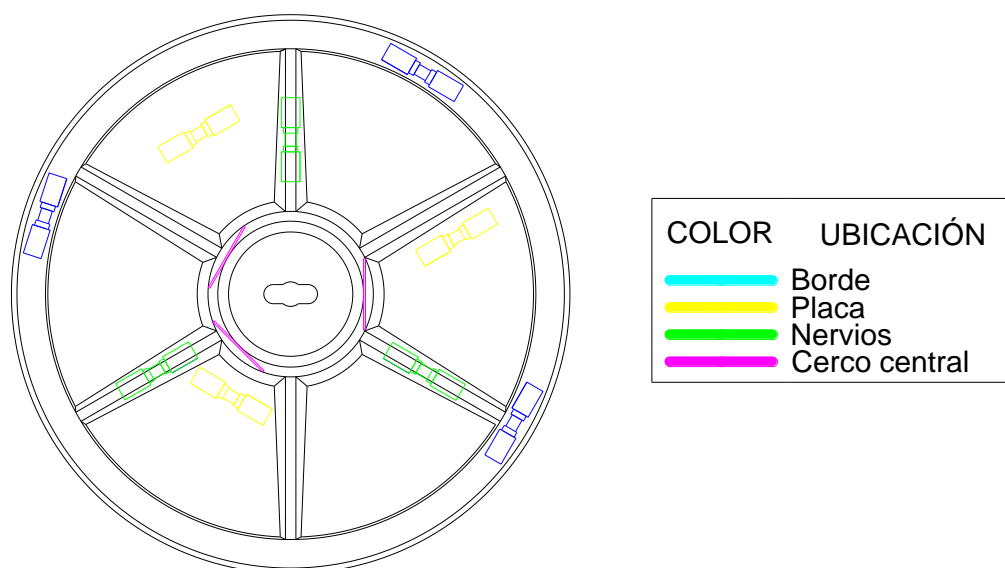


Figura 3.2: Ubicación y disposición de probetas para ensayos a tracción y compresión.

A estas probetas se las ensayará a compresión, tracción y dureza como primer paso para la caracterización completa del material.

3.3 TIPO DE MATERIAL

Es de vital importancia el poder determinar las características del material en cada uno de los puntos pues es de interés el poder determinar las características exactas del comportamiento mecánico de la tapa ante una carga definida de prueba, para lo que empleando ensayos metalográficos y mecánicos, se puede llegar a determinar las características que son más influyentes.

3.3.1 ENSAYOS DE TRACCIÓN:

Las probetas obtenidas según la figura 3.2, se realizan ensayos de tracción y compresión, obteniéndose la curva característica y el punto máximo y de ruptura en cada componente, con los siguientes resultados:

RESULTADOS DE ENSAYOS A TRACCIÓN

Posición	Item	Diámetro [mm]	Área [mm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [MPa]	Promedio [MPa]
Borde	B1	12,72	127,08	3600	267,49	267,84
	B2	12,62	125,09	3600	271,75	
	B3	12,76	127,88	3580	264,28	
Placa	P1	11,22	98,87	3010	285,25	287,94
	P2	11,12	97,12	2930	282,33	
	P3	11,2	98,52	3110	296,23	
Nervios	N1	11,04	95,73	2790	272,09	282,14
	N2	11,24	99,23	3030	286,22	
	N3	11,28	99,93	3070	288,12	

		Espesor [mm]	Ancho [mm]	Área [mm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [MPa]	Promedio [MPa]
Cerco	C1	2,66	18,9	50,27	950	159,03	160,35
	C2	2,66	19,06	50,70	1040	175,11	
	C3	2,68	19,06	51,08	900	146,92	

Tabla 3.1: Resultados de ensayos a tracción.

Como puede observarse en el ensayo a tracción, los resultados son consistentes tanto en el borde, placa y nervios de 267 a 287 [MPa], resistencia aproximada a los 275 [MPa] equivalentes a la cédula 40 exigida, no así en el cerco central en donde apenas alcanza los 160 [MPa], lo que equivale a 23 [KSI], muy por debajo de lo exigido. Esto indica que la propiedad de sensibilidad a la sección es muy influyente en la resistencia a la tracción de este elemento y al ser este un componente estructural clave, el comportamiento global de la tapa se ve afectado.

3.3.2 ENSAYOS DE COMPRESIÓN:

Se conoce que la fundición de hierro es un material frágil y que tiene la propiedad de tener un comportamiento muy diferente cuando es cargado a la tracción que a la compresión, pero también se conoce que estos esfuerzos son proporcionales entre sí en una relación de 2,6 a 3 veces mayor el de compresión, pero esto no toma en cuenta la propiedad de sensibilidad a la sección, por lo que se determinará si esta relación puede mantenerse.

RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN

Posición	Item	Diámetro [mm]	Área [mm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [MPa]	%
Borde	B	15,76	195,08	18600	935	-6,8
Placa	P	14,94	175,30	17500	979	-2,4
Nervios	N	14,02	154,38	16800	1068	6,4
Cerco	C	11,64	106,41	11200	1033	2,9

Media: 1004 [MPa]

Tabla 3.2: Resultados de ensayos a compresión.

En contraste, los ensayos de compresión muestran una variación de resistencia poco significativa entre los componentes, por lo que durante la programación y aplicación del material en la simulación, se ha de tomar un valor medio de 1004 [MPa] para la resistencia a la compresión, no así el caso de la tracción donde se empleará la resistencia obtenida para cada elemento.

3.3.3 ENSAYOS DE DUREZA:

El ensayo se realizó en la máquina para ensayos de dureza marca . Se realizaron los ensayos a una probeta de corte de nervadura cercana al cerco central debido a que esta sección contiene muestras representativas de las diferentes características del material. Se obtuvieron resultados de los siguientes puntos:

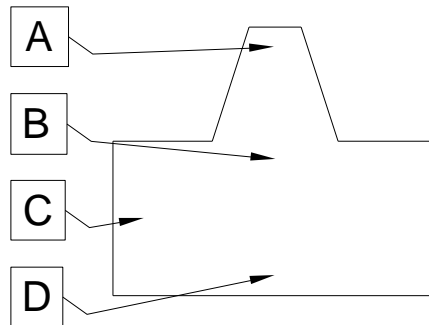


Figura. 3.3: Esquema de puntos de indención para ensayo de dureza Rockwell.

Punto	Ensayo	Rockwell	Brinell
A	RHD	42	243
B	RBB	98	194
C	RBB	95	174
D	RBB	97	188

Tabla 3.3: Resultados de ensayos de dureza

Podría esperarse determinar la resistencia a la tracción del material al multiplicar la dureza Brinell por 500, pero debe recordarse que es definida para aceros de baja aleación, por lo que no brinda resultados precisos en fundición gris.

3.3.4 ENSAYOS METALGRÁFICO:

En función de los resultados obtenidos de los ensayos a tracción y compresión, se podría decir que el material cumple con las características de la

fundición gris clase 40, pero es de interés el determinar el tipo de material que por conformación se tiene en el cerco central, que anteriormente se ha determinado como el de comportamiento más crítico, para lo que se realizó ensayos metalográficos igualmente de diferentes puntos de la tapa, siendo estos:

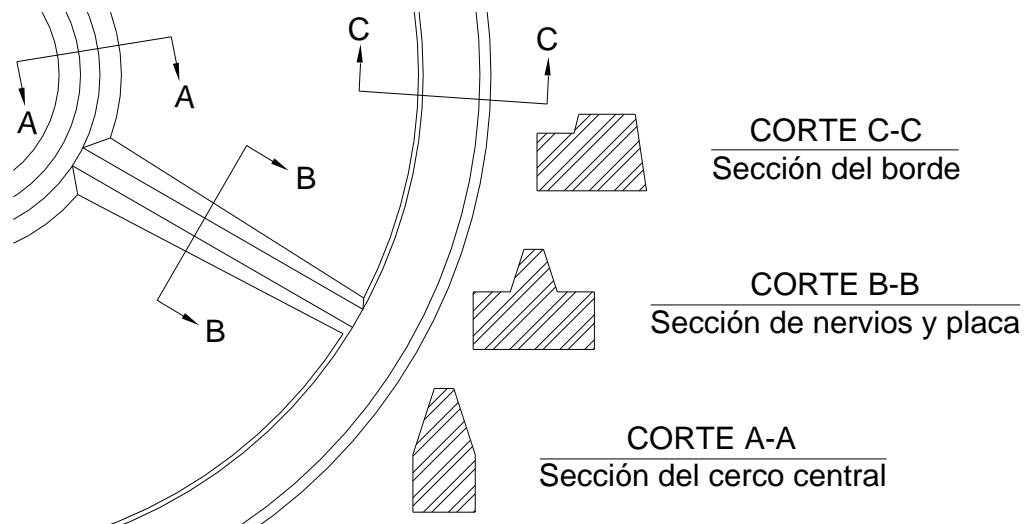


Figura 3.4: Ubicación y disposición de corte para ensayo metalográficos.

El procedimiento a seguir para la obtención de las microfotografías es el siguiente:

- **Obtención de las probetas:** Se cortan probetas de la tapa de ser posible con sierra o con disco de corte, teniendo la precaución de evitar que estas se sobre calienten, lo que provocaría un recocido del material y por ende un cambio significativo de sus propiedades.



Figura 3.5: Corte de probetas de la tapa de pozo de inspección.

- **Corte de sección con cortadora de disco en frío:** Con este equipo cuenta el laboratorio de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería Mecánica, el cual permite realizar cortes precisos con un disco abrasivo, el cual se encuentra bañado por una cascada de refrigerante hidrosoluble, el que lubrica y enfría la muestra a cortar, conservando así intacta su estructura.



Figura 3.6: Cortadora de disco abrasivo de probetas en frío.

- **Desbaste de rebabas:** Puede ser realizado con una lima o esmeril, eliminando las rebabas que quedan por efectos del corte con la finalidad de evitar lastimaduras en quien realice la prueba y también para evitar que estas puedan desgarrar las lijas que a continuación se emplean.



Figura 3.7: Desbaste de rebaba con piedra de esmeril.

- **Pulido secuencial con lijas de tamiz 120, 240, 400 y 600 en frío:** Empleando lijadoras mecánicas o manuales, se pule progresivamente la superficie a estudiar, con el fin de eliminar todo tipo de rayaduras e imperfecciones del corte.



Figura 3.8: Secuencia de pulido mecánico y manual.

- **Pulido con pasta de diamante y con alúmina:** Estos son los pulidos que permiten llegar a un acabado tipo espejo, gracias al cual se puede observar con claridad el tamaño y tipo de grano, distribución o arreglo y la presencia de impurezas o imperfecciones en el material.



Figura 3.9: Materiales, equipos y proceso de pulido espejo.

- **Brillado con disco de seda:** Este último paso no mejora el acabado, pero elimina rastros de huellas dactilares, grasa o cualquier impureza de la superficie, lo que da la apariencia especular al metal, facilitando su observación.



Figura 3.10: Equipo para brillado con disco de seda.

