

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA



**DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS DE MATERIALES
ISOTRÓPICOS POR MEDIO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y ENSAYO
ULTRASÓNICO**

Informe de Habilitación Profesional
presentado en conformidad a los requisitos
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Sr: JUAN CARLOS FIGUEROA

FRANCISCO JAVIER ARELLANO BRAVO
CONCEPCIÓN-CHILE
2014



CONSTANTES ELÁSTICAS DE MATERIALES ISOTRÓPICOS

Agradecimientos

He finalizado una importante etapa en mi desarrollo personal y académico, en este momento contemplo con orgullo y satisfacción el logro de un importante anhelo. La alegría que hoy siento, me impulsa a enfrentar nuevos desafíos que a partir de ahora se me presentan.

Quiero agradecer, a Dios por sobre todas las cosas, por darme salud, perseverancia e inteligencia para afrontar cada nuevo día mi etapa universitaria lejos de mi familia.

A mi Madre Viviana, y a mi Padre Francisco, espero que alguna vez logren comprender toda la admiración y agradecimiento que siento hacia ellos por todo lo que me han dado como padres y personas.

A mi polola Pamela, por su eterna ayuda en mi etapa universitaria, por apoyarme y esperarme cada fin de semana como si fuese el primero.

A mi hijo Tomás, por permitirme estar lejos de él cada día que su Padre estudiaba y siempre esperarme con la misma sonrisa cada semana.

A mis hermanos Patricio, Robinson, María Paz y mi querido tío Arturo por el apoyo, comprensión y cariño, que me han brindado incondicionalmente.

A todos mis amigos y compañeros de Universidad, por su ayuda, comprensión y buenos momentos vividos durante los 6 años transcurridos en este proceso de formación.

Ya todas aquellas personas que de alguna u otra forma me han acompañado y ayudado en este camino.

A todos ellos, Muchas Gracias...



SUMARIO

El objetivo de esta investigación es, ***”Determinar las constantes elásticas del Acero carbono, Acero inoxidable, Bronce y Aluminio (materiales isotrópicos), por medio del ensayo de tracción, las cuales se contrastaran con el ultrasonido como método alternativo a los ensayos destructivos”***.

Para el logro de dicho objetivo se utiliza, en el caso del ensayo de tracción, la maquina ***Zwick / Roell, modelo BT1-FB100TN***, la que produce un alargamiento uniaxial de la probeta diseñada, por el autor de esta investigación, con el fin de generar el efecto esfuerzo/deformación, lo que permite determinar la primera constante en estudio (***Modulo de Young***), luego con este valor, a través de la teoría, se obtiene los valores de las otras dos constantes.

En el ultrasonido, se utiliza el equipo EPOCH 1000i, el cual produce por medio de palpadores, ondas ultrasónicas que viajan en el material, entregando datos que posteriormente fueron utilizados para el cálculo de las constantes elásticas. Específicamente se usa este dispositivo para obtener las velocidades de propagación del sonido, que al igual que en el caso anterior, por medio de las formulas presentadas en los siguientes capítulos, se usan para dichos cálculos.

Al contar con los valores de las constantes elásticas (***Modulo Elástico, Modulo de Poisson y Modulo de Corte***), se realiza una comparación en ***porcentaje de error*** en el valor de ambos ensayos con la literatura técnica menciona en el informe.



INDICE

Sumario	3
Indice	4
Indice De Figuras	6
Indice De Tablas.....	8
Introducción	9
Objetivo General	11
Objetivos Específicos	11
Capítulo I:.....	12
Antecedentes Generales	12
1.1 Materiales	13
1.1.1 Características De Los Materiales	13
1.1.2 Materiales En Estudio	15
1.1.2.1 Acero Carbono	16
1.1.2.2 Acero Inoxidable	18
1.1.2.3 Aluminio.....	19
1.1.2.4 Bronce	20
1.1.3 Ensayos De Medición De Constantes Elásticas	22
1.1.3.1 Métodos De Medición Destructivos.....	22
1.1.3.2 Métodos De Medición No Destructivos.....	28
Capítulo II:	36
Elasticidad De Los Materiales.....	36
2.1 Elasticidad De Los Materiales	37
2.1.1 Propiedades Elásticas De Los Materiales.....	39
2.1.1.1 Módulo De Elasticidad.....	39
2.1.1.2 Módulo De Rigidez	41
2.1.1.3 Razón De Poisson.....	43
2.2.1 Ley De Hooke Generalizada	45
2.2.1.1 Ley De Hooke En Materiales Isotrópicos	51



Capítulo III:	54
Ensayo De Tracción	54
3.1 Ensayo De Tracción.....	55
3.1.1 Fundamento Teórico	56
3.1.2 Procedimiento Utilizado Del Ensayo De Tracción	64
Capítulo IV:.....	75
Ensayo De Ultrasonido.....	75
4.1 Ensayo De Ultrasonido	76
4.1.1 Fundamento Teórico	77
4.1.2 Procedimiento Utilizado Del Ensayo De Ultrasonido.....	94
4.1.2.1 Calibración Con Palpador Recto	96
4.1.2.2 Calibración Con Palpador Angular	100
Conclusión.....	106
Bibliografía.....	112
Anexo	114



INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ENSAYO DE CIZALLAMIENTO	23
FIGURA 2: ENSAYO DE FLEXIÓN	24
FIGURA 3: ENSAYO DE TORSIÓN	25
FIGURA 4: ENSAYO DE COMPRESIÓN	26
FIGURA 5: ENSAYO DE TRACCIÓN	27
FIGURA 6: SEÑAL DE VIBRACIÓN.....	30
FIGURA 7: IMÁGENES TERMOGRÁFICAS	31
FIGURA 8: CAMPO DE FUGA.....	32
FIGURA 9: ETÁPAS DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES	33
FIGURA 10: PRINCIPIO DE LA RADIACIÓN.....	34
FIGURA 11: ESPECTRO SONORO	35
FIGURA 12: ESTADOS DE DEFORMACIÓN.....	38
FIGURA 13: DEFORMACIÓN BAJO ESFUERZO UNIAXIAL.....	39
FIGURA 14: DEFORMACIÓN DE UN CUBO BAJO UNA FUERZA DE CORTE	41
FIGURA 15: EFECTO POISSON EN BARRA CARGADA UNIAXIALMENTE	43
FIGURA 16: COMPONENTES DE ESFUERZO SOBRE UN SISTEMA COORDENADO	45
FIGURA 17: MAQUINA DE ENSAYO DE TRACCIÓN	56
FIGURA 18: FUERZA V/S ALARGAMIENTO	57
FIGURA 19: CUERPO EN TENSIÓN.....	57
FIGURA 20: TENSIÓN V/S DEFORMACIÓN	58
FIGURA 21: DEFORMACIÓN PROPORCIONAL A LA TENSIÓN.....	59
FIGURA 22: ELEMENTO ELASTOPLÁSTICO.....	60
FIGURA 23: FRÁGIL/DÚCTIL.....	62
FIGURA 24: RESILIENCIA DE UN MATERIAL	63
FIGURA 25: BOTON DE ENCENDIDO	64
FIGURA 26: MÁQUINA ZWICK / ROELL.....	65
FIGURA 27: MORDAZAS 10-30 MM	65
FIGURA 28: INSERTOS.....	66
FIGURA 29: GEOMETRÍA DE PROBETAS.....	67
FIGURA 30: TECLAS DE POSICIÓN	68



FIGURA 31: CONFIGURACIÓN TESTXPRT II.....	68
FIGURA 32: CONFIGURACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA PROBETA.....	70
FIGURA 33; FUERZA EN 0 / PARAR	70
FIGURA 34: GRÁFICOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.....	71
FIGURA 35: BARRA INSTRUMENTADA CON NODOS MICRO STRAIN	73
FIGURA 36: MÉTODO DE MEDICIÓN.....	77
FIGURA 37: EQUIPO DE US ESTÁNDAR	77
FIGURA 38: INTERFACES DE CONEXIÓN	78
FIGURA 39: TRANSDUCTORES DE HAZ ULTRASÓNICO DIRECTO	78
FIGURA 40: FLUIDO DE ACOPLA.....	78
FIGURA 41: PROBETAS DE ULTRASONIDO.....	79
FIGURA 42: LÍMITES DEL SONIDO	79
FIGURA 43: PROPAGACIÓN DEL SONIDO	80
FIGURA 44: LONGITUD DE ONDA.....	80
FIGURA 45: FRECUENCIA DE UNA ONDA	81
FIGURA 46: ONDA LONGITUDINAL.....	82
FIGURA 47: ONDA TRANSVERSAL	83
FIGURA 48: ONDAS SUPERFICIALES	83
FIGURA 49: ULTRASONIDO POR CONTACTO.....	85
FIGURA 50: ULTRASONIDO POR INMERSIÓN.....	85
FIGURA 51: PULSO - ECO.....	86
FIGURA 52: PITCH - CATCH	87
FIGURA 53: THROUGH TRANSMISSION	87
FIGURA 54: A - SCAN	88
FIGURA 55: B - SCAN	88
FIGURA 56: C - SCAN	89
FIGURA 57: S - SCAN.....	89
FIGURA 58: ONDAS DE CUERPO EN SÓLIDOS.....	90
FIGURA 59: PROBETAS DE ENSAYO ULTRASÓNICO.....	94
FIGURA 60: VELOCIDAD / RANGO	96
FIGURA 61: ESPESOR DELGADO / PALPADOR RECTO.....	98
FIGURA 62: ESPESOR GRUESO / PALPADOR RECTO	99



FIGURA 63: ESPESOR DELGADO / PALPADOR ANGULAR	102
FIGURA 64: VALOR DE ESPESOR DELGADO	102
FIGURA 65: ESPESOR GRUESO / PALPADOR ANGULAR	103
FIGURA 66: VALOR DE ESPESOR GRUESO	103
FIGURA 67: MASA DE PROBETAS	104

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: PROPIEDADES DEL BRONCE SAE 640	21
TABLA 2: CONSTANTES ELÁSTICAS DE MATERIALES ISOTRÓPICOS	44
TABLA 3: RELACIONES ENTRE CONSTANTES ELÁSTICAS (MATERIAL ISÓTROPO LINEAL)	52
TABLA 4: RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN	71
TABLA 5: MÓDULO DE POISSON	74
TABLA 6: CONSTANTES ELÁSTICAS (ENSAYO DE TRACCIÓN).....	74
TABLA 7: PROPIEDADES DE MATERIALES (KINO G.S. 1987)	93
TABLA 8: VELOCIDADES LONGITUDINALES DEL SONIDO.....	100
TABLA 9: VELOCIDADES TRANSVERSALES DEL SONIDO	104
TABLA 10: DENSIDAD DE PROBETAS	104
TABLA 11: CONSTANTES ELÁSTICAS (ENSAYO DE ULTRASONIDO)	105
TABLA 12: COMPARACIÓN DE VALORES DEL MÓDULO ELÁSTICO	109
TABLA 13: COMPARACIÓN DE VALORES DEL MÓDULO DE POISSON.....	110
TABLA 14: COMPARACIÓN DE VALORES DEL MÓDULO DE CORTE	110



INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de titulación se estudiará y se determinarán por medio de ensayos, las constantes de elasticidad que poseen los materiales linealmente elásticos existentes, estas constantes son el *Módulo Elástico*, *Módulo de Corte* y *Módulo de Poisson*, para ello se utilizará el *ensayo de tracción* como método convencional, y el *ultrasonido* como método alternativo. Cabe destacar que los materiales analizados serán materiales isotrópicos, es decir, que se comportan de la misma manera en todas sus direcciones ante cualquier tipo de estímulo. Los materiales en estudio serán aceros que normalmente se usan con mayor frecuencia en la industria, estos son el *Acero Carbono*, *Acero Inoxidable*, *Aluminio* y *Bronce*.

El ensayo de tracción, compone a la rama de los *Ensayos Destructivos*. Éste método consiste en ensayos que se realizan a un material mediante el uso de herramientas o máquinas las cuales producen una alteración irreversible de su composición química, mecánica y de su geometría dimensional. Para la determinación de las constantes que se buscan, se usará éste método, como método convencional, donde se debe destruir el material para la obtener los 3 módulos, por lo tanto, se someterá el material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produzca la rotura del mismo. Finalmente lo que se busca en la práctica es medir la resistencia del material a la aplicación una fuerza estática, o en otras palabras cuanto se deforma el material bajo una cierta carga.

En el caso de este método, el material debe ser maquinado de manera tal que se pueda alargar uniformemente. En este trabajo se usarán probetas de cada material con una geometría específica, la cual será de forma cilíndrica de 10 mm de diámetro y 10 cm de largo, para la parte que sufrirá la deformación.

La realización de ensayos para la obtención de las constantes de los materiales en estudio, será efectuada con un equipo tecnológico de ensayos de tracción, ubicado en el laboratorio de la Universidad de Bio Bio. El equipo a utilizar es de marca *Zwick / Roell*, *modelo BT1-FB100TN*.



Como contraparte al ensayo de tracción se tiene el ensayo ultrasónico, que compone a la rama de los Ensayos *No Destructivos (END)*. Este método consiste específicamente de pruebas que se realizan a los materiales, sin la necesidad de que sufran cambios en sus propiedades físicas, químicas, y mecánicas. En la práctica el ultrasonido es principalmente utilizado para el control de calidad e inspecciones de materiales en diferentes ramas industriales, sin embargo existen distintos usos, del cual se sacará provecho para esta HP (obtención de velocidades de propagación del sonido). (Rodríguez González, Cristina 2012).

Las ondas ultrasónicas pueden propagarse a través de todos los medios donde existe materia, en átomos o partículas capaces de vibrar, propagándose a través de medios sólidos, líquidos y gases. El movimiento que presentan los átomos es considerablemente pequeño. Las pruebas de ultrasonido industrial emplean esfuerzos de baja amplitud los cuales no afectarán permanentemente los materiales que se examinarán. Para la medición se necesita un equipo de ultrasonido capaz de producir estas pequeñas perturbaciones en el material, esto se logra con palpadores compuestos internamente de materiales piezoeléctricos, los cuales se deforman con estímulos eléctricos a altas frecuencias, logrando así, por medio del contacto directo una perturbación en el material.

Existen distintas teorías del movimiento, de las cuales la *elastodinámica* sirve para la determinación de las constantes elásticas, la cual dice que teniendo la *velocidad con la que viaja el sonido* dentro de un material, se puede obtener por medio de ciertos cálculos, los módulos que se buscan.

El ultrasonido fue propuesto por el Dr. Floy Firestone en el año 1945 y es ingresado en la aplicación industrial por el Dr. Elmer Sperry en 1947.

La realización de ensayos para la obtención de las velocidades de los materiales en estudio, será efectuada con un equipo de alta tecnología ultrasónica, ubicado en el laboratorio de la Universidad de Bio Bio. El equipo a utilizar es de marca Epoch 1000i, con palpador recto para determinar el módulo elástico y palpador angular para determinar el módulo de corte y módulo de Poisson. Es un equipo portátil para END por ultrasonido que sirve para detectar ecos de discontinuidades en modos de ultrasonido convencional (UT) y phased array (PA).



OBJETIVO GENERAL

- Determinar las constantes elásticas del Acero carbono, Acero inoxidable, Bronce y Aluminio (materiales isotrópicos), por medio del ensayo de tracción, las cuales se contrastaran con el ultrasonido como método alternativo a los ensayos destructivos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar las teorías pertinentes para la obtención de las 3 constantes elásticas de los materiales (Módulo elástico, Módulo de corte y Módulo de Poisson), por medio del ensayo de tracción y por medio del ultrasonido.
- Enlazar la mecánica de cuerpos rígidos con la propagación del movimiento en cuerpos sólidos con el propósito de analizar el movimiento dentro del material como opción a la determinación de las constantes elásticas.
- Montar y ensayar de manera correcta las probetas en la máquina de tracción del laboratorio, para su posterior toma de datos antes y después de la ruptura.
- Calibrar el equipo de ultrasonido en los materiales propuestos, para la obtención de las velocidades del movimiento, dentro de su estructura.
- Concluir los resultados de ambos ensayos para ver la efectividad y/o exactitud de cada medición.



CAPÍTULO I:

ANTECEDENTES GENERALES

*“Todo lo que ocurre, desde lo más grande a lo más
chico, ocurre necesariamente”.*

Arthur Schopenhauer (1788-1860); filósofo alemán



1.1 MATERIALES

Para la realización de este trabajo, es necesario definir, conceptualizar los temas y determinar claramente los procedimientos esenciales para el desarrollo de este proceso con el fin de lograr los objetivos propuestos.

El principio y base de la HP está relacionado con materiales que serán deformados y analizados por medio del ultrasonido, es por ello que definir que es un material se hace necesario, por tanto, se puede decir que los materiales corresponden a un conjunto de elementos necesarios para actividades o tareas específicas en la producción de bienes y servicios, que se diferencian unos de otros por sus características técnicas, las que finalmente definen su uso en la industria, tales características son:

1.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

(Paris, F.; Cañas, J.; Marín, J. C.; Barroso, A. R. D. 2006)

PROPIEDADES SENSORIALES: Son aquellas como el color, el brillo, la dureza o la textura. Están relacionadas con la impresión que produce ante nuestros sentidos.

PROPIEDADES FISIOQUÍMICAS: Son aquellas que nos informan sobre el comportamiento del material ante diferentes acciones externas tales como el calentamiento, las deformaciones o el ataque de productos químicos

PROPIEDADES TECNOLÓGICAS: Son aquellas que nos informan del comportamiento del material durante su fabricación.

PROPIEDADES ECOLÓGICAS: Son aquellas relacionadas con la mayor o menor nocividad del material para el medio ambiente, como la toxicidad, la volatilidad, la facilidad de reciclado, etc.

PROPIEDADES MECÁNICAS (*propiedades de los materiales resistentes*): Nos informan acerca de cómo se comporta un material ante distintas cargas y esfuerzos, estas propiedades son:



Dureza: Resistencia que presenta un material a ser rayado o cortado por otro.

Tenacidad: Resistencia que presenta un material a romperse cuando se le golpea. Este tipo de materiales se llama tenaces, y al contrario, frágiles.

Flexibilidad: Capacidad que tiene un material de poder doblarse sin romperse. Son llamados materiales flexibles, y al contrario, rígidos.

Elasticidad: Capacidad que tiene un material de recuperar su forma por sí solo, después de haberlo estirado, comprimido o retorcido. Reciben el nombre de elásticos, y al contrario, plásticos.

Los materiales a su vez se clasifican:

SEGÚN SU ORIGEN

Materiales naturales: Se encuentran directamente en el medio natural (Ej. Granito)

Materiales artificiales: Son el resultado de algún proceso de fabricación (Ej.: Acero)

SEGÚN SU COMPOSICIÓN

Se pueden clasificar en elementos y compuestos, homogéneos y heterogéneos, metálicos y no metálicos, inorgánicos y orgánicos, etc.

SEGÚN SUS PROPIEDADES

Se pueden clasificar en rígidos y flexibles, tenaces y frágiles, conductores y aislantes, reciclables y no reciclables, etc.

En esta HP se determinará las constantes elásticas de materiales específicos, los cuales se diferencian por su orientación y composición interna, es por ello que es necesario distinguir dicha estructura interna en los siguientes grupos:

(París, F., Cañas, J., Marín, J. C., Barroso, A. R. D. 2006).



MATERIALES ISOTRÓPICOS: Son aquellos que no dependen de la elección de los ejes, no importando para que lado se mida cierta propiedad o magnitud física, siempre va a medir lo mismo.

MATERIALES ANISOTRÓPICOS: Corresponden a aquellos donde sus propiedades mecánicas son diferentes en diferentes direcciones. En general, las propiedades mecánicas de los materiales anisotrópicos no son simétricas con respecto a ningún plano o eje.

MATERIALES ORTOTRÓPICOS: Son materiales anisotrópicos donde sus propiedades mecánicas son únicas e independientes en las direcciones de tres ejes perpendiculares entre sí. Algunos ejemplos de materiales ortotrópicos son la madera, muchos cristales y los metales laminados. (Cojulun Ortiz, O. A. 2013).

1.1.2 MATERIALES EN ESTUDIO

De lo anteriormente mencionado, se debe destacar que la investigación se realizará en materiales de estructura isotrópica. Estos materiales fueron seleccionados, pues dentro de la industria son unos de los más utilizados, estos materiales son:

- **Acero Carbono: SAE 1020 [Fe / C(0,2) / Si(0,3) / Mn(0,8) / P(0,04)]**
- **Acero Inoxidable: AISI 316 [Fe / Cr(18) / Ni(10) / Mo(3)]**
- **Aluminio: Duraluminio Laminado [Al(95) / Cu(4) / Mn(0,5) / Mg(0,5)]**
- **Bronce: SAE 640 [Cu(85) / Sn(10) / Pb(1) / Zn(0,5) / Ni(0,8) / Fe(0,3) / Sb(0,25) / P(0,3)]**

Lo rojo corresponde a la composición química de los materiales con su respectivo porcentaje en peso de cada elemento aleante.



1.1.2.1 ACERO CARBONO

El acero es una aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso de la composición de la aleación, alcanzando normalmente porcentajes entre el 0,2% y el 0,3% para aceros de bajo carbono, que son los utilizados para las construcciones. Porcentajes mayores al 2,1% de carbono dan lugar a las fundiciones, aleaciones que al ser frágiles y no poderse forjar a diferencia de los aceros, se moldean.

El acero al carbono, constituye el principal producto de los aceros que se producen, estimando que un 90% de la producción mundial corresponde a aceros al carbono y el 10% restante son aceros aleados. La composición química de los aceros al carbono es compleja. Además del hierro y el carbono, hay en la aleación otros elementos necesarios para su producción, tales como silicio y manganeso, y hay otros que se consideran impurezas por la dificultad de excluirlos totalmente azufre, fósforo, oxígeno, hidrógeno. El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad.

El *acero carbono SAE 1020* corresponde a uno de los aceros comúnmente usados. Tiene un contenido nominal de carbono de 0.20% y aproximadamente 0.5% de manganeso. Tiene una buena combinación de resistencia y ductilidad y puede ser endurecido o carburizado.

Aplicaciones

El acero 1020 es usado en aplicaciones estructurales tales como remaches con cabeza formada en frío. Es usado frecuentemente en condiciones de endurecimiento superficial.

Maquinabilidad

La maquinabilidad es buena, un 65% comparada con el acero al carbono 1112 que es la referencia en 100% de maquinabilidad.

Conformado

La conformabilidad es buena por todos los métodos convencionales; posee una buena ductilidad.



Soldadura

Satisfactoriamente soldable por todos los métodos estándares.

Tratamiento térmico

El acero 1020 puede ser endurecido por calentamiento a 815-870 °C y luego enfriando en agua. Debe ser revenido. Se usa más frecuentemente endurecido por carburización. Generalmente no se practican tratamientos térmicos a un acero de bajo carbono por los bajos resultados obtenidos en las propiedades mecánicas.

Forja

Se forja de 1260 a 980 °C.

Trabajo en caliente

Se trabaja en caliente en el rango de 480 a 650 °C.

Trabajo en frío

El acero 1020 es fácilmente trabajado en frío por métodos convencionales. Después de un extenso trabajo en frío puede ser necesario un recocido para aliviar tensiones.

Recocido

El recocido completo se hace de 870 a 980 °C seguido por un lento enfriamiento en horno. Esto da una resistencia a la tensión de alrededor 65 Ksi. El recocido de alivio de tensiones puede ser hecho a 540 °C.

Revenido

Seguido a un tratamiento térmico de endurecimiento y al temple, se hace el revenido de 315 a 540 °C, dependiendo del nivel de resistencia requerido. Un revenido a 540 °C dará una resistencia a la tensión de 90 Ksi.

Endurecimiento

El acero 1020 endurece por trabajo en frío y por tratamiento térmico, temple y revenido.



1.1.2.2 ACERO INOXIDABLE

El acero inoxidable fue descubierto por casualidad por el metalurgista inglés Harry Brearley, en 1913, mientras experimentaba con aleaciones de acero que resultaran idóneas para fabricar cañones de pistola. Meses después notó que la mayoría de las muestras descartadas se habían oxidado, pero no una que contenía 14% de cromo. Ello desembocó en la producción del acero inoxidable.

El acero ordinario se oxida porque se combina fácilmente con el oxígeno del aire, lo que produce óxidos de hierro rojizos. El aluminio, el níquel y el cromo, así como otros metales, reaccionan en forma muy parecida, pero sus óxidos forman una capa impermeable que impide al oxígeno reaccionar.

Se fabrica en la actualidad una amplia variedad de aceros inoxidables. Una de las aleaciones más comunes contiene 18% de cromo y 8% de níquel, se llama 18:8 y se usa en los fregaderos de cocina.

Los cuchillos de cocina se hacen con un acero que contiene cerca de 13% de cromo. Una aleación más resistente es la que contiene molibdeno; se usa para revestimientos de edificios.

En particular, el **acero inoxidable AISI 316** resiste a la corrosión más que el AISI 304, no de una manera general, si no especialmente cuando se trata de una corrosión por picaduras.