Una vez pulidas las superficies, se escogen varios puntos para el estudio metalográfico en función de la geometría del componente, con el fin de determinar las diferencias de la microestructura debido al enfriamiento más rápido o lento, dependiendo de la cercanía a los límites de la sección, teniéndose los siguientes puntos como críticos:

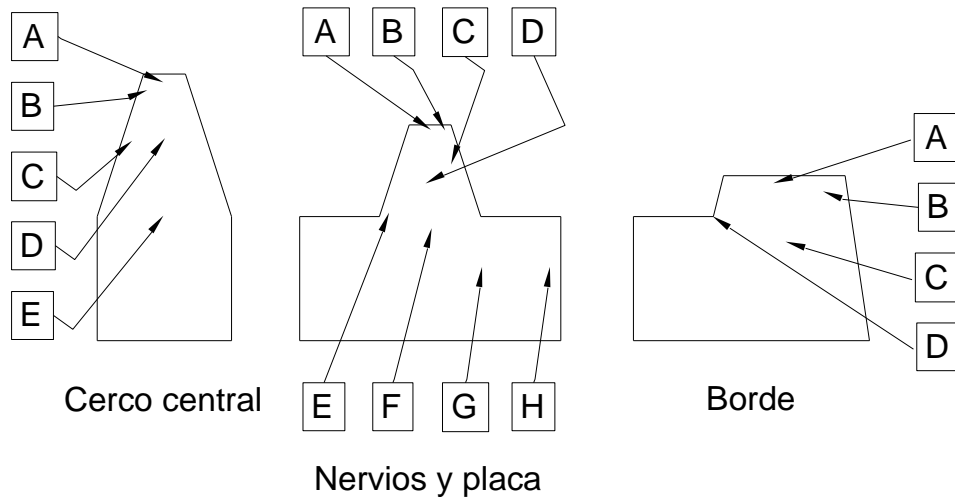


Figura 3.11: Puntos de estudio para ensayos metalográficos.

Previamente al ataque químico con Nital al 3%, se realiza un primer análisis de las superficies con la finalidad de obtener muestras de tanto del grafito como de la matriz del metal. Empleando un microscopio con un aumento máximo de 400x, se obtuvieron las siguientes microfotografías:

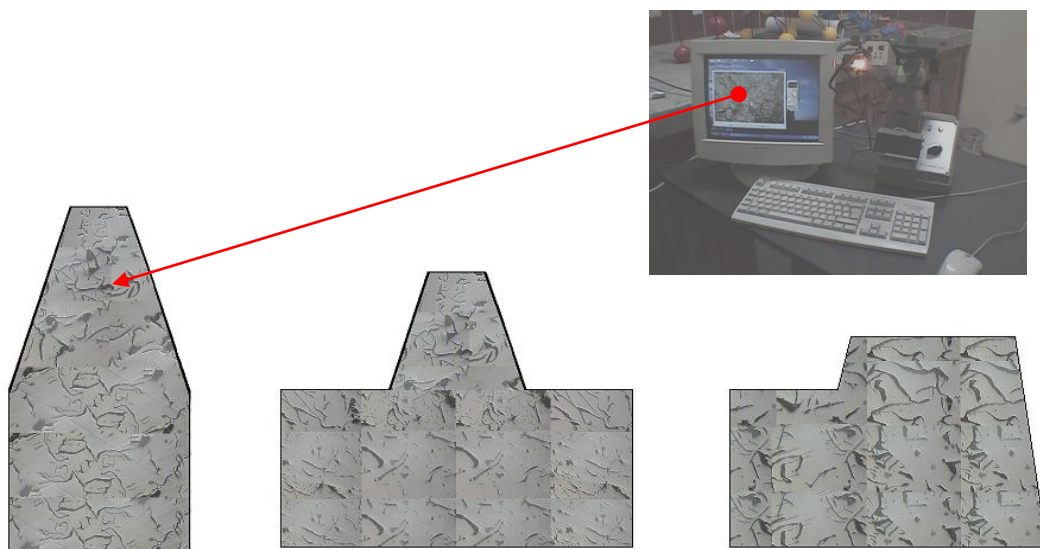


Figura 3.12: Microfotografías del análisis de tamaño, tipo y distribución del grafito.

Con este ensayo se puede apreciar únicamente la cantidad, el tipo y la distribución del grafito presente en el material.

Se observa en la distribución y forma de las hojuelas de grafito son coincidentes en su mayoría con las del tipo A o C del estándar de la ASTM indicado en la figura 2.3. Se observa que en los puntos superiores de las probetas del cerco central (CC), puntos [A], [B], o de nervios y placa (NP), puntos [A], [B], [C], se tiene mayoritariamente un arreglo del tipo A, esto es hojuelas de distribución uniforme y orientación aleatorio, mientras en el centro de estas y en la totalidad de la probeta del borde (BO) se tiene en su mayoría del tipo C, esto es hojuelas de tamaño superimpuesto y orientación aleatoria.

Empleando el programa CLEMEX VISION Professional Edition V. 3.5, puede determinarse estadísticamente la cantidad de grafito y de material matriz, empleando para ello la rutina 163, para posteriormente se realizar el ataque químico a las superficies con la finalidad de poder distinguir las diferentes estructuras metálicas que en su mayoría son perlita, cementita o ferrita.

Probeta	Punto	Grafito		Cementita %	Perlita %	Ferrita %	Tamaño de grano [μm]
		Longitud [μm]	%				
Cerco central [CC]	A	129,1	16,0	9,0	23,6	48,2	9,7
	B	110,2	12,5	7,2	23,0	49,2	9,5
	C	186,2	15,5	6,7	24,7	54,6	9,8
	D	171,7	17,7	4,6	21,8	58,5	9,7
	E	179,1	18,1	4,7	19,0	62,4	9,9
Nervios y Placa [NP]	A	82,5	12,1	10,1	15,9	61,9	9,7
	B	94,0	14,7	8,7	14,9	65,3	9,7
	C	136,6	12,8	6,1	35,1	44,9	9,8
	D	149,4	17,7	4,1	30,8	45,9	9,8
	E	193,2	16,9	8,0	26,5	46,9	9,8
	F	106,2	15,0	6,6	41,5	40,1	9,9
	G	99,6	18,4	5,8	37,9	43,3	10,2
	H	122,0	14,6	6,0	34,2	46,6	9,8
Borde [BO]	A	91,3	19,2	4,8	25,2	50,8	9,8
	B	106,9	16,9	4,7	36,0	40,6	10,1
	C	132,3	18,9	4,7	46,9	30,1	10,8
	D	168,1	19,7	8,8	47,7	30,7	9,6

Tabla 3.4: Resultados ensayo metalográfico.

Como se aprecia en la tabla anterior y en función de la figura 3.11, existe un comportamiento diferente del material constitutivo de la tapa en los diferentes puntos de estudio especialmente en los sectores cercanos a los bordes o paredes que entran en contacto con el molde durante la fundición; estos cambios se ven reflejados en una reducción del tamaño de grano, reducción de la longitud de las hojuelas de grafito, e incremento de cementita. Este fenómeno es especialmente notorio en las probetas pertenecientes al cerco central y al de las nervaduras, no así en las probetas del borde, debido a que en este componente de la tapa existe una masiva cantidad de material caliente el momento de la fundición, lo que probablemente mantiene la temperatura de enfriamiento elevado durante un mayor tiempo lo que conlleva a que se pueda obtener un material más homogéneo en cuanto a su estructura.

Sin embargo en las esquinas del molde, o donde este presenta aristas, son puntos en donde al parecer se da un enfriamiento drástico durante la colada, puntos como el [E] de la probeta NE o el punto [D] de la probeta BO. Teniéndose en ellos una estructura muy similar o inclusive más crítica que la encontrada en los límites de la fundición o en puntos donde el espesor de la pieza es muy delgada, por lo que es una consideración importante a tomarse durante el diseño por fundición con hierro gris clase 40.

Para poder tener una idea de la influencia que puede tener la metalografía del material, se comparó estos resultados con los de un patrón generado para el tema de tesis *“Caracterización del hierro fundido producido por Metalúrgica Andina y Proyecto de Norma ecuatoriana de caracterización de hierro”*, publicada en julio del 2004 por el Ing. Gonzalo Mora, el cual tiene la siguiente configuración:



Figura 3.13: Fuente: Caracterización del hierro fundido producido por Metalúrgica Andina y Proyecto de Norma ecuatoriana de caracterización de hierro, julio 2004, Gonzalo Mora, Fotografía 4.1.

Cada uno de los escalones de esta fundición es una microfotografía del material fundido con varios espesores, siendo el primero proveniente de una placa de 3 [mm] de espesor. En esta se observa una considerable cantidad de cementita, una casi inexistente presencia de grafito y grano muy fino. Por más que la muestra provenga de una colada de fundición gris clase 40, el rápido enfriamiento provoca la formación de fundición blanca (martencita). A medida que se incrementa el espesor de la placa, como en el caso de los escalones 2, de 5 [mm] y 3 de 7 [mm], se observa una reducción de la cementita, la aparición de grafito, perlita y ferrita en menor grado, a esta estructura se la denomina atruchada; mientras que en el último escalón, proveniente de una placa de 19 [mm] de espesor, se encuentra la fundición gris clase 40 de la que originalmente fue la colada.

Comparando, se determina que en los puntos críticos de la tapa se encuentra una estructura semejante al segundo o tercer escalón mientras que en el resto de la tapa toma la forma del cuarto escalón.

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN

4.1 MODELAMIENTO.

Tras ingresar la geometría media obtenida en la caracterización, se digitaliza la tapa en el software SOLIDWORKS 2005, teniéndose en cuenta las siguientes consideraciones:

Dibujar por separado cada uno de los componentes de la tapa, con la finalidad de poder asignar a cada una las características del material determinadas en los ensayos del capítulo anterior.

Se deberá realizar un ensamble de todos los componentes con la opción de unión de nodo a nodo, con lo que se simula al conjunto como una única pieza con diferentes materiales, para lo cual:

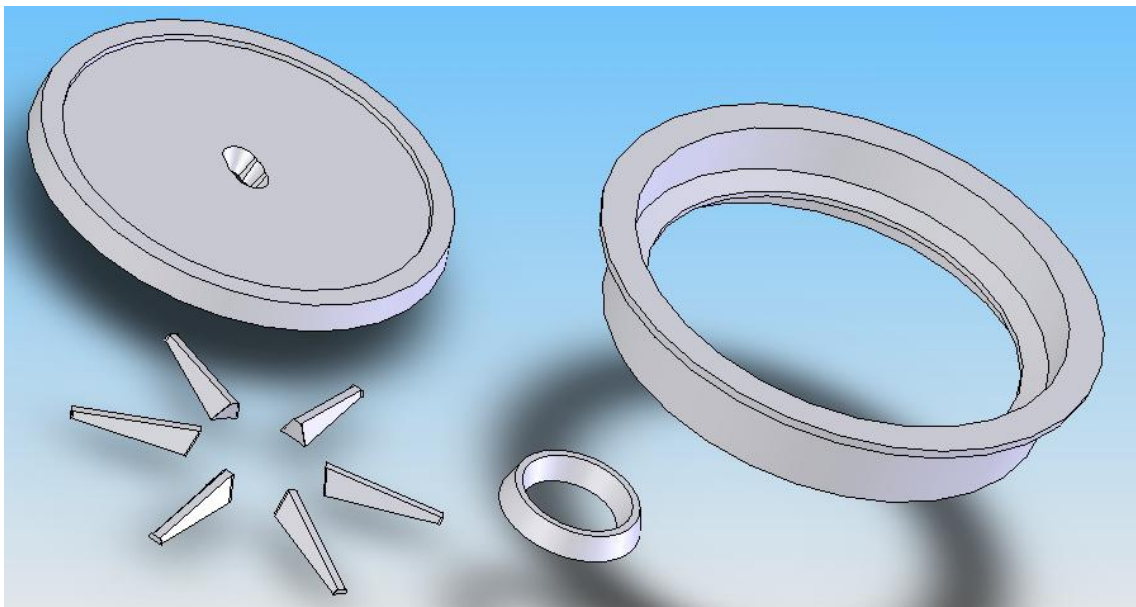


Figura 4.1: Despiece en tres componentes de la tapa, placa, nervios, cerco central y cerco base.