Los elementos que producen este tipo de corrosión son: flúor, cloro, bromo, y yodo, los cuales se denominan en términos químicos halógenos. El elemento más conocido de ellos es el cloro, presente en el mar, en ambientes marinos y en agua potable.

Para proteger al acero inoxidable de las acciones del cloro (cloruros, ion cl.) se introduce en la aleación el elemento molibdeno (MO) en una proporción del 2% al 3 %. El molibdeno dentro del acero inoxidable forma compuestos químicos que protegen al material de la corrosión por picaduras.

El material AISI 316 también se suele denominar como 18/8/2 refiriéndose al contenido de Cromo/Níquel/Molibdeno.



1.1.2.3 ALUMINIO

El aluminio es un elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. Se trata de un metal no ferromagnético. Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. En estado natural se encuentra en muchos silicatos (feldespatos, plagioclasas y micas). Como metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio metálico mediante electrólisis. Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería de materiales, tales como su baja densidad (2.700 kg/m³) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa).

Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es muy barato. Por todo ello es desde mediados del siglo XX (George J. Binczewski (1995) el metal que más se utiliza después del acero.

Fue aislado por primera vez en 1825 por el físico danés H. C. Oersted. El principal inconveniente para su obtención reside en la elevada cantidad de energía eléctrica que requiere su producción. Este problema se compensa por su bajo coste de reciclado, su extendida vida útil y la estabilidad de su precio.

El ***duraluminio laminado*** corresponde al conjunto de aleaciones de aluminio con cobre, magnesio y silicio.

Principales aplicaciones

Torres estructurales, vagonetas para minas, carrocerías, grúas, plataformas, volquetes, etc. Utensilios. Aplicaciones criogénicas.

Propiedades principales

Aleación de muy altas características y resistencia a la corrosión en ambiente industrial y agua marina. Buena mecanización y buena resistencia a la abrasión.



Soldabilidad

A la llama y al arco muy buena. Resistencia a la soldadura muy buena. Braseado muy buena.

Maquinabilidad

Fragmentación de viruta regular y brillo de superficie muy bueno.

Anonizado

Protección muy buena, decoración regular, dureza muy buena, recocido bueno, en semiduro regular y en duro no.

1.1.2.4 BRONCE

Bronce es toda aleación metálica de cobre y estaño en la que el primero constituye su base y el segundo aparece en una proporción del 3 al 20 %.

Las aleaciones constituidas por cobre y zinc se denominan propiamente latón; sin embargo, dado que en la actualidad el cobre se suele alea con el estaño y el zinc al mismo tiempo, en el lenguaje no especializado la diferencia entre bronce y latón es bastante imprecisa.

El bronce fue la primera aleación de importancia obtenida por el hombre y da su nombre al período prehistórico conocido como edad del bronce. Durante milenios fue la aleación básica para la fabricación de armas y utensilios, y orfebres de todas las épocas lo han utilizado en joyería, medallas y escultura. Las monedas acuñadas con aleaciones de bronce tuvieron un protagonismo relevante en el comercio y la economía mundial.

Cabe destacar entre sus aplicaciones actuales su uso en partes mecánicas resistentes al roce y a la corrosión, en instrumentos musicales de buena calidad como campanas, gongs, platillos de acompañamiento, saxofones, y en la fabricación de cuerdas de pianos, arpas y guitarras.



El **bronce SAE 640** tiene aplicaciones muy variadas, entre ellas las siguientes:

Bujes de: biela, cajas de cambio, pasadores de pistón, balancines.

Descansos y guías en: laminadores, prensas excéntricas, grúas.

Otros: Engranajes, coronas, piñones y rodetes.

Tabla 1: Propiedades Del Bronce Sae 640

Composición Química				
%Cu	%Sn	%Pb	%Zn (máx.)	%Ni (inc. Co)
85,0 - 88,0	10,0 - 12,0	1,0 - 1,5	0,5	0,8 - 1,5
Propiedades Mecánicas				
Esfuerzo Fluencia (mín.)(Kg/mm ²)	Esfuerzo Tracción (mín.)(Kg/mm ²)		Elongación (mín.)%	
16	28		10	
Características Técnicas				
Resistencia a la Corrosión	Resistencia al Desgaste	Cualidad Antifricción	Propiedades a Altas T°	
Excelente	Buena	Buena	Buena	
Condiciones de Trabajo				
Velocidad	Carga Presión		Lubricación	
Media	Alta		Forzada	



1.1.3 ENSAYOS DE MEDICIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS

En la actualidad existen distintos tipos de ensayos para el cálculo de las constantes elásticas de los materiales, estos a gran escala se dividen en 2 categorías, Ensayos destructivos (Método convencional), y ensayos no destructivos (Método alternativo).

1.1.3.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN DESTRUCTIVOS

(Lacalle, R., Álvarez, J. A., Gutiérrez-Solana, F. 2007).

Son pruebas que se les hacen a los materiales. Se les llaman ensayos destructivos porque deforman al material.

Los materiales de interés tecnológico se someten a una variedad de ensayos para conocer sus propiedades. Se simulan las condiciones de trabajo real y se estudia su aplicación.

Entre los ensayos destructivos más comunes se encuentran los siguientes: Ensayo de cizallamiento, ensayo de flexión, ensayo de torsión, ensayo de compresión y ensayo de tracción. (García Alonso, M. D., Alonso, M. C., Andrade Perdrix, M. C., & Rodríguez Santiago, J. 1998).



ENSAYO DE CIZALLAMIENTO

Un ensayo de cizallamiento estático se lleva a cabo, por lo general, en los materiales que están hechos de metal o materiales compuestos. Los materiales compuestos se componen de más de dos materiales y de pueden hacer de metal, plástico, madera o fibra de vidrio, para nombrar algunos. Esta prueba mide la fuerza interna de un material para ver cuánta puede soportar antes que la fuerza rompa el material.

Método: un ensayo de cizallamiento estático se lleva a cabo mediante la colocación de un material en un dispositivo como una pinza. A continuación, se le aplica peso al material. Esta prueba se llama “ensayo de cizallamiento estático” porque la cantidad de peso aplicado al material sigue siendo el mismo durante el ensayo. La prueba también considera el tiempo como un factor, y en última instancia, mide cómo el material resiste la fuerza del peso a través de una cantidad de tiempo arreglada. (López, G. A., et al. 1999)



Figura 1: Ensayo De Cizallamiento



ENSAYO DE FLEXIÓN

El esfuerzo de flexión puro o simple se obtiene cuando se aplican sobre un cuerpo pares de fuerza perpendiculares a su eje longitudinal, de modo que provoquen el giro de las secciones transversales con respecto a los inmediatos.

Sin embargo y por comodidad para realizar el ensayo de los distintos materiales bajo la acción de este esfuerzo se emplea generalmente a las mismas comportándose como vigas simplemente apoyadas, con la carga concentrada en un punto medio (flexión práctica u ordinaria).

En estas condiciones además de producirse el momento de flexión requerido, se superpone a un esfuerzo cortante, cuya influencia en el cálculo de la resistencia del material varía con la distancia entre apoyos, debido a que mientras los momentos flectores aumentan o disminuyen con ésta, los esfuerzos cortantes se mantienen constantes.

Es por esta razón que la distancia entre los soportes de la probeta se ha normalizado convenientemente en función de la altura o diámetro de la misma, pudiendo aceptar entonces que la acción del esfuerzo de corte resulta prácticamente despreciable. Para ensayos más precisos la aplicación de la carga se hace por intermedio de dos fuerzas con lo que se logra “flexión pura”. (Rubio, L., Fernández-Sáez, J., Navarro, C. 1998).

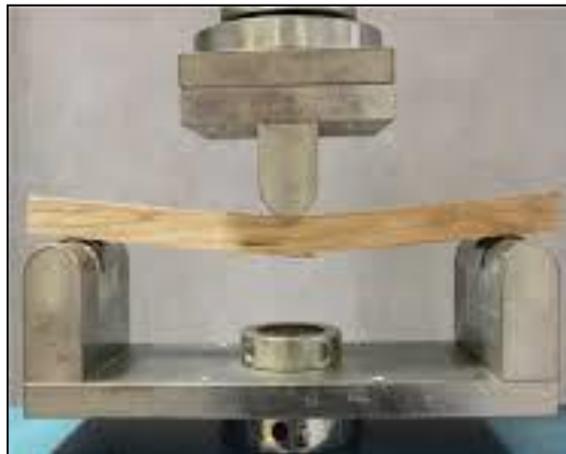


Figura 2: Ensayo De Flexión



ENSAYO DE TORSIÓN

En ingeniería, torsión es la sollicitación que se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal de un elemento constructivo o prisma mecánico, como pueden ser ejes o, en general, elementos donde una dimensión predomina sobre las otras dos, aunque es posible encontrarla en situaciones diversas.

La torsión se caracteriza geoméricamente porque cualquier curva paralela al eje de la pieza que deja de estar contenida en el plano formado inicialmente por las dos curvas.

El estudio general de la torsión es complicado porque bajo ese tipo de sollicitación la sección transversal de una pieza en general se caracteriza por dos fenómenos:

Aparecen tensiones tangenciales paralelas a la sección transversal. Si estas se representan por un campo vectorial sus líneas de flujo "circulan" alrededor de la sección.

Cuando las tensiones anteriores no están distribuidas adecuadamente, cosa que sucede siempre a menos que la sección tenga simetría circular, aparecen alabeos seccionales que hacen que las secciones transversales deformadas no sean planas.

El alabeo de la sección complica el cálculo de tensiones y deformaciones, y hace que el momento torsor pueda descomponerse en una parte asociada a torsión alabeada y una parte asociada a la llamada torsión de Saint-Venant. En función de la forma de la sección y la forma del alabeo, pueden usarse diversas aproximaciones más simples que el caso general. (Medina, S. F. 1987).



Figura 3: Ensayo De Torsión



ENSAYO DE COMPRESIÓN

(Rebollero, Pedro Coca y Juan Rosique Jiménez 2000).

El ensayo de compresión es poco frecuente en los metales y consiste en aplicar a la probeta, en la dirección de su eje longitudinal, una carga estática que tiende a provocar un acortamiento de la misma y cuyo valor se irá incrementando hasta la rotura o suspensión del ensayo.

El diagrama obtenido en un ensayo de compresión presenta para los aceros, al igual que el de tracción un periodo elástico y otro plástico.

En los gráficos de metales sometidos a compresión, obtenidas sobre probetas cilíndricas de una altura doble con respecto al diámetro, se verifica lo expuesto anteriormente, siendo además posible deducir que los materiales frágiles (fundición) rompen prácticamente sin deformarse, y los dúctiles, en estos materiales el ensayo carece de importancia, ya que se deforman continuamente hasta la suspensión de la aplicación de la carga, siendo posible determinar únicamente, a los efectos comparativos, la tensión al límite de proporcionalidad.



Figura 4: Ensayo De Compresión



ENSAYO DE TRACCIÓN

Un cuerpo se encuentra sometido a tracción simple cuando sobre sus secciones transversales se le aplican cargas normales uniformemente repartidas y de modo de tender a producir su alargamiento.

Por las condiciones de ensayo, el de tracción estática es el que mejor determina las propiedades mecánicas de los metales, o sea aquella que definen sus características de resistencia y deformabilidad. Permite obtener, bajo un estado simple de tensión, el límite de elasticidad o el que lo reemplace prácticamente, la carga máxima y la consiguiente resistencia estática, en base a cuyos valores se fijan los de las tensiones admisibles o de proyecto (sadm.) y mediante el empleo de medios empíricos se puede conocer el comportamiento del material sometidos a otro tipo de sollicitaciones (fatiga, dureza, etc.). (García Alonso, M. D., Alonso, M. C., Andrade Perdrix, M. C., & Rodríguez Santiago, J. 1998).



Figura 5: Ensayo De Tracción



1.1.3.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN NO DESTRUCTIVOS

La denominación de Métodos de Ensayos No Destructivos (END), viene específicamente de pruebas que se realizan a los materiales, sin la necesidad de que sufran cambios en su forma, ni en sus propiedades.

Son Pruebas físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Estos métodos ayudan al proceso de mantención actual los cuales cumplen con las normas de cada industria en la producción.

Los datos que proveen estos métodos, son menos exactos acerca del estado de la variable a medir, pero suelen ser más baratos, ya que no implica una destrucción de la pieza a examinar. Estos ensayos se realizan bajo procedimientos estandarizados, los cuales atienden a los requisitos de normas o códigos de fabricación (ASME, ASTM, API Y AWS, entre otras).