4.2 ESTADO DE CARGAS

En la simulación se intentará recrear de la manera más fiel los ensayos que se realizarán en el laboratorio, por lo que ha de basarse en las características del equipo e instrumentos con los que se cuenta. También tomaremos como referencia los ensayos que se realizan en la actualidad a estos elementos. Siendo así, nos referiremos a una normativa impuesta por la Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable Quito (EMAAP-Q) a sus proveedores, la norma CAPRE – ANDESAPA 026 – 1997, la misma que exige el siguiente procedimiento:

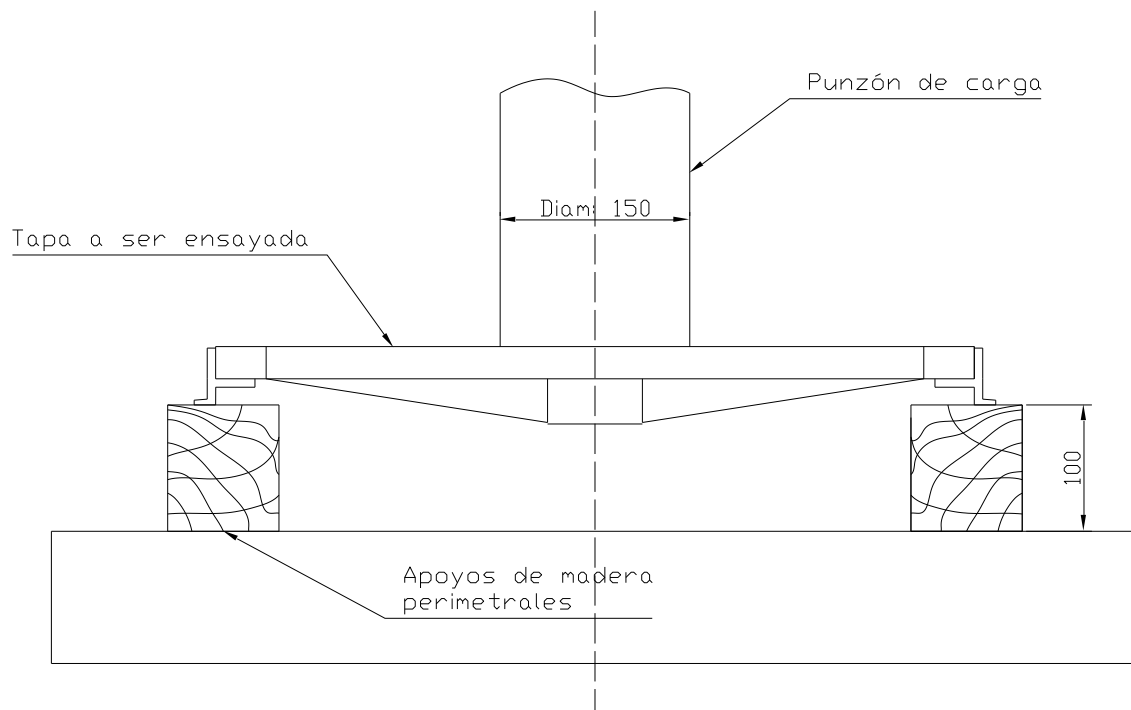


Figura 4.2: Disposición del ensayo para la capacidad de carga a flexión de juegos de alcantarillado. Norma CAPRE – ANDESAPA 026 – 1997.

Esta norma indica que se debe realizar un ensayo con un punzón de 150 mm de diámetro sobre la superficie superior de la tapa, la que debe de estar correctamente colocada en el cerco, el que se asienta sobre bloques de madera, en pro de una distribución de la carga más homogénea en cada elemento a probar.

El punzón no debe entrar en contacto directo con la superficie de la tapa, pues puede generar, debido a irregularidades en la superficie de la misma, puntos con exceso de carga, lo que provocaría que esta falle de manera prematura, obteniéndose una lectura errónea de la resistencia del conjunto, por lo que entre la tapa y la sección del punzón debe interponerse un bloque de madera o caucho, a más de una cama de arena.

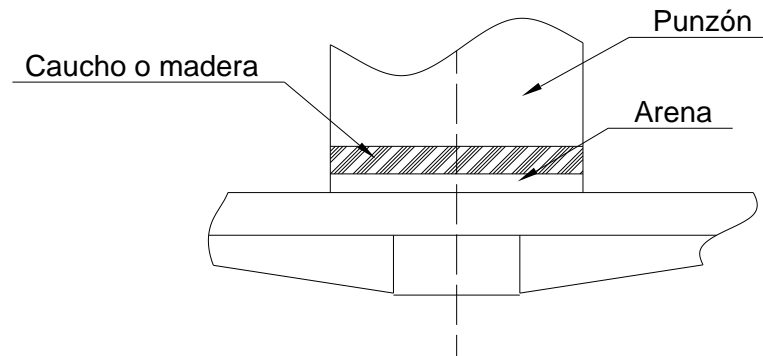


Figura 4.3: Disposición del punzón para el ensayo para la capacidad de carga a la flexión de juegos de alcantarillado. Norma CAPRE – ANDESAPA 026 – 1997.

Gracias a la aplicación de la carga de prueba, tendríamos la siguiente distribución de las cargas:

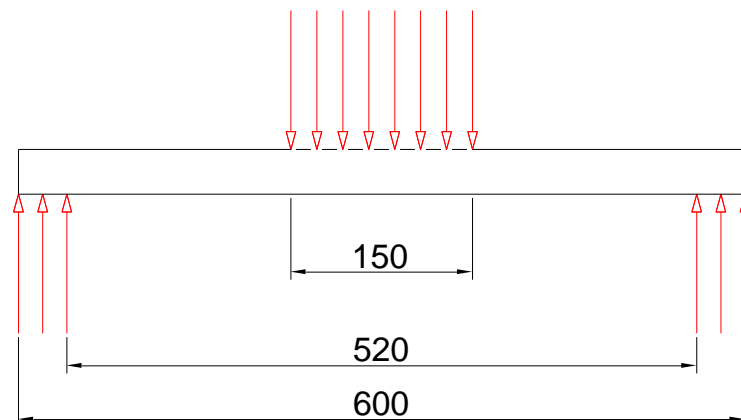


Figura 4.4: Diagrama de cuerpo libre de tapa de alcantarilla.

Tanto la carga que se está aplicando en la superficie superior de la tapa como las reacciones aplicadas en el anillo externo, que entra en contacto con

el cerco, se consideran uniformemente repartidos, debido a la presencia tanto del bloque de caucho o madera antes mencionado como por la cama de arena, descartándose así otros tipos de cargas como la puntual o una no uniformemente repartida.

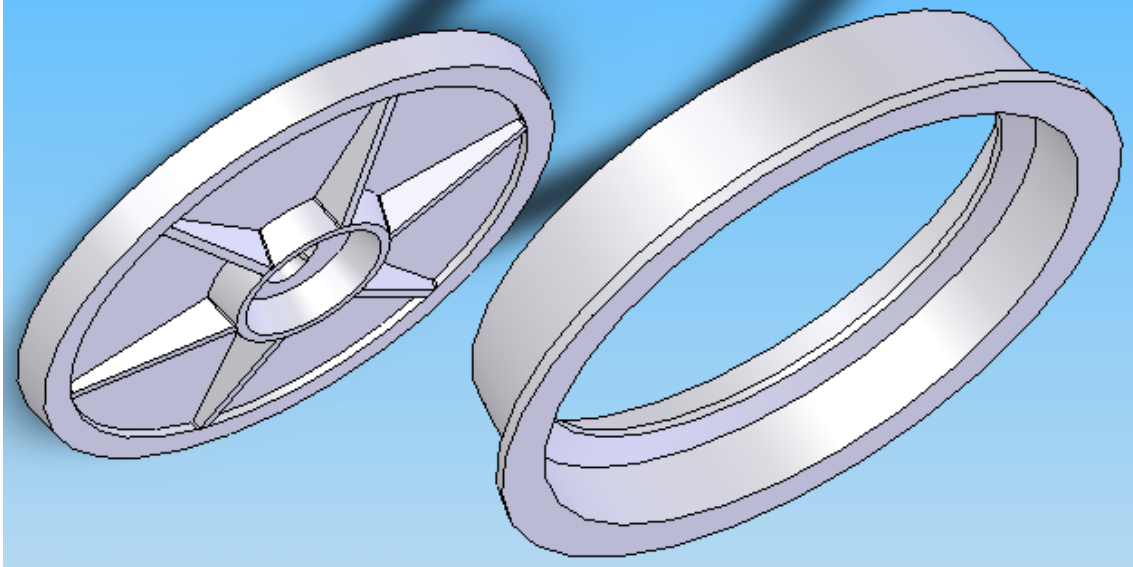


Figura 4.5: Ensamble de la tapa de inspección sobre su cerco.

4.3 SIMULACIÓN.

Tras realizar el ensamble de los componentes digitalizados de la tapa en el computador, se asigna el material correspondiente a cada uno para posteriormente realizar el estudio en COSMOSWORKS, bajo el siguiente protocolo de prueba:

- Definición del tipo de estudio a realizarse, estático, debido a que la carga en el laboratorio será gradual y no será variante en el tiempo.
- Selección de un tipo de mallado, sólido, debido a que en su geometría no es laminar sino de volumen.
- Imposición de cargas y restricciones al modelo.
 - Restricciones: La única restricción que tiene el elemento tapa está ubicado en la superficie inferior del borde, generado por una reacción normal con la superficie del cerco el cual estará limitado por una restricción fija.

- Cargas: Se aplicará una carga de 16 [Tm] en una superficie circular de 150 [mm] de diámetro, en la cara superior del elemento tapa, según lo indicado por el procedimiento habitual de testeo de juegos de alcantarillado para la EMAP-Q. Esta carga se variará hasta conseguir un factor de seguridad, FDS, semejante a la unidad con lo que se determinará su resistencia de diseño.
- Selección de un criterio de diseño basado en las características del material del elemento tal como se menciona en el capítulo 2, subcapítulo “Criterios de análisis de esfuerzos en COSMOSWORKS SPo 2005 Profesional”, el más adecuado para la fundición gris es el de Mohr-Coulomb.

No son de influencia significativa las variaciones de temperatura, ya que difícilmente en el medio geográfico en el que operarán, existen variaciones de menores de 50 °C con una mínima de 0°, rangos en los que la estructura cristalina del material y su química no son afectados, así como las contracciones o dilaciones térmicas son mínimas.

4.4 PUNTOS CRÍTICOS Y RESULTADOS.

El estudio refleja el comportamiento de las tapas en cada una de las secciones con gran detalle, e indica que existe una elevada concentración de esfuerzos en el sector del cerco central donde además se encuentra el material con peores características, por lo que resulta obvia la deducción de que es en este punto donde comenzará a fallar la estructura de la tapa. Al simular una carga de de 16 [Tm], el programa arroja un factor de seguridad de 0.874, lo que indica que no cumple con las condiciones esperadas de resistencia.

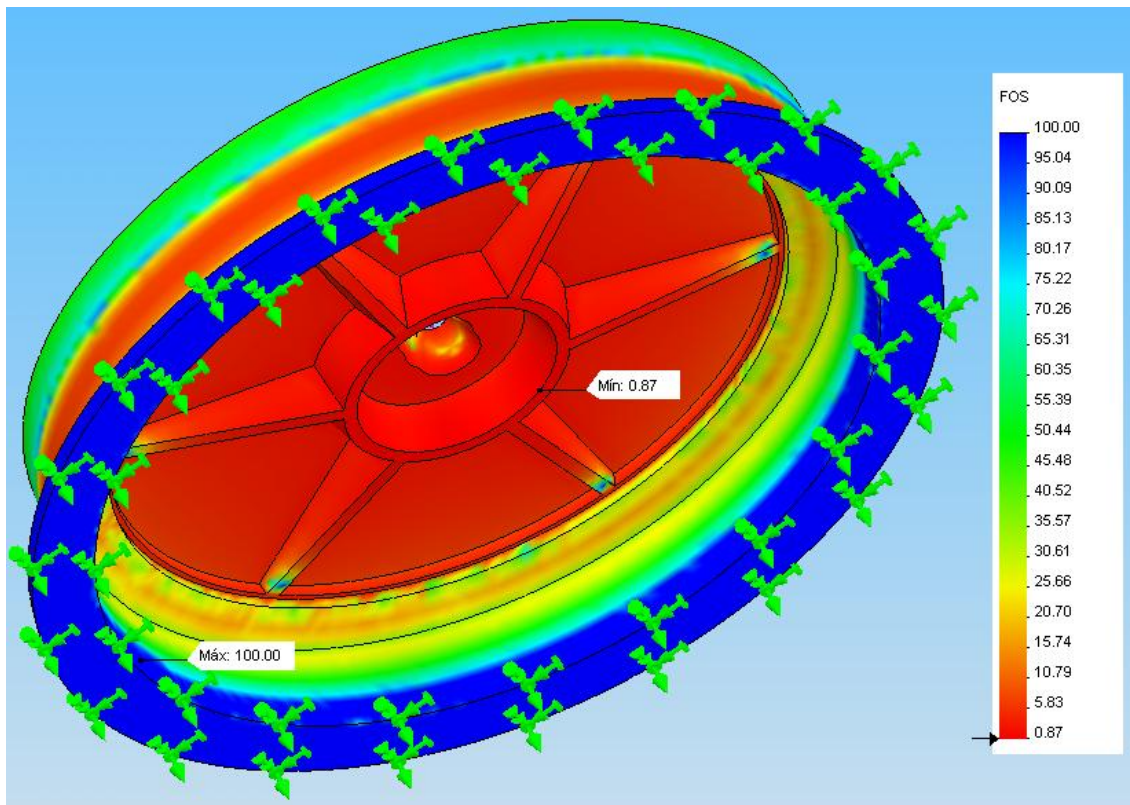


Figura 4.6: Distribución del factor de diseño para una carga de 16 [Tm].

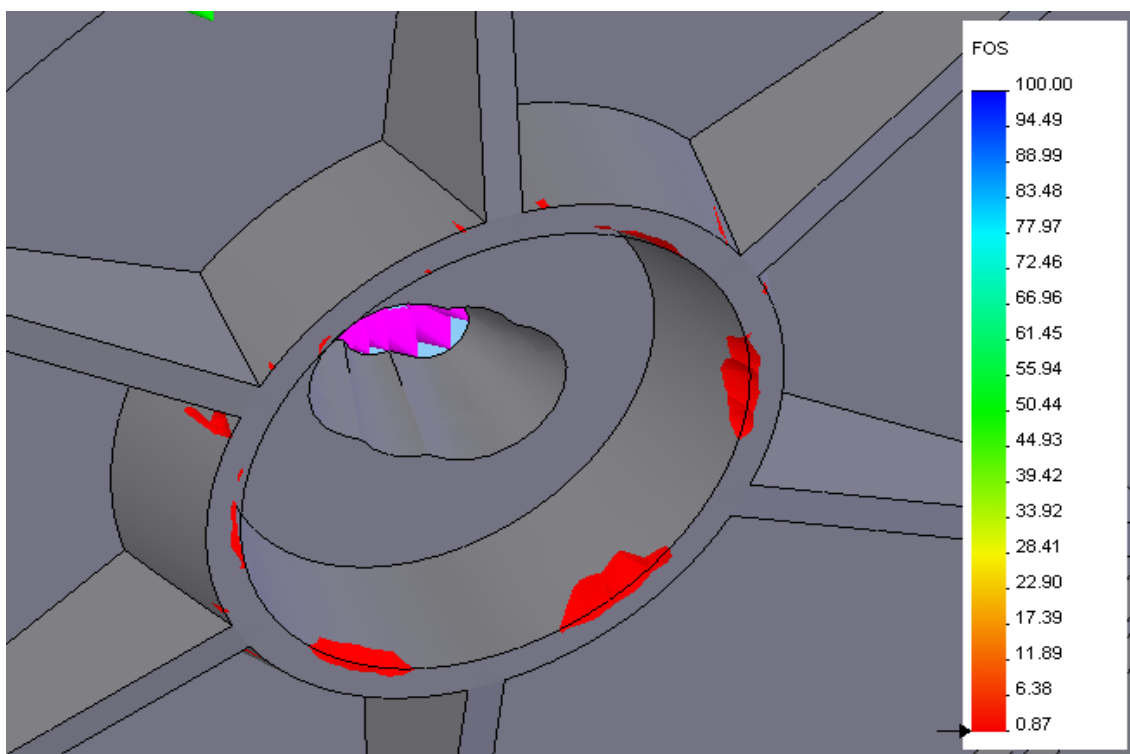


Figura 4.7: Isovalor de sectores en los que el FDS = 1 para una carga de 16 [Tm].

Posteriormente se varía la carga hasta determinar un $FDS \approx 1$, siendo esta de 137.138 [N], lo que equivale a 13,984 [Tm], valor 12,6% inferior a la norma exigida.

Para tener una referencia del impacto que tiene la caída de la resistencia a la tracción del material, se ha simulado también una tapa con clase 40 y comportamiento homogéneo, obteniéndose para una carga de 16 [Tm] un $FDS = 1,24$, lo que en referencia al ensayo anterior significa un incremento de 0,366 en el factor de seguridad lo que equivale a un 41,3% más de resistencia de la tapa.

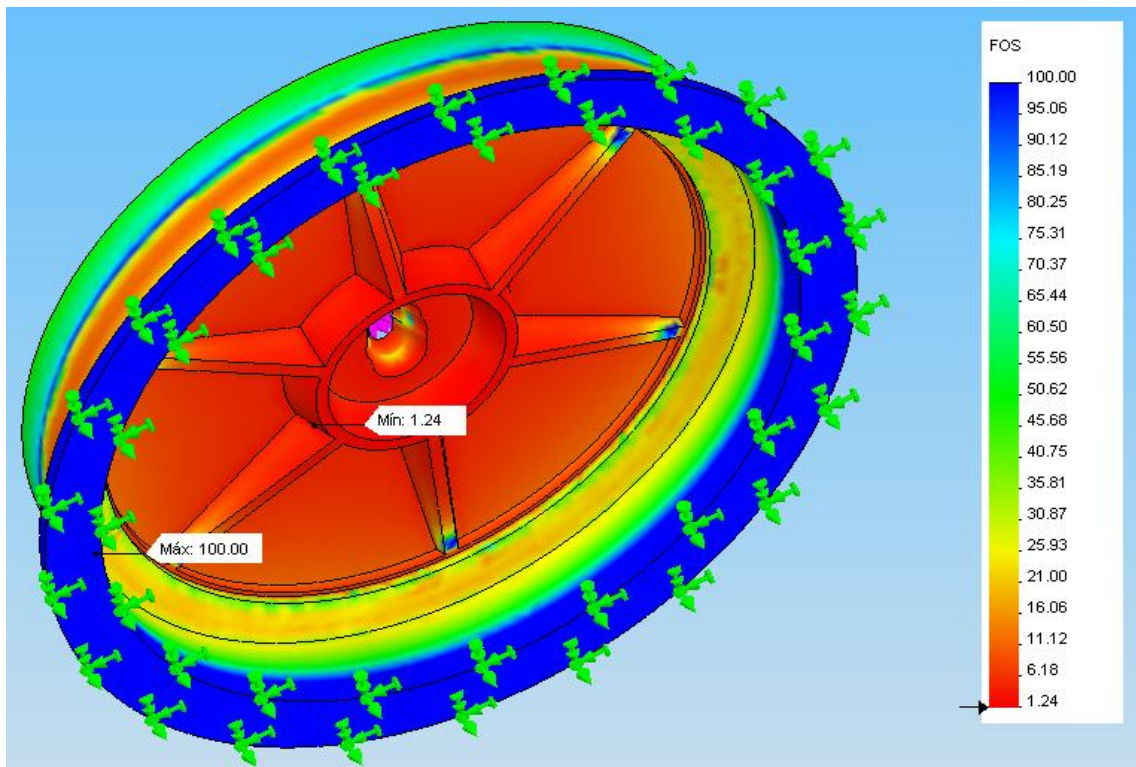


Figura 4.8: Resultado de estudio en COSMOSWorks Spo 2005 de para material homogéneo promedio obtenido cargado con 16 [Tm].

Como se observa en la figura 4.7, los puntos más críticos en la estructura de la tapa se encuentran en el cerco central, y dentro de este, en dos lugares específicos, en el borde superior de la cara interior entre las nervaduras y en la unión del cerco con las nervaduras. En estos puntos es donde existe una mayor deformación debido a que la carga, al ser aplicada en

la superficie superior de la tapa y por la presencia de las nervaduras, provoca que este elemento tienda a adquirir una forma hexagonal.