La amplia aplicación de estos ensayos, se encuentran clasificadas en:

A) Según sus fundamentos: Se basa en uno de los siguientes fenómenos físicos:

1. Ondas electromagnéticas.
2. Ondas elásticas o acústicas.
3. Emisión de partículas subatómicas.
4. Otros fenómenos, como por ejemplo la capilaridad, estanqueidad, absorción, etc.

B) Según sus aplicaciones: Permiten estudiar defectos, hacer mediciones y caracterizar materiales:

1. **Defectología:** Permite la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales; determinación de tensiones y detección de fugas.
2. **Caracterización:** Evaluación características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales, propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas), transferencia de calor y trazado de isoterms.
3. **Metrología:** control de espesores, medidas de espesores por un solo lado, medida de espesores de recubrimiento; niveles de llenado.



C) Según el estado actual de desarrollo, se clasifican en:

- 1. Métodos convencionales de END.***
- 2. Métodos nuevos o no convencionales de END.***

Entre los métodos de ensayos no destructivos se pueden encontrar:

- ***Análisis de vibraciones***
- ***Termografía industrial***
- ***Partículas magnéticas***
- ***Líquidos penetrantes***
- ***Radiografía industrial***
- ***Ultrasonido***



ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Para empezar se puede dar una definición y características de la vibración. La vibración es el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio (White, G. 2009). Generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos como son: desequilibrio de elementos rotativos, desalineación en acoplamientos, engranajes desgastados o dañados, rodamientos deteriorados, fuerzas aerodinámicas o hidráulicas, y/o problemas eléctricos. Estas causas como se puede suponer son fuerzas que cambian de dirección o de intensidad, estas fuerzas son debidas al movimiento rotativo de las piezas de la máquina, aunque cada uno de los problemas se detecta estudiando las características de vibración.

Las características más importantes son: **frecuencia, desplazamiento, velocidad, aceleración, spike energy (energía de impulsos)**. La correspondencia entre cpm y rpm (ciclos por minuto-revoluciones por minuto) identificará el problema y la pieza responsable de la vibración. Esta relación es debida a que las fuerzas cambian de dirección y amplitud de acuerdo a la velocidad de giro. Los diferentes problemas son detectados por las frecuencias iguales a la velocidad de giro o bien múltiplos suyos. Cada tipo de problema muestra una frecuencia de vibración distinta.

La severidad de vibración es indicada de una forma más precisa midiendo la velocidad, aceleración o desplazamiento según el intervalo de frecuencias entre la que tiene lugar, así para bajas frecuencias, por debajo de 600 cpm, se toman medidas de desplazamiento. En el intervalo entre 600 y 60.000 cpm, se mide velocidad, y para altas frecuencia, mayores a 60.000 cpm, se toman aceleraciones.

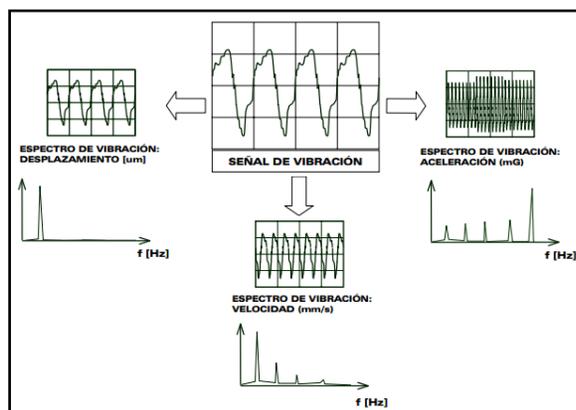


Figura 6: Señal De Vibración



TERMOGRAFÍA INDUSTRIAL

La Termografía infrarroja es una técnica que permite ver la temperatura de una superficie con precisión sin tener que tener ningún contacto con ella. Gracias a la Física podemos convertir las mediciones de la radiación infrarroja en mediciones de temperatura, esto es posible midiendo la radiación emitida en la porción infrarroja del espectro electromagnético desde la superficie del objeto, convirtiendo estas mediciones en señales eléctricas (Olarte, W., Botero, M., & Zabaleta, B. C. 2011).

El ser humano no es sensible a la radiación infrarroja emitida por un objeto, pero las cámaras termográficas, o de termovisión, son capaces de medir esta energía con sus sensores infrarrojos, capacitados para "ver" en estas longitudes de onda. Esto nos permite medir la energía radiante emitida por objetos y, por consiguiente, determinar la temperatura de una superficie a distancia, en tiempo real y sin contacto alguno. La radiación infrarroja es la señal de entrada que la cámara termográfica necesita para generar una imagen de un espectro de colores, en el que cada uno de los colores, según una escala, significa una temperatura distinta, de manera que la temperatura medida más elevada aparece en color blanco.

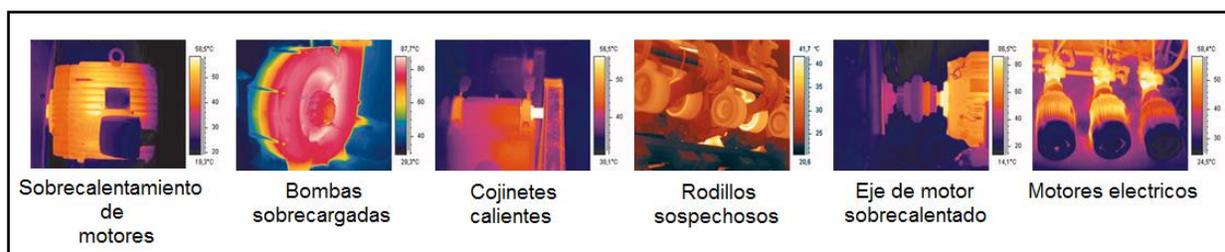


Figura 7: Imágenes Termográficas



PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Los materiales ferromagnéticos tales como muchos aceros desarrollan, cuando son magnetizados, un flujo magnético mucho mayor que en los materiales no magnéticos (Mazari, M. 1981).

Si existiera un defecto cerca de la superficie se produce un escape de este flujo, llamado ***campo de fuga***, en el espacio cercano a la superficie de la pieza como se muestra en la siguiente figura.

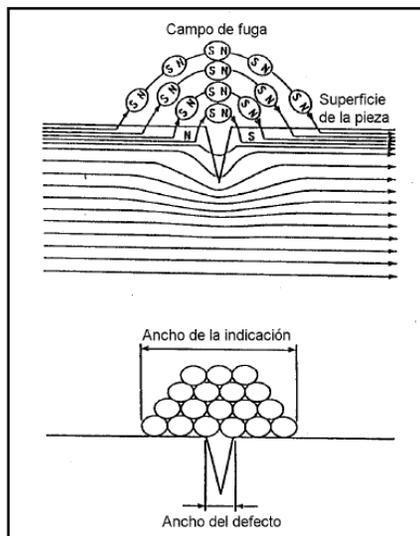


Figura 8: Campo De Fuga

Así este método puede localizar defectos superficiales y/o subsuperficiales por la detección del campo de fuga.

El ensayo por partículas magnéticas es el método más útil de inspección para determinar si hay defectos superficiales y/o subsuperficiales en el objeto. Es posible detectar con bastante seguridad discontinuidades de un milímetro de longitud, por lo que ha sido ampliamente usado en aceros. Desafortunadamente no es posible estimar la profundidad de las indicaciones que es la información más importante cuando se quiere evaluar la vida de un producto. Se puede obtener información cuantitativa usando ensayos de escape del campo magnético, pero esta aplicación está confinada a piezas con geometría simple.



LÍQUIDOS PENETRANTES

Cuando se quiere detectar defectos muy finos, se los debe magnificar con un método apropiado para su visualización (Aditivos, S. 1997). En el ensayo de líquidos penetrantes las indicaciones se magnifican debido a la capacidad de absorción del revelador (pequeñas partículas que se aplican sobre la superficie de la pieza) que actúa sobre el penetrante que ha quedado retenido en las discontinuidades, y extrayéndolo a la superficie. Se puede luego observar fácilmente la indicación del defecto usando ya sea penetrantes coloreados o fluorescentes.

Las 5 etapas siguientes se ejecutan en el ensayo de líquidos penetrantes:

1. **Limpieza inicial:** Se remueve la suciedad de la superficie de la pieza y del interior de los defectos.
2. **Penetración:** Se aplica un penetrante (líquido con alta capilaridad) sobre la pieza a ser examinada y se lo deja penetrar dentro de los defectos.
3. **Limpieza intermedia:** Se remueve el exceso de penetrante de la superficie de la pieza.
4. **Revelado:** Se aplica un revelador blanco a la superficie de la pieza que extrae el penetrante de los defectos.
5. **Observación:** Se observan las indicaciones de los defectos bajo luz natural en el caso de los penetrantes coloreados o usando luz negra en el caso de los penetrantes fluorescentes.

La siguiente figura muestra un ejemplo de la detección de un defecto abierto a la superficie.

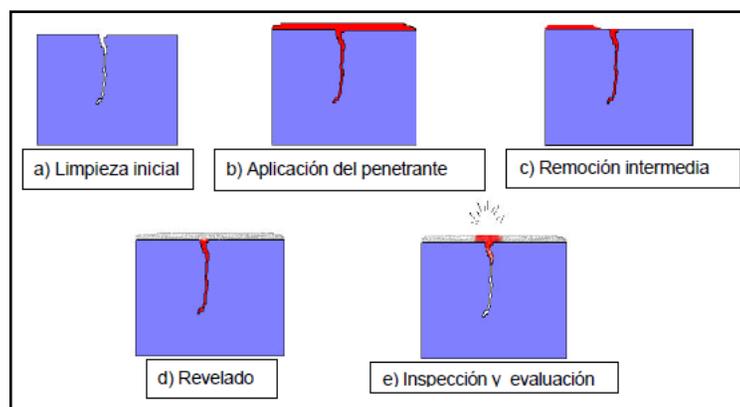


Figura 9: Etápas De Inspección Por Líquidos Penetrantes



RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

La radiografía industrial es un método no destructivo para inspeccionar piezas u objetos, en búsqueda de discontinuidades o defectos especialmente internos. El método se basa en la mayor o menor transparencia a los **rayos X** o **rayos Gamma** de los materiales según su naturaleza y espesor. La radiación atraviesa el material siendo absorbida parcialmente por él y emerge con distintas intensidades las que son interceptadas por un film fotográfico. Luego del procesado de la película, se evalúa la imagen y los defectos (de la Vega Muñoz, C. A. 1989).

En el ensayo radiográfico se usan principalmente los rayos X y los rayos Gamma que son ondas electromagnéticas que tienen casi las mismas propiedades físicas, pero difieren en su origen. Estos rayos tienen la capacidad de penetrar los objetos, y su penetrabilidad depende del tipo de material, espesor, densidad del objeto, y la de la existencia de defectos en la pieza. El ensayo radiográfico es el método para examinar defectos y se basa en el cambio en la intensidad de los rayos X emergentes de la pieza usando como medio de registro un film o un sistema de TV de rayos X.

La siguiente figura muestra un esquema de un ensayo radiográfico.

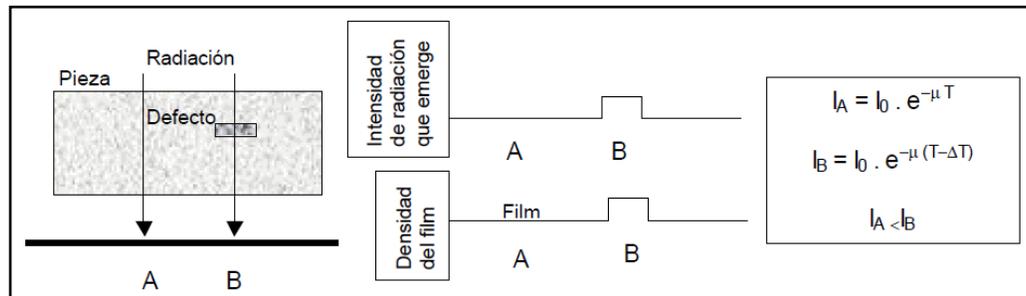


Figura 10: Principio De La Radiación

Donde:

I: Intensidad de radiación (I_A, I_B : emergentes en A y B respectivamente. I_0 : incidente)

μ : Coeficiente de absorción

T: Espesor de la pieza

ΔT : Espesor del defecto



ULTRASONIDO

Ultrasonido es el nombre dado al estudio y aplicación de ondas sónicas que se transmiten a frecuencias mayores que las que pueden ser detectadas por el oído humano, arriba de 20,000 Hz (ciclos por segundo). En las pruebas ultrasónicas por contacto, el rango de frecuencias comúnmente usado es de 2.25 a 10 MHz. En algunos casos particulares se emplean frecuencias debajo de este rango, y para métodos de inmersión, las frecuencias pueden ser de hasta 30 MHz (Martínez Rodríguez, J. A., Vitola Oyaga, J., & Sandoval Cantor, S. D. P. 2007).