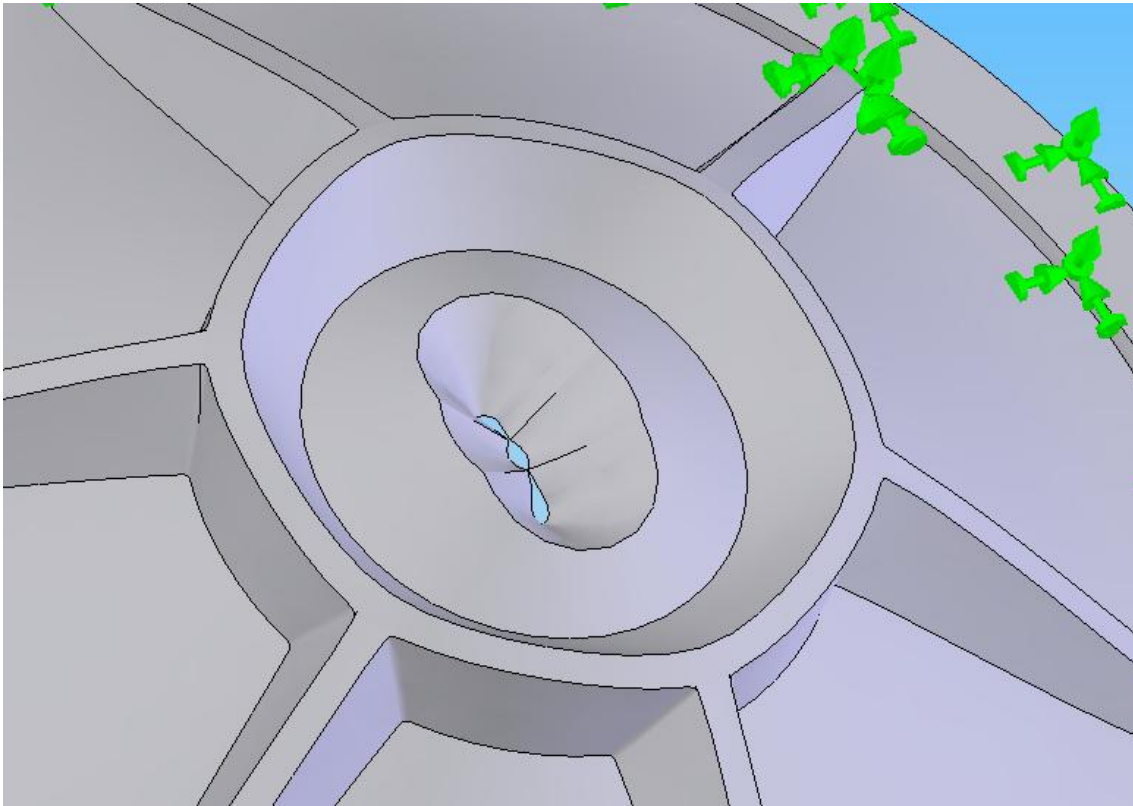


Figura 4.9: Deformación del cerco central, carga de 16 [Tm], deformación definido en exceso 100 veces.

En el resto de la tapa no se presentan lugares críticos que merezcan un estudio más profundo que el realizado, por lo que en el siguiente capítulo el estudio se enfocará en exclusivamente en estos dos puntos.

CAPÍTULO 5

COMPORTAMIENTO MECÁNICO UTILIZANDO STRAIN GAUGES

5.1 ANÁLISIS DE CARGAS Y APOYOS.

El ensayo ha de realizarse tomando en cuenta las características y limitaciones de los equipos disponibles en el Laboratorio de Resistencia de Materiales.

Para poder llevar a cabo el ensayo es necesario que el equipo tenga un desplazamiento axial del cabezal desde arriba porque se van a ensayar dos elementos de dimensiones considerables que no deben estar firmemente unidos. Por este motivo se ha de emplear el equipo para ensayos a fatiga de baja frecuencia marca AMSLER.

Debe de tomarse en cuenta que la máquina no cuenta con una superficie plana en su zona inferior, por lo que es necesario el momento de la simulación el considerar la geometría sobre la cual se apoyará el cerco.

Una vez instalada la tapa en su sitio, se dispondrá de una cama de arena de por lo menos 20 [mm] de espesor y sobre esta un bloque de madera cilíndrico de 150 [mm] de diámetro por 40 [mm] de altura, sobre el cual se aplicará la carga de prueba con el punzón del equipo.

El equipo será calibrado para realizar tres ensayos y se realizarán tres pruebas de cada uno. Estos ensayos consistirán en aplicar una carga de 1.5, 3 y 4.5 [Tm] cada uno para con los deformímetros, ubicados en los puntos críticos determinados en el capítulo anterior, medir el esfuerzo que resisten los componentes de la tapa y cotejar estos resultados con lo determinado en el computador.

5.2 EQUIPOS E INSTRUMENTOS A UTILIZAR.

Se requiere de la utilización de un equipo que permita aplicar una carga de 9 [Tm] en la forma antes descrita, y en el Laboratorio de Resistencia de Materiales se cuenta con el Vibroforo de Baja Frecuencia 417U marca Amsler, que tiene las siguientes características:

Hoja técnica de equipo de laboratorio

Modelo/Marca:	<u>Vibroforo de Baja Frecuencia 417U, AMSLER</u>
Procedencia:	<u>Shaffhausen, Suiza</u>
Fecha fabricación:	<u>1972</u>
Descripción:	<u>Equipo para ensayos de fatiga en baja frecuencia</u>
Capacidad:	<u>Ensayo estático, carga máxima: 10 [Tm]</u> <u>Ensayo dinámico, carga máxima: 10 [Tm]</u>
Requerimientos:	<u>220 [V], 3 fases, Pot 8 1/2 [Hp]</u>
Observaciones:	<u>El equipo no cuenta con plataforma plana para la realización del ensayo según lo indicado en el procedimiento de prueba.</u>

Tabla 5.1: Hoja técnica, Vibroforo de baja frecuencia AMSLER.



Figura. 5.1: Vibroforo de baja frecuencia AMSLER.

También de los siguientes instrumentos:

- Rosetas de deformación marca HBM, de 120 [Ω], con un factor de galga de 1.94 que opera a 2 [V].
- Equipo para medición de deformaciones unitarias marca OMEGA, modelo DMD-22
- Comparadores de reloj para determinar la flexión del centro de la tapa.

5.3 COLOCACIÓN DE LA ROSETA DE DEFORMACIÓN.

Este paso es uno de los más importantes del ensayo pues se necesita mucha precisión en la colocación de los deformímetros sobre los puntos críticos. Tomando en cuenta que estos tienen forma cuadrangular, la orientación es muy importante para que coincida con la disposición de la roseta en función de la posición.

Otra de las limitaciones que se tiene es que los deformímetros deben estar situados en superficies lisas preferentemente planas o cilíndricas, mas no sobre aristas o superficies esféricas. También es importante el tamaño que estas tienen y el que deben ser instaladas con su centro sobre el punto deseado de estudio.

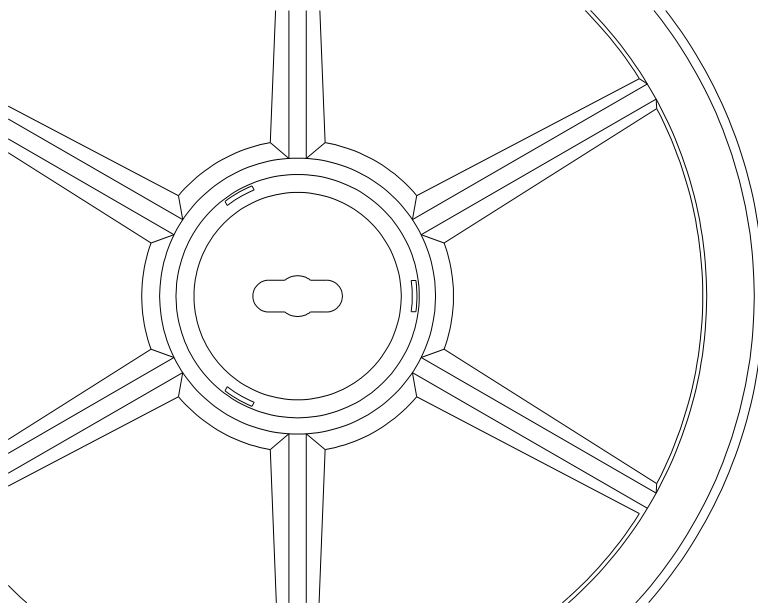


Figura 5.2: Posiciones de deformímetros en superficie del cerco central.

5.4 MEDICIÓN DE ESFUERZOS, DEFORMACIONES UNITARIAS Y DEFLEXIONES.

Una vez instalados dos sensores en los puntos determinados anteriormente, se sueldan las terminales de estos para conectarlos al equipo de medición de deformaciones unitarias.

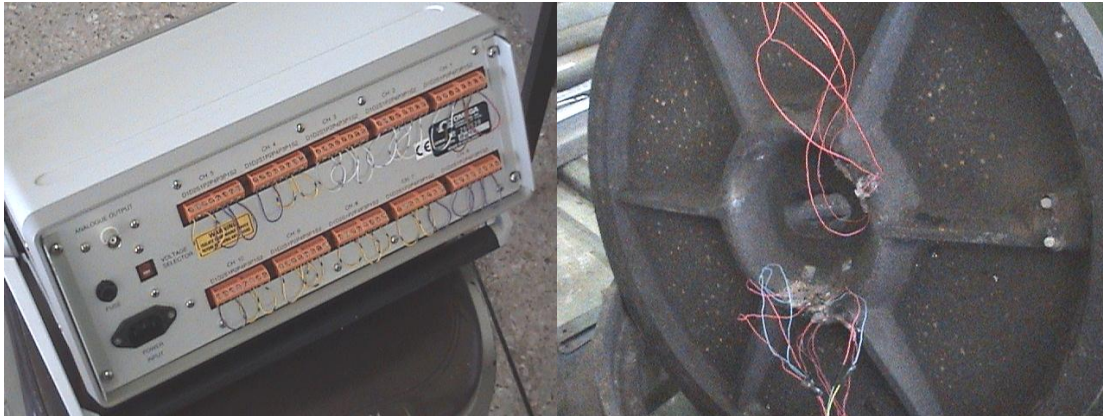


Figura 5.3: Sensores y equipo para medición de deformaciones unitarias.

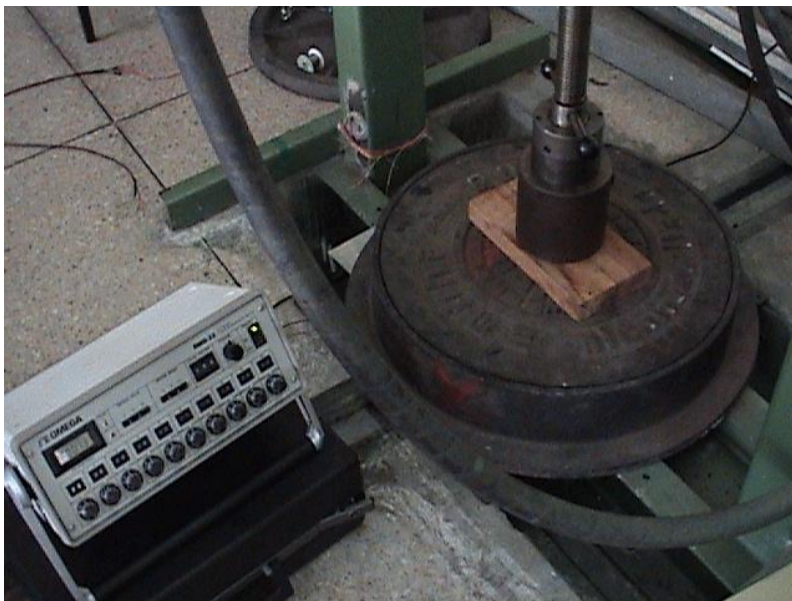


Figura 5.4: Disposición de equipo y elementos de prueba.

Al realizar el ensayo con la consideración de que las cargas no sean comprometedoras a la estructura de la tapa, para evitar un daño en los sensores, se obtuvieron los siguientes resultados:

RESULTADOS DE ENSAYOS CON ROSETA DE DEFORMACIÓN

% de carga	Carga [Tm]	Fuerza [N]	Roseta # 1								
			Δa	ϵ_a	Δb	ϵ_b	Δc	ϵ_c	ϵ_x	ϵ_y	γ_{xy}
0	0	0	0		-1,00E-06		0				
15	1,5	14700	2,15E-04	2,15E-04	7,00E-05	7,10E-05	6,00E-05	6,00E-05	2,15E-04	-8,40E-05	-1,10E-05
30	3	29400	4,83E-04	4,83E-04	1,61E-04	1,62E-04	1,33E-04	1,33E-04	4,83E-04	-1,88E-04	-2,90E-05
45	4,5	44100	7,88E-04	7,88E-04	2,67E-04	2,68E-04	2,21E-04	2,21E-04	7,88E-04	-2,99E-04	-4,70E-05

% de carga	Carga [Tm]	Fuerza [N]	Roseta # 2								
			Δa	ϵ_a	Δb	ϵ_b	Δc	ϵ_c	ϵ_x	ϵ_y	γ_{xy}
0	0	0	2,00E-06		0		0				
15	1,5	14700	2,19E-04	2,17E-04	6,80E-05	6,80E-05	7,20E-05	7,20E-05	2,17E-04	-7,69E-05	4,00E-06
30	3	29400	4,60E-04	4,58E-04	1,49E-04	1,49E-04	1,56E-04	1,56E-04	4,58E-04	-1,53E-04	7,00E-06
45	4,5	44100	7,26E-04	7,24E-04	2,43E-04	2,43E-04	2,66E-04	2,66E-04	7,24E-04	-2,15E-04	2,30E-05

Tabla 5.2: Datos de deformaciones unitarias reales.

La determinación de las deformaciones unitarias respecto de los ejes X-Y de la roseta de deformación se realizó tomando en cuenta la geometría de la misma:

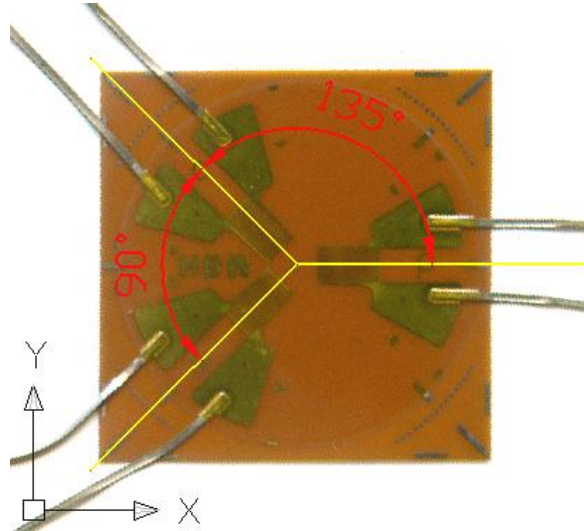


Figura 5.5: Disposición geométrica de galgas de roseta de deformación.

Con la aplicación de las ecuaciones de transformación de deformaciones unitarias:

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos(2\theta_n) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin(2\theta_n) \quad \text{ec.: 5.1}$$

Simplificando:

$$\varepsilon_n = \cos^2(\theta_n)\varepsilon_x + \sin^2(\theta_n)\varepsilon_y + \gamma_{xy} \sin(\theta_n)\cos(\theta_n) \quad \text{ec.: 5.2}$$

Y en función de $\varepsilon_a, \varepsilon_b$ y ε_c , se determinan los valores de $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ y γ_{xy} , teniéndose el sistema de ecuaciones:

$$\varepsilon_a = \cos^2(\theta_a)\varepsilon_x + \sin^2(\theta_a)\varepsilon_y + \gamma_{xy} \sin(\theta_a)\cos(\theta_a)$$

$$\varepsilon_b = \cos^2(\theta_b)\varepsilon_x + \sin^2(\theta_b)\varepsilon_y + \gamma_{xy} \sin(\theta_b)\cos(\theta_b)$$

$$\varepsilon_c = \cos^2(\theta_c)\varepsilon_x + \sin^2(\theta_c)\varepsilon_y + \gamma_{xy} \sin(\theta_c)\cos(\theta_c)$$

Donde:

$$\theta_a = 0^\circ$$

$$\theta_b = 135^\circ$$

$$\theta_c = 225^\circ$$

Sustituyendo y despejando:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 \quad \text{ec.: 5.3}$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_b + \varepsilon_c - \varepsilon_a \quad \text{ec.: 5.4}$$

$$\gamma_{xy} = \varepsilon_c - \varepsilon_b \quad \text{ec.: 5.5}$$

Para con ellos encontrar los esfuerzos normales según los ejes de referencia σ_x, σ_y y el cortante τ_{xy} al sustituir en las ecuaciones de la ley de Hook del estado plano de esfuerzos:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) \quad \text{ec.: 5.6}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) \quad \text{ec.: 5.7}$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad \text{ec.: 5.8}$$

Donde G es el módulo de elasticidad por cortante o módulo de rigidez.:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad \text{ec.: 5.9}$$

Para posteriormente determinar los esfuerzos normales principales σ_1, σ_2 y el cortante máximo τ_{\max} aplicando para ello el círculo de Mohr:

Donde:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{ec.: 5.10}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{ec.: 5.11}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{ec.: 5.12}$$

Para finalmente obtenerse la siguiente tabla de esfuerzos principales, que posteriormente serán cotejados con los resultados de la simulación en COSMOSWORKS SPo 2005.

ESFUERZOS PRINCIPALES REALES

% de carga	Roseta # 1					
	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	τ_{xy} [MPa]	τ_{max} [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]
15	1,37E+07	-2,00E+06	-2,89E+05	7,86E+06	1,37E+07	-2,00E+06
30	3,08E+07	-4,42E+06	-7,62E+05	1,76E+07	3,08E+07	-4,43E+06
45	5,05E+07	-6,71E+06	-1,23E+06	2,86E+07	5,05E+07	-6,73E+06

% de carga	Roseta # 2					
	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	τ_{xy} [MPa]	τ_{max} [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]
15	1,40E+07	-1,46E+06	1,05E+05	7,72E+06	1,40E+07	-1,46E+06
30	2,97E+07	-2,40E+06	1,84E+05	1,60E+07	2,97E+07	-2,40E+06
45	4,74E+07	-1,90E+06	6,04E+05	2,47E+07	4,74E+07	-1,91E+06

Tabla 5.3: Esfuerzos principales determinados por roseta de deformación.

Módulo de elasticidad:

$$E = 6,62E+10 \quad [\text{N/m}^2]$$

Coef. Poisson:

$$\mu = 0,26$$

Módulo de rigidez:

$$G = 2,626E+10 \quad [\text{N/m}^2]$$

Tabla 5.4: Módulo de elasticidad, Coeficiente de Poisson, Módulo de rigidez⁷.

Tanto los valores del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson son los mismos que se han empleado en la simulación del capítulo anterior y se seguirán utilizando a lo largo del proyecto.

⁷ Fuente: Caracterización del hierro fundido producido por Metalúrgica Andina y Proyecto de Norma ecuatoriana de caracterización de hierro, julio 2004, Gonzalo Mora.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

La teoría de elementos finitos implica la partición de un sólido complejo en varias partes de tamaño mínimo, lo cual facilita la realización de un estudio del todo partiendo de lo mínimo. Cuando se realizó una simulación de la tapa de pozo de inspección bajo el ambiente COSMOSWORKS SPo 2005, se obtuvieron resultados del comportamiento de esta bajo las condiciones de prueba especificadas del laboratorio, y el interés de esta acción es el llegar a determinar la correlación existente entre el ambiente teórico simulación y el real, ensayo de laboratorio.

Una gran ventaja que ofrecen los programas de diseño por elementos finitos es que presentan en un medio visual los resultados del ensayo, lo que permite identificar con facilidad cuál es la situación del sólido de prueba. En el caso específico del programa que se ha definido para este proyecto, cuenta con varias herramientas que facilitan el trabajo y la comprensión del fenómeno. Una de estas es el identificador de valores, el que puede definir el valor en los nodos de cada elemento finito manualmente seleccionado, de lo que se encuentre analizando en ese momento. Esta herramienta viene acompañada con un trazador, el cual grafica en un plano cartesiano los valores requeridos dependiendo el orden de su selección.

Esta herramienta permite, una vez realizada la simulación, determinar los valores de los esfuerzos principales para compararlos con los resultados arrojados por las rosetas de deformación. Pero al existir la restricción de que los elementos finitos son creados dependiendo de un tamaño definido y de la geometría del cuerpo, no se puede esperar que el nodo coincida con el punto céntrico de la roseta de deformación, por lo que y en pro de lograr resultados

más certeros, será necesario el tomar datos del contorno y sacar un promedio ver anexo 6.1, obteniéndose un valor del esfuerzo aproximado al real

Uno de los factores que se debe tomar en cuenta durante el diseño al emplear este método es el tamaño del elemento, y para poder determinar cuál sería el más adecuado se tomó cuatro diferentes mallados de 21, 18, 15 y 12 [mm], A la par de realizar una comparación con los datos obtenidos del ensayo en laboratorio con las rosetas de deformación, se obtuvieron resultados

COMPARACIÓN DE ESFUERZOS REALES Y SIMULADOS PARA DIFERENTES MALLAS

Roseta #1									
σ_1 [MPa]									
% de carga	Real	Malla 12 [mm]		Malla 15 [mm]		Malla 18 [mm]		Malla 21 [mm]	
		Simulado	E%	Simulado	E%	Simulado	E%	Simulado	E%
15	1,37E+07	1,57E+07	14,52	1,61E+07	17,09	1,52E+07	10,79	1,48E+07	7,61
30	3,08E+07	3,14E+07	1,96	3,01E+07	-2,19	2,98E+07	-3,18	2,95E+07	-4,19
45	5,05E+07	4,71E+07	-6,61	4,82E+07	-4,52	4,78E+07	-5,30	4,57E+07	-9,56
σ_2 [MPa]									
% de carga	Real	Malla 12 [mm]		Malla 15 [mm]		Malla 18 [mm]		Malla 21 [mm]	
		Simulado	E%	Simulado	E%	Simulado	E%	Simulado	E%
15	-2,00E+06	5,24E+05	-126,16	4,45E+05	-122,20	4,72E+05	-123,56	2,69E+05	-113,46
30	-4,43E+06	1,05E+06	-123,64	8,41E+05	-118,96	9,43E+05	-121,28	6,82E+05	-115,37
45	-6,73E+06	1,47E+06	-121,79	1,36E+06	-120,14	1,31E+06	-119,46	1,02E+06	-115,18

Tabla 6.1: Resultados promedio de los dos esfuerzos principales de la primera roseta de deformación, determinados en la simulación por COSMOSWORKS SPo 2005.