A frecuencias mayores a 100,000 ciclos/segundo, y gracias a su energía, el ultrasonido forma un haz, similar a la luz, por lo que puede ser utilizado para rastrear el volumen de un material.

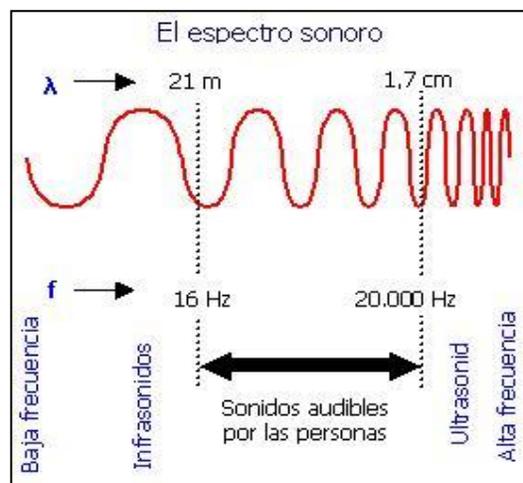


Figura 11: Espectro Sonoro

Un haz ultrasónico cumple con algunas reglas físicas de óptica por lo que puede ser reflejado, refractado, difractado y absorbido. (Jiménez, J. 2008).

Por principio, el ultrasonido puede propagarse a través de todos los medios donde existe materia capaz de vibrar, por lo que se propaga a través de sólidos, líquidos y gases. Por el contrario, no puede propagarse en el vacío, por no existir materia que lo sustente. El movimiento que presente es extremadamente pequeño, al desplazamiento máximo de un átomo desde su posición original se conoce como amplitud. La prueba por ultrasonido emplea esfuerzos de baja amplitud los cuales no afectan permanentemente a los materiales.



CAPÍTULO II:

ELASTICIDAD DE LOS

MATERIALES

*“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino
como una oportunidad para penetrar en el bello
y maravilloso mundo del saber”.*

Albert Einstein (1879-1955); físico y matemático.



2.1 ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES

(París, F., Cañas, J., Marín, J. C., & Barroso, A. R. D. 2006).

La Teoría de Elasticidad no es la explicación física de la elasticidad, sino que estudia la respuesta de un modelo de material llamado sólido elástico al ser aplicadas cargas o imponerse desplazamientos superficiales.

Por respuesta se entiende alguno de los siguientes campos: campo de esfuerzos, campo de deformaciones unitarias, campo de los desplazamientos. Se expresan como juego de funciones de posición y tiempo en términos de fuerzas internas, deformaciones locales y desplazamiento de partículas.

La Teoría de Elasticidad es una teoría del medio continuo. Por fuerzas internas no se entienden fuerzas atómicas, moleculares o aún entre cristales. Se trata de fuerzas entre elementos macroscópicos con dimensiones pequeñas en relación con aquellas típicas del sólido considerado, pero grandes en comparación con las dimensiones típicas de los cristales. Los términos deformaciones locales y desplazamientos de partículas están referidos a estos elementos macroscópicos.

Debido a la complejidad de los materiales reales, expresable en un amplio rango de propiedades, los intentos de estudio las reducen en grupos organizados a través de modelos que describen el comportamiento de un material ideal.

La Teoría de Elasticidad trata como material ideal al sólido perfectamente elástico. Desde un estado inicial sin cargas ni fuerzas internas, llega a un estado final deformado por aplicación cuasi-estática de un juego de cargas. Se puede llegar al mismo estado final por diferentes juegos de cargas que hacen el mismo trabajo. Además, este trabajo es totalmente recuperado en cualquier retorno a su estado inicial por una lenta remoción de las cargas. Esta es la definición de un sólido elástico ideal.



Aunque no existen sólidos reales con este comportamiento, a muchos se les reconoce un rango elástico en donde se comportan esencialmente de la manera descrita. Este rango varía según el material y las condiciones (en el caucho sin vulcanizar este rango llega las grandes deformaciones, en el acero sólo alcanza a las muy pequeñas). En este último caso, el más común, se ha encontrado que la deformación crece de manera proporcional a la carga. La teoría clásica de elasticidad lineal trata con una relación lineal homogénea entre esfuerzos y muy pequeñas deformaciones unitarias.

La elasticidad, es la propiedad mecánica que hace que los materiales sufran deformaciones reversibles por la acción de las fuerzas exteriores que actúan sobre ellos. La deformación, es la variación de forma y dimensión de un cuerpo. Un material es elástico cuando la deformación que sufre ante la acción de una fuerza, cesa al desaparecer la misma.

Los materiales totalmente elásticos pueden llegar hasta cierta deformación máxima, es lo que se conoce como límite elástico. Si se sobrepasa este límite, la deformación del material es permanente y sus propiedades cambian. Si el *esfuerzo* que incide sobre el material supera las fuerzas internas de cohesión, el material se fisura y termina por fallar.

Figura con los estados de deformación de un material.

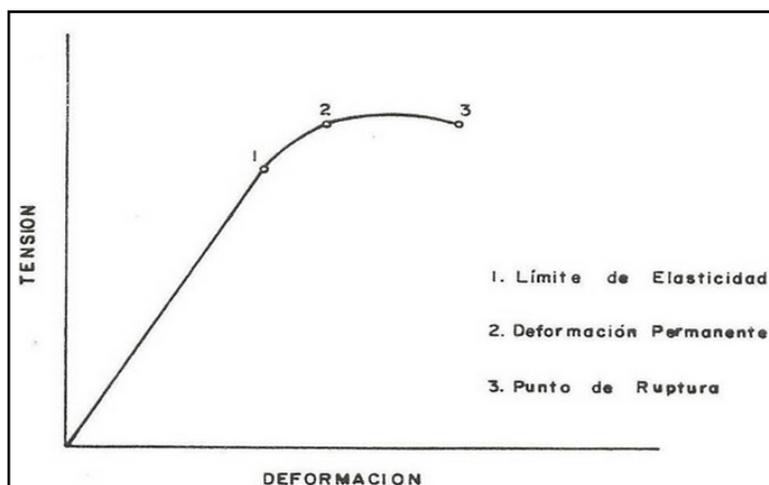


Figura 12: Estados De Deformación



2.1.1 PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LOS MATERIALES

(Tascón Mosquera, D. J., & Ruíz Giraldo, A. F. 2013)

Para entender que son las constantes elásticas de los materiales, es necesario representar la teoría de la elasticidad en modelos sencillos o simples de esfuerzo-deformación, para ver de primera manera, en que consiste cada constante, como se comporta y que representa, se analizan los siguientes casos:

2.1.1.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD

Aunque los materiales no son perfectamente elásticos, aun para deformaciones pequeñas, el llamado modelo del resorte, es una idealización de un comportamiento perfectamente elástico, este es utilizado para el estudio de las propiedades elásticas de muchos materiales.

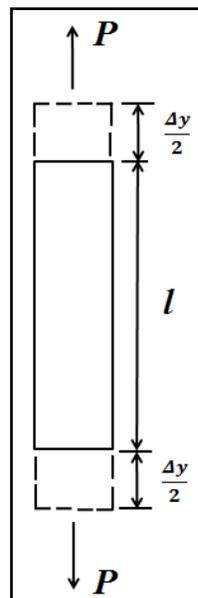


Figura 13: Deformación Bajo Esfuerzo Uniaxial

La relación de desplazamiento de un resorte elástico lineal está dada por la ecuación:

$$P = k\Delta y \quad (1)$$



Donde:

P : Carga

Δy : Desplazamiento

k : Constante del resorte (determinado experimentalmente)

Un ejemplo más específico del comportamiento elástico es tomar como modelo una barra de un material elástico de longitud l y sección transversal constante de área A . Si la barra es traccionada en uno de sus extremos por una fuerza P , se genera una fuerza igual y opuesta en el otro extremo de la barra.

La fuerza se asume uniformemente distribuida sobre toda el área transversal A y permanece constante a lo largo de la longitud de la barra. El cambio de longitud de la barra Δy es el resultado de la fuerza P descrita por la ecuación (1). Para propósitos de comparación, la fuerza y el desplazamiento son usualmente expresados sobre una unidad base. Esta normalización conduce a los conceptos de esfuerzo y deformación. Entonces, dividiendo ambos lados de la ecuación (1) por A y l ; y reordenando se tiene:

$$\frac{P}{A} = \frac{kl}{A} \frac{\Delta y}{l} \quad (2)$$

La carga normalizada P/A es por definición el esfuerzo normal σ y el desplazamiento normalizado es la deformación normal ε , por lo tanto:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{l} \quad (4)$$

Donde ε es una cantidad adimensional. Por lo tanto, la ecuación (2) puede ser escrita como:



$$\sigma = \frac{kl}{A} \varepsilon \quad (5)$$

Graficas experimentales de σ v/s ε conducen a una línea recta para pequeñas deformaciones, donde la pendiente es la constante de proporcionalidad. Esta constante de proporcionalidad es llamada *Módulo de elasticidad* o *Módulo de Young* y se le asigna comúnmente el símbolo E . como consecuencia, la ecuación (5) puede ser escrita como:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{kl}{A} \quad (6)$$

2.1.1.2 MÓDULO DE RIGIDEZ

Cuando una fuerza es aplicada paralela al plano del área, como lo muestra la figura 14, es llamada fuerza de corte y la correspondiente deformación, es la deformación de corte.

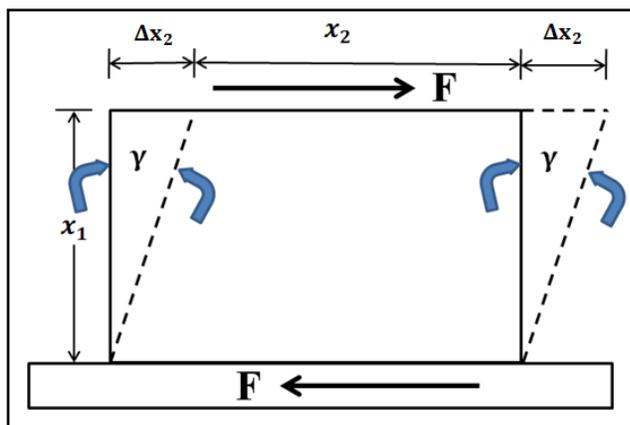


Figura 14: Deformación De Un Cubo Bajo Una Fuerza De Corte

La fuerza de corte puede ser relacionada con la deformación de corte por una constante de proporcionalidad q en un material elástico lineal:

$$F = q\Delta x_2 \quad (7)$$



Donde:

F : Carga

Δx_2 : Desplazamiento

q : Constante de proporcionalidad (determinado experimentalmente)

Se define el esfuerzo de corte τ dividiendo la fuerza de corte por el área sobre la cual actúa:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (8)$$

La deformación de corte γ es definido como la tangente del ángulo de distorsión. De la figura 14, se tiene que $\tan \gamma = \Delta x_2/x_1$. Si las distorsiones son pequeñas, se producirán mínimos errores en aproximar la $\tan \gamma$ a γ en radianes ($\tan \gamma \approx \gamma$)

$$\gamma = \frac{\Delta x_2}{x_1} \quad , \quad \Delta x_2 = \gamma x_1 \quad (9)$$

La deformación de corte γ es adimensional. Substituyendo las expresiones para F y Δx_2 dentro de la ecuación (7) se tiene que:

$$\tau = \frac{qx_1}{A} \gamma \quad (10)$$

La expresión qx_1/A es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la deformación de corte y se le denomina comúnmente *Módulo de Rigidez*, denotado por G .

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{qx_1}{A} \quad (11)$$



2.1.1.3 RAZÓN DE POISSON

Otro efecto importante de discutir es el llamado efecto de Poisson. Cuando se habla de las deformaciones que están en la dirección de la fuerza se denominan deformaciones directas, mientras que aquellas que se producen perpendicularmente a la dirección de la fuerza se denominan deformaciones indirectas.

Si una fuerza F se aplica en una barra de longitud x_1 y ancho x_2 , esta se elongará en un Δx_1 y se contraerá un Δx_2 , como se muestra en la figura 15. Las deformaciones resultantes serán entonces $\varepsilon_1 = \Delta x_1 / x_1$ y $\varepsilon_2 = \Delta x_2 / x_2$. El cociente entre la deformación directa y una indirecta se denomina *Razón de Poisson* y es denotada como ν_{ij} .