COMPARACIÓN DE ESFUERZOS REALES Y SIMULADOS PARA DIFERENTES MALLAS

Roseta #2									
σ_1 [MPa]									
% de carga	Real	Malla 12 [mm]		Malla 15 [mm]		Malla 18 [mm]		Malla 21 [mm]	
		Simulado	E%	Simulado	E%	Simulado	E%	Simulado	E%
15	1,40E+07	1,54E+07	10,02	1,63E+07	16,43	1,49E+07	6,73	1,55E+07	11,17
30	2,97E+07	3,06E+07	3,16	2,96E+07	-0,32	3,04E+07	2,43	3,11E+07	4,72
45	4,74E+07	4,61E+07	-2,73	4,88E+07	2,94	4,34E+07	-8,42	4,43E+07	-6,63
σ_2 [MPa]									
% de carga	Real	Malla 12 [mm]		Malla 15 [mm]		Malla 18 [mm]		Malla 21 [mm]	
		Simulado	E%	Simulado	E%	Simulado	E%	Simulado	E%
15	-1,46E+06	4,89E+05	-133,58	4,38E+05	-130,05	4,37E+05	-130,00	3,41E+05	-123,40
30	-2,40E+06	9,78E+05	-140,78	1,00E+06	-141,73	8,74E+05	-136,43	5,39E+05	-122,46
45	-1,91E+06	1,47E+06	-177,16	1,33E+06	-169,93	1,39E+06	-172,94	8,08E+05	-142,38

Tabla 6.2: Resultados promedio de los dos esfuerzos principales de la segunda roseta de deformación, determinados en la simulación por COSMOSWORKS SPo 2005.

6.2 RETROALIMENTACIÓN.

Las tablas anteriores presentan los valores, determinados por el computador, de los dos esfuerzos principales y también la diferencia en porcentaje respecto a los esfuerzos obtenidos de manera experimental del mismo lugar.

Como se puede apreciar, los valores del primer esfuerzo principal guardan buena relación entre valores teóricos y reales. Se puede observar que al incrementar la carga aplicada sobre la tapa, el error tiene a reducirse, esto es debido a que al tratarse de un elemento real el que se está probando y como en todo ensayo de laboratorio, siempre existe un comportamiento vago hasta que el conjunto se estabiliza, un ejemplo similar a este es el de las balanzas, que para tener una medida más confiable primero se la debe “tarar”, aplicándole una precarga, tomándose como punto de partida este nuevo punto.

Según los datos se observa que es prudente, para el caso de las tapas de alcantarillado, realizar una precarga de 3 [Tm] para que los datos sean más confiables.

Si se analizan los resultados referentes al segundo esfuerzo principal, se observa que los errores son por déficit oscilantes entre 113% y 177%, esto sugiere que los esfuerzos simulados, son una proyección de los reales o viceversa. Esto es debido a que el plano de medición de los reales se encuentra sobre la superficie del cerco central mas no necesariamente se encuentran en este plano los determinados por el computador.

6.3 CONSIDERACIONES Y FACTORES DE CORRECCIÓN.

Se obtiene un resultado aceptable al emplear un tamaño de malla de 18 [mm] para las diferentes cargas aplicadas, a la par de que resulta más conveniente puesto que el cálculo emplea prácticamente la mitad del tiempo

que con un tamaño de malla de 12 [mm], lo que significa una mayor productividad al economizar tiempo de diseño pero manteniendo buenos resultados. Se prefiere una malla de 18 [mm] y no una de 21 [mm] por razón de que la dispersión de los resultados de los esfuerzos es mayor para el segundo caso.

Ahora si bien los resultados de ambos esfuerzos principales no son en todos los casos cercanos a lo obtenido del ensayo con la roseta de deformación, esto no sugiere que el programa no sea adecuado para poder llevar a cabo una simulación exitosa, porque los programas de diseño basados en elementos finitos generan y simulan un cuerpo, que en su realidad es continuo, de manera discreta, por lo que durante la simulación no son tomados en cuenta todos los grados de libertad que en realidad existen, provocando una serie de errores no muy significativos.

Los resultados también indican que ha tenido un efecto positivo el considerar al ensamble como un conjunto de piezas de diferente material en respuesta de la caracterización. Mas, en un inicio, esta caracterización puede ser evitada al contemplar la característica de sensibilidad a la sección del material. Para lograrlo, se puede realizar una división de los elementos de la tapa, cortarlos en secciones transversales y dibujar círculos tangentes a los bordes de las mismas en los puntos más críticos como en la figura 6.2; el diámetro que resulte es el que se deberá considerar para ingresar en la tabla 2.6a o 2.6b, y así emplear una resistencia a la tracción para la fundición escogida cercana a la que se obtendría de la caracterización, con lo que se esperarían tener resultados más precisos. La razón de esto radica en que en el centro del círculo tangente se puede esperar la característica media del material en esa parte de la sección.

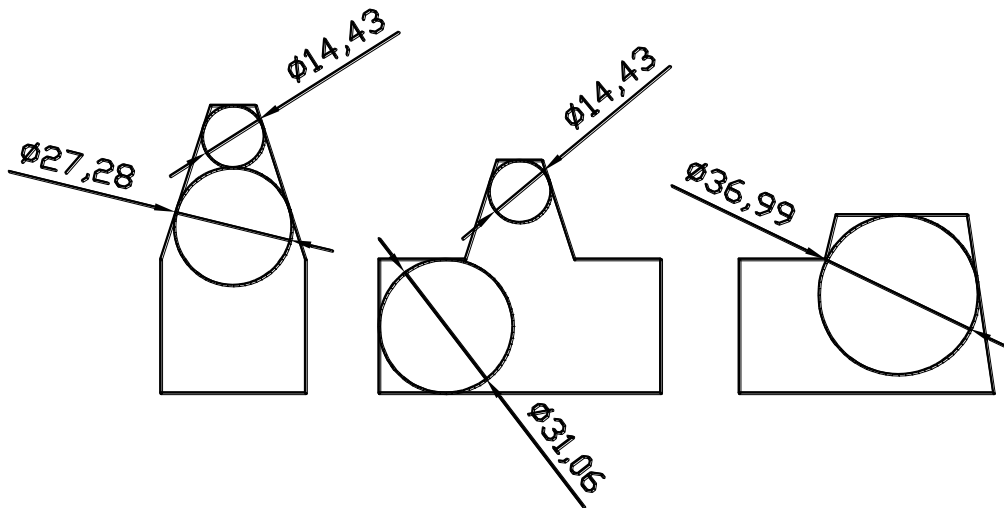


Figura 6.2: Ejemplo de diámetros para la definición de la resistencia a la tracción de fundición gris en secciones delgadas.

Los valores del gráfico anterior llevados a la tabla 2.6a indican las resistencias sugeridas para el material, siendo así:

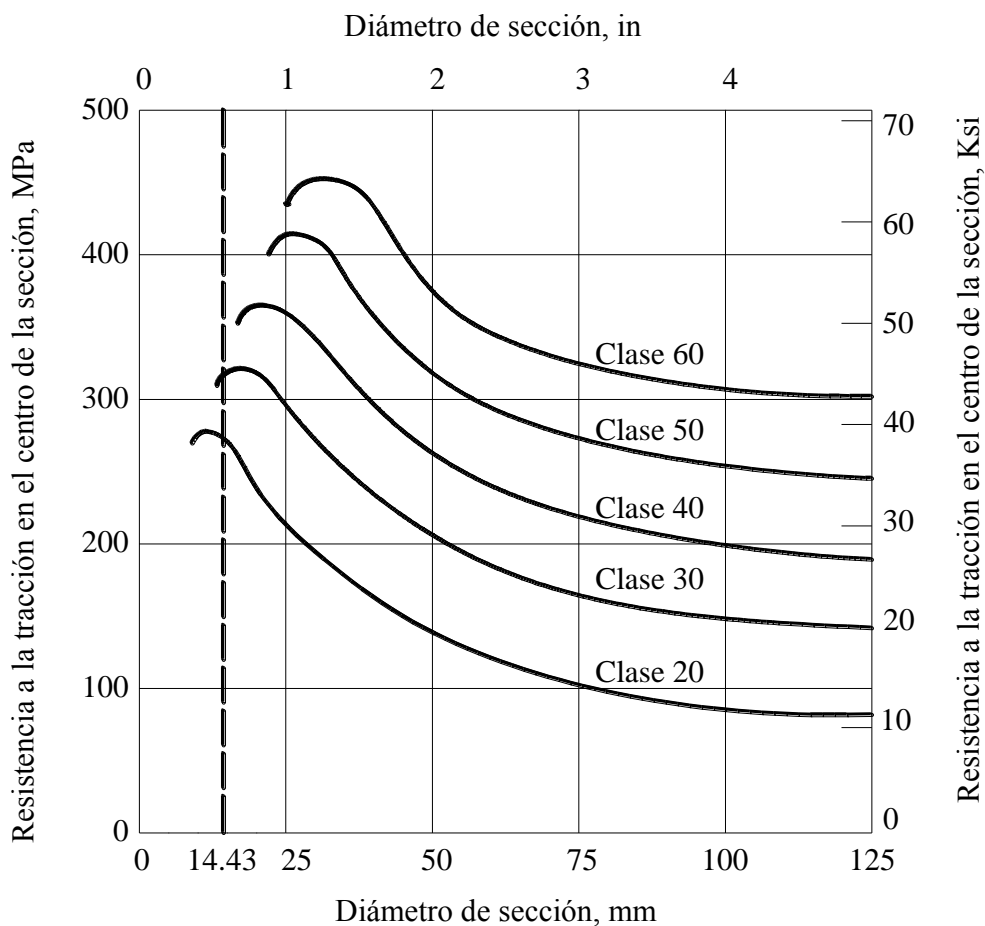


Figura 6.3: Determinación de la sensibilidad a la sección para diámetro de 14.43 [mm].

Tomando como ejemplo la fundición gris de clase 40 en un diámetro de 14.43 [mm] la resistencia a la tracción cae en un área de comportamiento irregular, lo que explica que la resistencia durante la caracterización se haya determinado en 160 [MPa].

Al considerar la resistencia esperada del material en la simulación, se puede lograr una optimización del diseño con un grado aceptable de certidumbre. Adicionalmente a esto, los modelamientos matemáticos realizan estudios discretos, esto quiere decir que no son aun capaces de determinar con todo detalle los grados de libertad que en realidad se están presentando en el sólido, que tiene un comportamiento continuo, lo que provoca que los resultados del diseño por elementos finitos son de por si conservadores, aumentándose la certidumbre de que el diseño logrará su cometido.

6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La considerable diferencia entre los datos experimentales y simulados en el segundo esfuerzo principal es debido a que en el caso del experimental, este está en el plano de la superficie sobre la que se adhirió la roseta de deformación, pero en el caso de la simulación, estos esfuerzos no necesariamente se encuentran en el mismo plano, debido a que el estudio matemático está enfocado a un estado triaxial, por lo que difícilmente se puede esperar que estos valores coincidan.

Dentro del mismo ensayo, podemos apreciar que en ciertos casos el primer esfuerzo principal simulado es muy semejante a los valores experimentales, esto quiere decir que, en la simulación, este se encuentra en el mismo plano de la superficie o al menos cercano a esta, debido a que en la definición de los puntos de estudio con la roseta de deformación, se escogieron lugares en los que el factor de seguridad es mínimo según la simulación inicial y debido a que este factor está basado en la teoría de Mohr – Coulomb, que toma únicamente al primer y tercer esfuerzos principales, debido a que el material tiende a fallar por esfuerzos axiales, no cortantes como en el caso de

los materiales dúctiles, entonces las superficies de falla estarían sometidas a tracción debido a la carga aplicada, que genera una deformación captada por los deformímetros en el plano de la superficie del cerco central.

También debe considerarse para que un modelo pueda coincidir globalmente con ensayos de laboratorio, el sólido debe estar completamente estudiado y el programa debe contar con la versatilidad de poder determinar los parámetros medidos en la dirección deseada. Mas, como es del caso del presente proyecto de tesis, únicamente se pudo analizar puntualmente el lugar más crítico de la tapa, por lo que se consiguieron datos puntuales y debido a lo antes explicado, los resultados discretos del programa difícilmente podrán coincidir con extrema precisión con los obtenidos del ensayo de laboratorio con rosetas de deformación.