Entonces, en términos generales:

$$\nu_{ij} = \frac{\varepsilon_{jj}}{\varepsilon_{ii}} \quad (12)$$

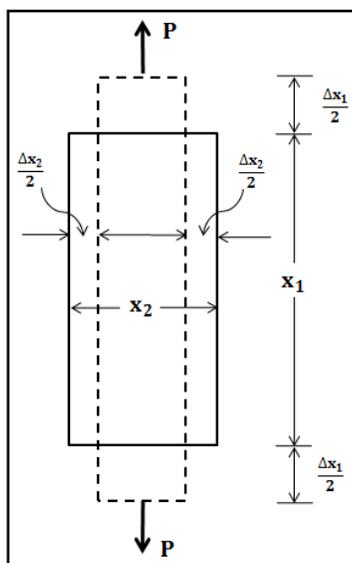


Figura 15: Efecto Poisson En Barra Cargada Uniaxialmente



Las relaciones esfuerzo-deformación uniaxial y unidimensional pueden ser un caso especial de la ley de Hooke generalizada. Esta ley que relaciona el esfuerzo y la deformación es un caso especial de una clase general de ecuaciones conocidas como relaciones constitutivas. Todos los posibles componentes del esfuerzo y la deformación son incluidos primero, para luego simplificarlas utilizando leyes físicas para algún tipo de material. Finalmente, suposiciones relacionadas a la simetría son introducidas para obtener una descripción más detallada del material.

Muchos materiales poseen una organización interna que ayuda a simplificar las ecuaciones de esfuerzo-deformación. Por ejemplo, algunos compuestos de madera, hueso, paneles y otros materiales son ortotrópicos, es decir, son simétricos alrededor de sus 3 planos mutuamente perpendiculares. Por otro lado las ecuaciones se simplifican aún más en materiales isotrópicos, cuyas constantes son iguales en cualquier dirección de análisis, como en el caso del hormigón y los metales.

En la siguiente tabla se muestran los valores de las constantes elásticas de algunos materiales isotrópicos usados con mayor frecuencia en la industria.

Tabla 2: Constantes Elásticas De Materiales Isotrópicos

(Budynas R. G., Nisbett J. K. 2008)

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de rigidez G		Relación de Poisson ν	Peso unitario w		
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lb/pulg ³	lb/ft ³	kN/m ³
<u>Aluminio (todas las aleaciones)</u>	10.3	<u>71.0</u>	3.80	<u>26.2</u>	<u>0.334</u>	0.098	169	26.6
Cobre al berilio	18.0	124.0	7.0	48.3	0.285	0.297	513	80.6
Latón	15.4	106.0	5.82	40.1	0.324	0.309	534	83.8
<u>Acero al carbono</u>	30.0	<u>207.0</u>	11.5	<u>79.3</u>	<u>0.292</u>	0.282	487	76.5
Fundición de hierro (gris)	14.5	100.0	6.0	41.4	0.211	0.260	450	70.6
Cobre	17.2	119.0	6.49	44.7	0.326	0.322	556	87.3
Abeto Douglas	1.6	11.0	0.6	4.1	0.33	0.016	28	4.3
Vidrio	6.7	46.2	2.7	18.6	0.245	0.094	162	25.4
Inconel	31.0	214.0	11.0	75.8	0.290	0.307	530	83.3
Plomo	5.3	36.5	1.9	13.1	0.425	0.411	710	111.5
Magnesio	6.5	44.8	2.4	16.5	0.350	0.065	112	17.6
Molibdeno	48.0	331.0	17.0	117.0	0.307	0.368	636	100.0
Metal Monel	26.0	179.0	9.5	65.5	0.320	0.319	551	86.6
Níquel plata	18.5	127.0	7.0	48.3	0.322	0.316	546	85.8
Acero al níquel	30.0	207.0	11.5	79.3	0.291	0.280	484	76.0
<u>Bronce fosforado</u>	16.1	<u>111.0</u>	6.0	<u>41.4</u>	<u>0.349</u>	0.295	510	80.1
<u>Acero inoxidable (18-8)</u>	27.6	<u>190.0</u>	10.6	<u>73.1</u>	<u>0.305</u>	0.280	484	76.0



2.2.1 LEY DE HOOKE GENERALIZADA

Esfuerzos

Para avanzar en el estudio de los materiales que se analizarán más adelante dentro de este informe, es necesario conocer cómo se comporta el esfuerzo concentrado en un punto, el cual a su vez representa el estado de tensiones presentes en dicho material. Para ello se ve en la siguiente figura las componentes de los esfuerzos en un pequeño elemento.

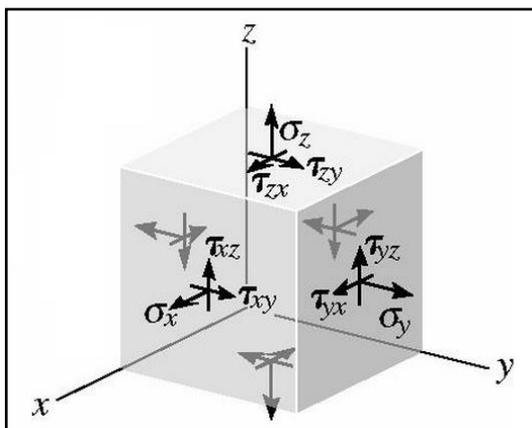


Figura 16: Componentes De Esfuerzo Sobre Un Sistema Coordinado

De esta figura, se notan las 18 componentes de esfuerzo que tiene un pequeño cuerpo, donde σ representa las componentes de esfuerzo normal, y τ las componentes de esfuerzo cortante. Por otro lado el primer subíndice indica la superficie sobre la cual actúa el esfuerzo, y el segundo subíndice indica la dirección del esfuerzo.

Como el cubo se encuentra en estado de equilibrio (estático), las componentes se van reduciendo dado que:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad \text{Donde } i=1, 2,3 \text{ e } i \neq j \quad (13)$$

Los esfuerzos que actúan en caras opuestas también son iguales por pares, es decir que el esfuerzo normal en la dirección x será igual ya sea en su dirección positiva como negativa.



Deformaciones

Avanzando en materia, y ya expresado el estado de tensiones que posee un cuerpo, se sigue con el estudio de la deformación, el cual puede ser representado en las mismas tres dimensiones anteriormente utilizadas.

La teoría de sólidos demuestra que las deformaciones pueden ser descritas por el siguiente tensor de deformaciones:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

Donde $\partial u_i / \partial x_j$ es la deformación de dirección \mathbf{i} de un esfuerzo aplicado en dirección \mathbf{j} .

Y teniendo la forma general del tensor de deformaciones, podemos representar cada deformación en su respectiva dirección. Si utilizamos el sistema coordenado $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$, tenemos lo siguiente:

$$\varepsilon_{ij} \Rightarrow \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \Rightarrow \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{ij} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{array} \right. \quad (16)$$

Donde:

$\mathbf{u}_i = (u_x, u_y, u_z) = (u, v, w)$ representa el campo vectorial de desplazamientos del cuerpo, es decir, la diferencia entre la posición final e inicial de cada punto.

$\mathbf{x}_i = (x, y, z)$ son las coordenadas de cada punto material del cuerpo.



Las componentes del *tensor infinitesimal Green-Cauchy* admiten interpretaciones físicas relativamente simples:

El elemento diagonal ϵ_{ii} , también denotado ϵ_i , representa los cambios relativos de longitud en la dirección \hat{i} , dirección dada por el eje x_i . La suma $\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$ es igual al cambio de volumen relativo del cuerpo.

Los elementos γ_{ij} representan deformaciones angulares, más concretamente la variación del ángulo recto entre las direcciones ortogonales \hat{i} y \hat{j} . Por tanto la distorsión o cambio de forma viene caracterizada por 3 componentes de este tensor de deformación (γ_{xy} , γ_{xz} , γ_{yz}).

Ley generalizada de Hooke

Un medio se dice que es elástico si posee un estado natural, en el cual esfuerzos y deformaciones son cero, y al cual se puede volver luego de que las fuerzas aplicadas son removidas.

Bajo cargas aplicadas, los esfuerzos y las deformaciones cambian juntos, y las relaciones entre estos, denominadas *relaciones constitutivas*, son una importante característica de los medios. Estas relaciones constitutivas iniciaron su desarrollo hace más de 300 años atrás, con las determinaciones experimentales desarrolladas por **Robert Hooke** sobre cuerpos elásticos. Hooke concluyó que el esfuerzo es proporcional a la deformación.

La forma moderna de la *Ley de Hooke Generalizada* establece que cada componente del tensor de tensiones es una combinación lineal de todos los componentes del tensor de deformación.

Esta ley de Hooke puede ser vista de dos formas, una en la cual las deformaciones son una función lineal de los esfuerzos y un conjunto de parámetros llamados *coeficientes de cedencia* o los esfuerzos como una función lineal de la deformación y un conjunto de parámetros llamados *coeficientes de elasticidad*. Ambas formas son igualmente válidas.



La forma tensorial de la ley de Hooke es una descripción matemática la cual conecta 9 componentes del esfuerzo σ_{ij} para 9 componentes de la deformación ε_{ij} . En esta forma, 81 coeficientes de elasticidad y 81 coeficientes de cedencia son identificados.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (18)$$

Donde:

σ_{ij} : Componentes del esfuerzo, tan normal como de corte

ε_{ij} : Componentes de la deformación, tanto normal como de corte

C_{ijkl} : Tensor de elasticidad, es decir, parámetro de proporcional.

S_{ijkl} : Tensor de cedencia, es decir, parámetro de proporcional.

i, j, k, l : índice de coordenadas, cada uno puede alcanzar independientemente los valores de x, y, z.

Simetría del tensor de esfuerzos

Si se considera la simetría del tensor de esfuerzos $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, se puede establecer la siguiente simetría del tensor C_{ijkl} :

$$C_{ijkl} = C_{jikl} \quad (19)$$

Simetría del tensor de deformaciones

Análogamente al caso anterior, si se considera la simetría del tensor de deformaciones $\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk}$, se puede establecer la siguiente simetría del tensor C_{ijkl} :

$$C_{ijkl} = C_{ijlk} \quad (20)$$



Considerando ambos casos, la simetría del tensor de esfuerzos y la simetría del tensor de deformaciones, el número de constantes elásticas independientes del tensor C_{ijkl} se reduce a 36.

Ahora entonces se puede expresar ambas matrices de la siguiente forma:

Matriz de elasticidad

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{xxxx} & C_{xyxy} & C_{xxzz} & C_{xxxy} & C_{xxxz} & C_{xyyz} \\ C_{yyxx} & C_{yyyy} & C_{yyzz} & C_{yyxy} & C_{yyxz} & C_{yyyz} \\ C_{zzxx} & C_{zzyy} & C_{zzzz} & C_{zzxy} & C_{zzxz} & C_{zzyz} \\ C_{xyxx} & C_{xyyy} & C_{xyzz} & C_{xyxy} & C_{xyxz} & C_{xyyz} \\ C_{xzxx} & C_{xzyy} & C_{xzzz} & C_{xzxy} & C_{xzxz} & C_{xzyz} \\ C_{yzxx} & C_{yzyy} & C_{yzzz} & C_{yzxy} & C_{yzxz} & C_{yzyz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \quad (21)$$

Tal y como se ve la matriz de elasticidad se torna un tanto engorrosa para efecto de lectura, es por ello que se pueden simplificar los términos de x,y,z de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Donde:

$(xx = 1); (yy = 2); (zz = 3); (xy = yx = 4), (xz = zx = 5) \text{ y } (yz = zy = 6)$



Matriz de cedencia

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{34} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} \quad (23)$$

Simetría de la matriz de elasticidad

Adicionalmente a lo anterior, se considera el argumento termodinámico de la existencia de una función de energía interna por unidad de volumen. La existencia de esta función podría establecerse a partir de la primera ley de la termodinámica, que relaciona el cambio de la energía interna de un cuerpo (ya sea cinética o de deformación), con el trabajo hecho sobre él (mecánico o de calentamiento). Para el caso de procesos adiabáticos o isotérmicos, la **función de energía de deformación** puede establecerse como:

$$W = \frac{1}{2} C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (24)$$

Esta función posee la propiedad de $\partial W / \partial \varepsilon_{ij} = \sigma_{ij} = C_{ijpq} \varepsilon_{pq}$, lo cual implica la siguiente simetría del tensor C_{ijkl} :

$$C_{ijkl} = C_{klij} \quad (25)$$

Ahora la matriz de elasticidad queda de la siguiente forma:

$$C_{ijkl} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{pmatrix} \quad (26)$$



Para el caso de materiales isotrópicos los cuales presentan el mismo comportamiento mecánico en cualquier dirección del estímulo alrededor de un punto, la matriz se reduce aún más, quedando solo 3 constantes independientes, por lo tanto, la matriz será de la siguiente forma:

$$C_{ijkl} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{pmatrix} \quad (27)$$

2.2.1.1 LEY DE HOOKE EN MATERIALES ISOTRÓPICOS

Una constante elástica es cada uno de los parámetros físicamente medibles que caracterizan el comportamiento elástico de un sólido deformable elástico. A veces se usa el término constante elástica también para referirse a los coeficientes de rigidez de una barra o placa elástica.

Un sólido elástico lineal e isótropo queda caracterizado sólo mediante dos constantes elásticas. Aunque existen varias posibles elecciones de este par de constantes elásticas, las más frecuentes en ingeniería estructural son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson (otras constantes son el módulo de rigidez, el módulo de compresibilidad, y los coeficientes de Lamé).

Los materiales elásticos homogéneos e isótropos son los que presentan el mismo comportamiento mecánico para cualquier dirección de estiramiento alrededor de un punto. Así por ejemplo dado un ortoedro de un material homogéneo e isótropo, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson son los mismos, con independencia de sobre qué par de caras opuestas se ejerza un estiramiento.

Debido a esa propiedad puede probarse que el comportamiento de un material elástico homogéneo isótropo queda caracterizado por sólo dos constantes elásticas.



En diversos campos son comunes las siguientes elecciones de las constantes:

- En ingeniería estructural. La elección más frecuente es el módulo elástico longitudinal y el coeficiente de Poisson (E, ν) [a veces también se usa la elección equivalente (E, G)].
- En termodinámica de sólidos deformables resulta muy útil escoger el par (K, G) formado por el módulo de compresibilidad (isotérmica) K y el módulo elástico transversal G .
- Coeficientes de Lamé (λ, μ) que también aparecen en el desarrollo de Taylor de la energía libre de Helmholtz.

Así tenemos un total de seis constantes elásticas comúnmente usadas: E, ν, K, G, λ y μ . Dos cualesquiera de ellas caracterizan completamente el comportamiento elástico, es decir, dado cualquier parámetro elástico de un material puede expresarse como función de dos cualesquiera de los parámetros anteriores. Obviamente, todos estos pares de constantes elásticas están relacionados entre sí, como se resume en la siguiente tabla:

Tabla 3: Relaciones Entre Constantes Elásticas (Material Isótropo Lineal)

	E : módulo de Young ν : coeficiente de Poisson	K : módulo de compresibilidad G : módulo de rigidez	λ : 1° coeficiente de Lamé μ : 2° coeficiente de Lamé
(E, ν)	-----	$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$ $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$	$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$ $\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$
(K, G)	$E = \frac{9KG}{3K + G}$ $\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$	-----	$\lambda = K - \frac{2G}{3}$ $\mu = G$
(λ, μ)	$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$ $\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$	$K = \lambda + \frac{2\mu}{3}$ $G = \mu$	-----



Expresadas en términos del módulo de Young y el coeficiente de Poisson las ecuaciones constitutivas son:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu)/E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu)/E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu)/E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} \quad (28)$$

Las relaciones inversas vienen dadas por:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} = \frac{E}{1+\nu} \begin{pmatrix} 1+\alpha & \alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 1+\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & \alpha & 1+\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \quad (29)$$

Donde: $\alpha = \frac{\nu}{1-2\nu}$



CAPÍTULO III:

ENSAYO DE TRACCIÓN

"En lo tocante a ciencia, la autoridad de un millar no es superior al humilde razonamiento de un hombre."

Galileo Galilei (1564-1642); astrónomo y físico italiano.



3.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

Los métodos anteriormente nombrados sirven para distintos usos, sin embargo, se usará en esta HP este ensayo para la obtención de los 3 módulos, ya sea por su simplicidad (información abundante) y/o por el alcance de la tecnología que tiene la universidad del Bio Bio.

El ensayo de tracción es la forma básica de obtener información sobre el comportamiento mecánico de los materiales. Mediante una máquina de ensayos se deforma una muestra o probeta del material a estudiar, aplicando la fuerza uniaxialmente en el sentido del eje de la muestra. A medida que se va deformando la muestra, se va registrando la fuerza (carga), llegando generalmente hasta la fractura de la pieza. Así pues, el resultado inmediato es una curva de carga frente al alargamiento, que transformados en tensión y deformación, en función de la geometría de la probeta ensayada, aportan una información más general (Lacalle, R., García, J., Álvarez, J. A., & Gutiérrez-Solana, F. 2009).

Durante el ensayo de tracción se puede ilustrar de inmediato, mediante la experiencia, las propiedades mecánicas de los materiales que se derivan a partir de esta actividad.

Los objetivos principales del ensayo de tracción son:

- Conocer cómo se fijan las condiciones de ensayo, cómo se realiza el ensayo y qué información se puede extraer a partir de los datos registrados.
- Saber cómo funciona una máquina de ensayos mecánicos y tener una visión de su potencial, versatilidad y posibilidades para caracterizar mecánicamente los materiales.

Para ello se trabajará con la máquina de ensayos mecánicos de marca **Zwick / Roell, modelo BT1-FB100TN** del laboratorio del departamento de ingeniería mecánica de la universidad del Bio Bio, con 100 kN de capacidad máxima de carga. Los ensayos a tracción se realizarán en probetas con forma de varillas cilíndricas metálicas.



3.1.1 FUNDAMENTO TEÓRICO

El ensayo de tracción tiene por objetivo definir la resistencia elástica, resistencia última y plasticidad del material cuando se le somete a fuerzas uniaxiales. Se requiere una máquina, prensa hidráulica por lo general, capaz de:

- a) Alcanzar la fuerza suficiente para producir la fractura de la probeta.
- b) Controlar la velocidad de aumento de fuerzas.
- c) Registrar las fuerzas, F , que se aplican y los alargamientos, ΔL , que se observan en la probeta.

La máquina de ensayo de tracción *Zwick / Roell, modelo BT1-FB100TN*, posee los componentes que se muestran en la Figura.

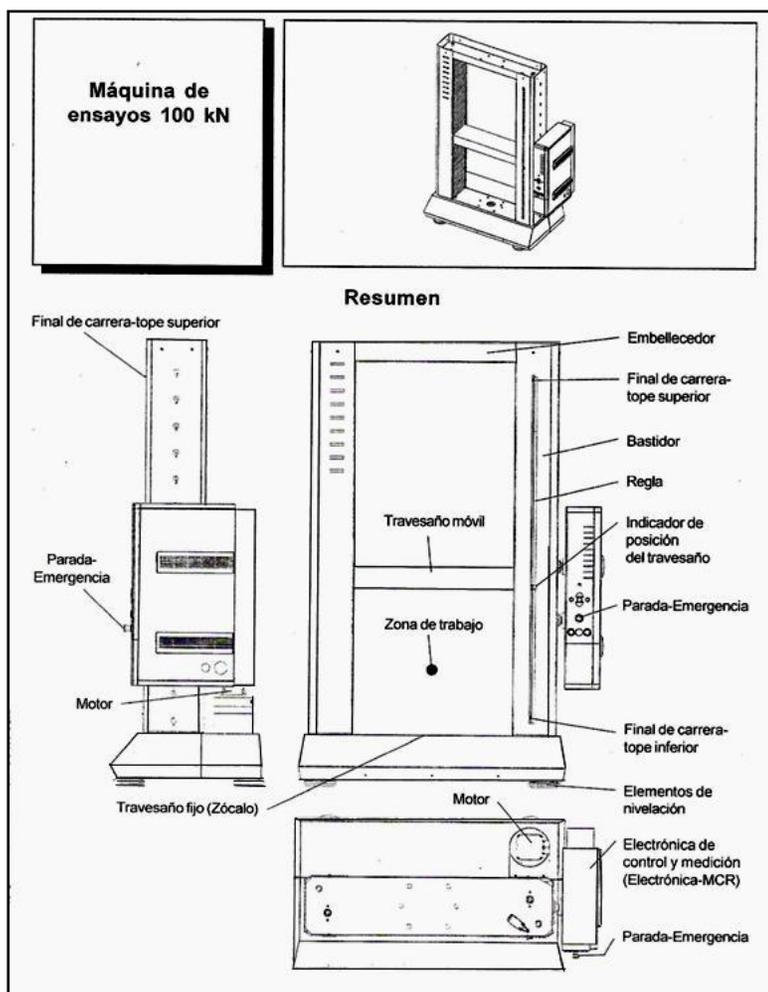


Figura 17: Máquina De Ensayo De Tracción



La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas están conectadas a un ordenador que registra el desplazamiento y la carga leída. Si representamos la carga frente al desplazamiento obtendremos una curva como la mostrada en la siguiente figura:

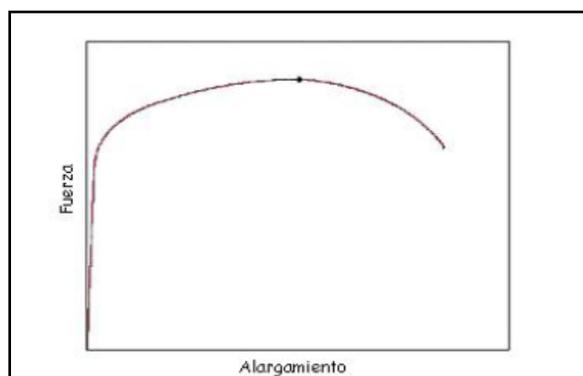


Figura 18: Fuerza V/S Alargamiento

La probeta a ensayar se sujeta por sus extremos al cabezal móvil de la máquina de ensayos y a la célula de carga, respectivamente. Las mordazas de sujeción deben mantener firme a la muestra durante el ensayo, mientras se aplica la carga, impidiendo el deslizamiento. A su vez, no deben influir en el ensayo introduciendo tensiones que causen la rotura en los puntos de sujeción. Para que el ensayo se considere válido la rotura debe ocurrir dentro de la longitud calibrada, en la parte central de la probeta.

A partir de las dimensiones iniciales de la probeta, se transforma la fuerza en tensión y el alargamiento en deformación, lo que permite caracterizar las propiedades mecánicas que se derivan de este ensayo.

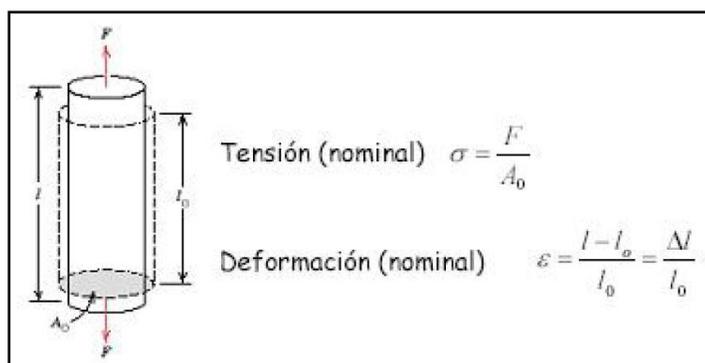


Figura 19: Cuerpo En Tensión



De tal forma que la curva típica sería tensión v/s deformación, tal y como se muestra en la siguiente figura

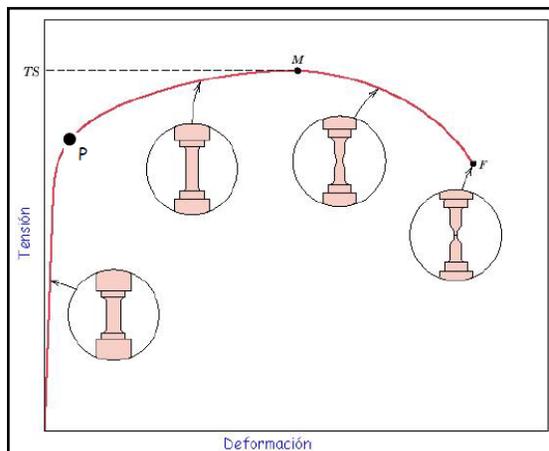


Figura 20: Tensión V/S Deformación

Curva típica de tracción hasta la fractura (punto F). La resistencia a la tracción TS está indicada en el punto M. Los insertos circulares representan la geometría de la probeta deformada en varios puntos de la curva.

En la curva se pueden distinguir dos regiones:

Zona elástica: La región a bajas deformaciones (hasta el punto **P**), donde se cumple la Ley de Hooke: $\sigma = E \varepsilon$ (E = módulo elástico).

Zona plástica: A partir del punto **P**. Se pierde el comportamiento lineal, el valor de tensión para el cual esta transición ocurre, es decir, se pasa de deformación elástica a plástica, donde σ_y , es el límite de elasticidad del material.

Después de iniciarse la deformación plástica, la tensión necesaria para continuar la deformación en los metales aumenta hasta un máximo, punto **M**, resistencia a tracción (**RT ó TS**), y después disminuye hasta que finalmente se produce la fractura, punto **F**. La resistencia a la tracción, es la tensión en el máximo del diagrama tensión-deformación nominales.