CAPÍTULO 7

ESTUDIO ECONÓMICO FINANCIERO

7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

Una evaluación económica se reduce a un análisis de costos generados al realizar este proyecto que varían de acuerdo a las condiciones en el mercado respecto a materiales, insumos, costos de laboratorio y herramientas. Costos detallados a continuación

COSTOS DEL PROYECTO

Ítem	Cant.	Rubro	Descripción	Costo	Total	
1	600	<i>Ejecutor</i>	Horas de trabajo del ejecutor del proyecto	3	1800	
		<i>Asesoramiento</i>				
2	7		Director [Horas]	20	140	
3	8		Codirector [Horas]	20	160	
4	1	<i>Adquisición tapas</i>	Donación de un juego completo de tapa y cerco y 2 tapas sueltas	0	0	
5	1	<i>Transporte</i>	De tapas y cerco a laboratorio	15	15	
6	1	<i>Cortes</i>	De tapas para obtención de probetas	15	15	
		<i>Maquinados</i>				
7	9		Fresado	5	45	
8	10		Torneado	5	50	
9	3		Rectificado	5	15	
		<i>Testeo material</i>				
10	9		Maquinado	12	108	
11	3		Tracción	10	30	
12	3		Compresión	10	30	
13	9		Dureza	10	90	
14	3		Metalográfico	15	45	
		<i>Testeo tapa</i>				
15	1		Análisis metrológico	15	15	
16	2		Estudio en Vibroforo de baja frecuencia	10	20	

		Materiales y equipos		
17	1	Suministros oficina	50	50
18	400	Computadora [\$1/h]	1	400
19	6	Empastados	9	54
20	84	Impresiones color	0,35	29,4
21	1560	Impresiones B/N	0,03	46,8
22	2	Anillados	2	4
23	1	Copias	10	10
Total:			3172,2	

Tabla 7.1: Detalle de costos de realización del proyecto de tesis.

7.2 ANÁLISIS FINANCIERO

La evaluación financiera de este proyecto no es posible realizarla por la naturaleza del mismo, debido a que busca dar un criterio al diseñador para poder llevar a cabo un trabajo más efectivo en el área de la fundición gris apoyado por software COSMOSWORKS SPo 2005 Profesional en la plataforma SOLIDWORKS 2005. También busca dar a la Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable Quito una guía clara del comportamiento real del diseño de las tapas que actualmente adquiere para que a futuro pueda realizar un proyecto de rediseño en pro de una mejora de la calidad del diseño con una reducción de la cantidad de material requerido.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

Basado en los resultados arrojados por la caracterización, se aprecia que los puntos más sensibles de la estructura de la tapa se encuentran en el cerco central y en las uniones de este con las nervaduras radiales.

El material de la fundición se vuelve extremadamente sensible al enfriamiento en la sección del cerco central, lo que provoca una disminución del esfuerzo máximo a la tracción en un 41.8%.

La relación usualmente empleada para la determinación de la resistencia a la tracción de los aceros $\sigma_y = 500$ BHN, mas para el caso de la fundición gris esta no se cumple, puesto que la resistencia depende mucho del enfriamiento de la sección; si es drástica, se incrementará la dureza debido a la formación de martencita, lo que reduce su resistencia, contrario a lo supuesto en esta ecuación.

El programa COSMOSWORKS SPo 2005 arroja resultados distintos en un 1.28% al comparar la simulación de la tapa como un elemento único con la de un ensamble de diferentes componentes habiéndose tomado las mismas condiciones de restricción, fuerza y material.

La reducción de la resistencia de la tapa es de un 41.3% al comparar el comportamiento que se tiene con un material homogéneo y con el real.

La reducción de la resistencia de la tapa resulta ser semejante en un 98.8% a la reducción de la del material, esto es debido a que el cerco central es el elemento estructural crítico, por lo que de fallar este fallará el conjunto y su resistencia está estrechamente relacionado con el de su material.

Únicamente se obtiene un resultado aceptable respecto al primer esfuerzo principal al comparar lo medido por la roseta de deformación y la simulación en COSMOSWORKS SPo 2005, con errores que oscilan entre el 10.7% y el -5.3% para el caso de aplicar una malla de 18 [mm], debido a que para el caso particular de los puntos seleccionados la dirección de este esfuerzo es cercano con la superficie del cerco central, cosa que no ocurre con el resto de esfuerzos normales y cortantes, los que ciertamente tienen un comportamiento proporcionalmente equivalente, pero presentan errores desde el 113% al 177%.

Los errores considerables que se presentan al comparar los resultados del segundo esfuerzo principal también se deben a que los valores de estos, en comparación con los esfuerzos que logra soportar el material son sensiblemente bajos y como es sabido, al sacar porcentajes de valores pequeños, los errores se magnifican.

8.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable Quito que revea el diseño de sus tapas en función de un criterio más adecuado respecto de las características del material que exige para estas.

En los casos en que por necesidad del diseño se deba fundir un material en un espesor menor al mínimo recomendado para el tipo de material según la característica de sensibilidad a la muesca, se recomienda para el diseño tomar una resistencia equivalente a la mitad de la nominal. Pero si el diámetro de la sección interna es inferior a la tercera parte de la mínima, se recomienda emplear otro tipo de material.

Se recomienda no emplear la ecuación que relaciona la dureza del material con su resistencia a la tracción cuando se desea trabajar con fundición gris de cualquier tipo.

Se recomienda no comparar los resultados de la simulación de un sólido con los de un ensamble de geometría idéntica a pesar de estar bajo las mismas condiciones de frontera.

Para conseguir resultados más certeros debidos a la influencia de un material no homogéneo en el comportamiento de un elemento, se deben simular ensambles idénticos entre sí, diferentes en las características del material mas no con un sólido de geometría idéntica de material homogéneo.

Para diseños complejos por elementos finitos que se desee comprobar o controlar con extensiómetros, debe tomarse en cuenta el que estos sensores trabajan en un estado biaxial de esfuerzos, por lo que se recomienda para la instalación de los mismos el determinar la dirección del primer esfuerzo principal.

BIBLIOGRAFIA

- Beer, Ferdinand y Russell Johnston. "Mecánica de Materiales". Mc Grw Hill, 1999.
- Popov, Egor. "Mecánica de Materiales". Editora Limusa, México.
- Robert W. Fitzgerald. "Resistencia de Materiales". Fondos Educativos Internacionales, S.A., México, 1970
- E. J. Eran Resistencia de Materiales; Ed. Interamericana, México DF. 1985
- José Pérez, Guía de curso para Mecánica de Materiales I y II.
- Gonzalo Mora, Caracterización del hierro fundido producido por Metalúrgica Andina y Proyecto de Norma ecuatoriana de caracterización de hierro, julio 2004.
- Rahmani – Vásconez, Análisis estructural del pórtico del vibroforo de baja frecuencia del LRM y verificación utilizando un sistema de adquisición de datos, Proyecto de grado, Ing. Mecánica, 2005.

ANEXOS

ANEXO 2

Respaldo bibliográfico del sustento teórico.

ANEXO 3.1

DIMENSIONES DE TAPAS

A	b	B	C	d	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
11,06	22,76	36,48	10,52	177,00	598,00	29,88	57,58	26,24	20,46	586,00	160,30	33,76	49,56	37,54	40,64
10,64	21,94	36,20	9,66	177,00	598,50	31,06				587,00	159,56	33,98	48,96	36,62	41,98
11,28	21,50	35,48	11,30	178,00	600,00	30,78				588,00	160,74	33,06	51,22	38,30	41,48
12,00															
11,10															
11,22	22,07	36,05	10,49	177,33	598,83	30,57	57,58	26,24	20,46	587,00	160,20	33,60	49,91	37,49	41,37

ANEXO 3.2

Hojas de toma de datos de ensayos de tracción y compresión

ANEXO 4.1

Norma CAPRE - ANDESAPA

ANEXO 6.1

RESULTADOS DE ESFUERZOS SIMULADOS

Malla % de carga	Malla 12mm						Malla 15mm					
	45%		30%		15%		45%		30%		15%	
Esfuerzo	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
	44428020	1440949	29618718	971300	14809359	485650	52091652	937478	35348648	405369	14855010	460043
	44253476	1380129	29502356	1057648	14751178	528824	44564960	1471209	25428402	1117407	17363910	274098
	44743712	1691607	29829178	1097039	14914589	548419	47899044	1645562	30016026	943656	16080601	563868
	48982328	1356183	32654930	1065510	16327465	532755	48241736	1372190	29797488	895647	15966370	480317
	48850784		32567232		16283616							
	49851068		32586272		16293136							
	48879348		33234086		16617043							
Promedio	47141248	1467217	31427538,86	1047874,25	15713769,43	523912	48199348	1356609,75	30147641	840519,75	16066472,75	444581,5

Roseta #2												
Malla % de carga	Malla 12mm						Malla 15mm					
	45%		30%		15%		45%		30%		15%	
Esfuerzo	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
	43326960	1456953	28884684	904126	14442342	452063	44253476	822271	34584068	737266	17737836	140763
	44564960	1586469	29710020	1127737	14855010	480317	53213452	1380129	24347464	975655	14751178	532755
	42877744	1471209	28585202	960634	14292601	563868	48879648	1440949	29703180	1126290	16293136	528824
	46751916	1372190	31167980	920086	16080601	460043	48850784	1691607	29656704	1164716	16283616	548519
	48241736		32921986		16460990		48982328		29656892		16327465	
	49382908		31932740		15966370							
	47899044		31145566		15572583							
Promedio	46149324	1471705,25	30621168,29	978145,75	15381499,57	489072,75	48835937,6	1333739	29589661,6	1000981,75	16278646,2	437715,25

RESULTADOS DE ESFUERZOS SIMULADOS

Roseta #1

Malla 18mm						Malla 21mm					
45%		30%		15%		45%		30%		15%	
σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
45927960	461274	24978310	90634	17534880	45317	53895976	204234	33440796	136156	16720398	53252
46369920	1397733	33453512	1238677	12506974	619338	37415328	1350015	24774322	900010	14694255	455703
46321304	1822693	31297192	1503366	15456640	470451	44453268	1209321	30523270	883935	12387161	337001
52604640	1561325	29648168	940903	15309319	751683	46841964	1325903	29388510	806214	15261635	231904
47805956	1310756,25	29844295,5	943395	15201953,25	471697,25	45651634	1022368,25	29531724,5	681578,75	14765862,25	269465

Roseta #2

Malla 18mm						Malla 21mm					
45%		30%		15%		45%		30%		15%	
σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
38167800	550555	35069760	307516	16726756	153758	50161192	159757	35930648	106505	17965324	68078
50180272	1446880	25013948	931822	12489155	465911	37161484	1367109	31227976	911406	15613988	450005
37467468	2255050	30913280	1040884	15648596	607564	45786904	1011005	25156830	674003	16014970	403107
46945788	1312556	30618638	1215129	14824084	520442	44082768	695413	32029940	463609	12578415	441967
44472252											
43446716	1391260,25	30403906,5	873837,75	14922147,75	436918,75	44298087	808321	31086348,5	538880,75	15543174,25	340789,25