Esto corresponde a la máxima tensión que puede ser soportada por una estructura a tracción; si esta tensión es aplicada y mantenida, se producirá la rotura. Hasta llegar a este punto, toda la deformación es uniforme en la región estrecha de la probeta. Sin embargo, cuando se alcanza la tensión máxima, se empieza a formar una disminución localizada en el área de la sección transversal en algún punto de la probeta, lo cual se denomina *estricción*, y toda la deformación subsiguiente está confinada en la estricción. La *tensión de fractura* o bien de rotura corresponde a la tensión en la fractura.

DEFORMACIÓN ELÁSTICA

Se define elasticidad como la propiedad de un material en virtud de la cual las deformaciones causadas por la aplicación de una fuerza desaparecen cuando cesa la acción de la fuerza. "Un cuerpo completamente elástico se concibe como uno de los que recobra completamente su forma y dimensiones originales al retirarse la carga". ej: caso de un resorte al cual le aplicamos una fuerza.

El grado con que una estructura se deforma depende de la magnitud de la tensión impuesta. Para muchos metales sometidos a esfuerzos de tracción pequeños, la tensión y la deformación son proporcionales según la relación $\sigma = E \varepsilon$, esta relación se conoce con el nombre de *ley de Hooke*, y la constante de proporcionalidad, E (MPa) es el *módulo de elasticidad*, o *módulo de Young*.

Cuando se cumple que la deformación es proporcional a la tensión, la deformación se denomina deformación elástica; al representar la tensión en el eje de coordenadas en función de la deformación en el eje de abscisas se obtiene una relación lineal

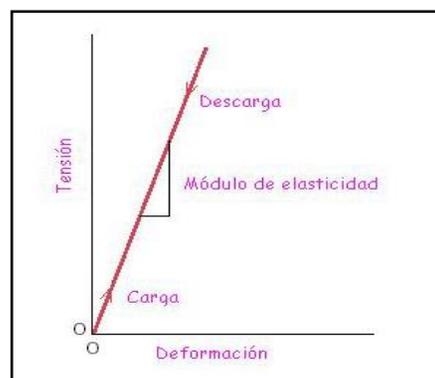


Figura 21: Deformación Proporcional A La Tensión



La pendiente de este segmento lineal corresponde al módulo de elasticidad E . Este módulo puede ser interpretado como la rigidez, o sea, la resistencia de un material a la deformación elástica. Cuanto mayor es el módulo, más rígido es el material, o sea, menor es la deformación elástica que se origina cuando se aplica una determinada tensión.

DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Se define como plasticidad a aquella propiedad que permite al material soportar una deformación permanente sin fracturarse. Todo cuerpo al soportar una fuerza aplicada trata de deformarse en el sentido de aplicación de la fuerza. En el caso del ensayo de tracción, la fuerza se aplica en dirección del eje de ella y por eso se denomina axial, la probeta se alargará en dirección de su longitud y se encogerá en el sentido o plano perpendicular. Aunque el esfuerzo y la deformación ocurren simultáneamente en el ensayo, los dos conceptos son completamente distintos.

Para la mayoría de los materiales metálicos, la deformación elástica únicamente persiste hasta deformaciones de alrededor de 0.005 %. A medida que el material se deforma más allá de este punto, la tensión deja de ser proporcional a la deformación y ocurre deformación plástica, la cual es permanente, es decir no recuperable. En la figura que sigue se traza esquemáticamente el comportamiento tensión-deformación en la región plástica para un metal típico. La transición elastoplástica es gradual para la mayoría de los metales; se empieza a notar cierta curvatura al comienzo de la deformación plástica, la cual aumenta rápidamente al aumentar la carga.

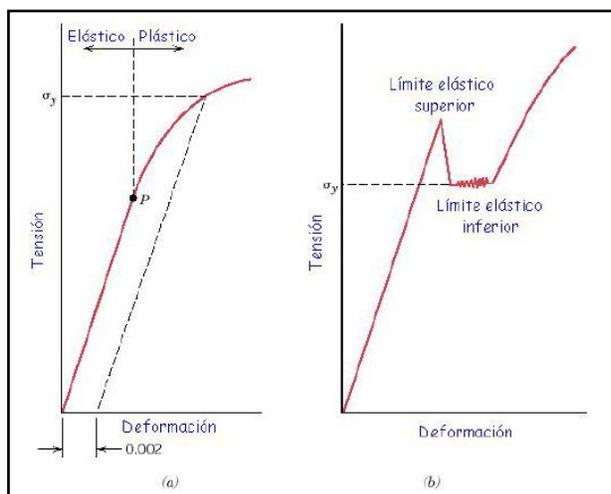


Figura 22: Elemento Elastoplástico



(a) curva de tracción típica de un metal que muestra las deformaciones elástica y plástica, el límite proporcional P y el límite elástico σ_y , determinado como la tensión para una deformación plástica del 0.002 %.

(b) Curva de tracción típica de algunos aceros que presentan el fenómeno de la discontinuidad de la fluencia.

CÁLCULO DEL LÍMITE ELÁSTICO

Para conocer el nivel de tensiones para el cual empieza la deformación elástica, o sea, cuando ocurre el fenómeno de *fluencia*, tenemos que tener en cuenta dos tipos de transición elastoplástica:

1.- Los metales que experimentan esta transición de forma gradual. El punto de fluencia puede determinarse como la desviación inicial de la linealidad de la curva tensión-deformación (punto P en la figura 20). En tales casos, la posición de este punto no puede ser determinada con precisión, por este motivo se ha establecido una convención por la cual se traza una línea recta paralela a la línea elástica del diagrama de la tensión-deformación desplazada por una determinada deformación, usualmente 0.002 %. La tensión correspondiente a la intersección de esta línea con el diagrama tensión-deformación cuando éste se curva se denomina *límite elástico* (σ_y).

2.- Para aquellos materiales que tienen una región elástica no lineal, la utilización del método anterior no es posible, y la práctica usual es definir el límite elástico como la tensión necesaria para producir una determinada deformación plástica.

La transición elastoplástica está muy bien definida y ocurre de forma abrupta y se denomina *fenómeno de discontinuidad del punto de fluencia*. En el límite de fluencia superior, la deformación plástica se inicia con una disminución de la tensión. La deformación prosigue bajo una tensión que fluctúa ligeramente alrededor de un valor constante, denominado punto de fluencia inferior. En los metales en que ocurre este fenómeno, el límite elástico se toma como el promedio de la tensión asociada con el límite de fluencia inferior, ya que está bien definido y es poco sensible al procedimiento seguido en el ensayo.



DUCTILIDAD

La ductilidad es otra importante propiedad mecánica. Es una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada hasta la fractura. Un material que experimenta poca o ninguna deformación plástica se denomina *frágil*.

La ductilidad puede expresarse cuantitativamente como *alargamiento relativo porcentual*, o bien *mediante el porcentaje de reducción de área*. El alargamiento relativo porcentual a rotura, **%EL**, es el porcentaje de deformación plástica a rotura, o bien

$$\%EL = \frac{(l_f - l_o)}{l_o} \times 100 \quad (30)$$

donde l_f es la longitud en el momento de la fractura y l_o es la longitud de prueba original.

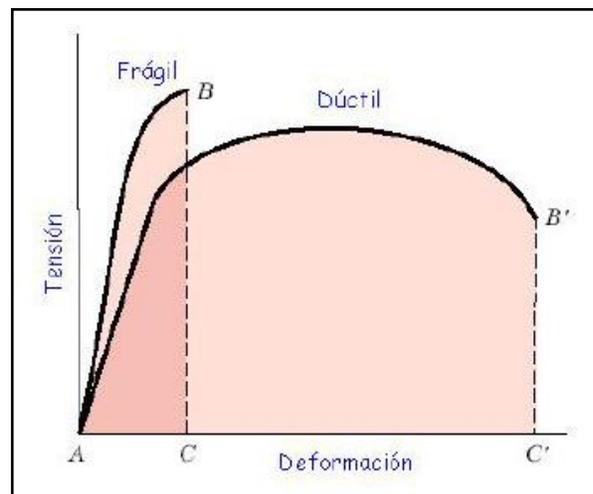


Figura 23: Frágil/Dúctil

Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles, y dúctiles ensayados hasta la fractura



TENACIDAD

La **tenacidad** de un material es un término mecánico que se utiliza en varios contextos; en sentido amplio, por ejemplo algunos la definen como la energía que absorbe un material, con las consecuentes deformaciones que el mismo adquiere, antes de romperse. Si se toman en cuenta un material determinado, y se habla de su resistencia a la compresión, al corte y a la flexión; se refiere a su capacidad de soportar esfuerzos y fuerzas aplicadas sin sufrir deformaciones permanentes, deterioros o roturas. Por lo tanto, la **resistencia mecánica** no contempla el daño irreparable de un objeto, mientras que en ese punto en particular se centra el estudio de la tenacidad.

RESILIENCIA

Se denomina resiliencia de un material a la energía de deformación (por unidad de volumen) que puede ser recuperada de un cuerpo deformado cuando cesa el esfuerzo que causa la deformación. La resiliencia es igual al trabajo externo realizado para deformar un material hasta su límite elástico.

En términos simples es la capacidad de memoria de un material para recuperarse de una deformación, producto de un esfuerzo externo. El ensayo de resiliencia se realiza mediante el Péndulo de Charpy, también llamado prueba Charpy.

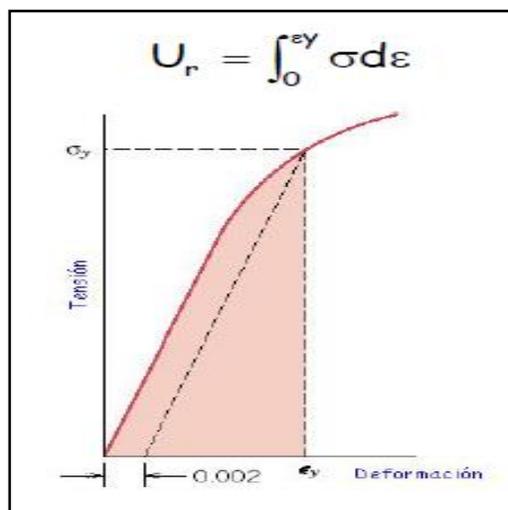


Figura 24: Resiliencia De Un Material



3.1.2 PROCEDIMIENTO UTILIZADO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

La máquina de ensayos universal **Zwick/Roell**, utiliza una interfaz generada por el programa **TestXpert II**, a través de un ordenador de escritorio conectado a la máquina **Zwick/Roell Modelo BT1-FB100TN**. El uso de un ordenador ofrece la posibilidad de generar informes, gestionarlos, además de guardarlos en el disco duro para ser utilizados con posterioridad. El encendido de la máquina de ensayos, responde a una cierta secuencia lógica de operaciones, que debe ser seguida de manera precisa, de tal manera que el encendido de la máquina **Zwick/Roell** no presente problemas.

La secuencia de encendido responde al siguiente orden:

a) Tanto la máquina de ensayos **Zwick/Roell** como el ordenador, deben encontrarse correctamente conectados a la alimentación eléctrica de 220V.

b) La máquina de ensayos **Zwick/Roell** debe encenderse girando el interruptor, ubicado en la parte exterior de la caja que contiene la electrónica.

c) Posterior al encendido de la máquina **Zwick/Roell**, debe encenderse el ordenador, permitiendo que carguen los programas de este. Dado esto se debe ejecutar el programa **TestXpert II**, el cual forma el nexo de comunicación entre la máquina de ensayos y el ordenador. Luego de ejecutado el programa, debe escucharse un leve chasquido en la parte trasera de la máquina **Zwick / Roell**, correspondiente a la puesta en marcha del sistema electrónico en resonancia con el ordenador. Pasados 1 a 2 minutos de la ejecución del programa, se debe presionar el botón **“ON”** (Figura 25), ubicado en la parte delantera de la máquina, encontrándose en ese momento apta para realizar ensayos.



Figura 25: Boton De Encendido



La máquina *Zwick/Roell*, posee 3 juegos de mordazas intercambiables en un cabezal de sujeción.

El uso de cada una de ellas radica en el tipo de probeta que se desee ensayar. Cada juego se compone de 3 insertos, los cuales deben ser colocados en las mordazas de apriete, el primer juego de mordazas es para lograr la sujeción de probetas entre 4-10 mm, el segundo juego es para la sujeción de probetas de un rango de 10-30 mm, el tercer juego está constituido por mordazas planas.

Para este ensayo se utilizará el juego de mordazas de rango 10-30 mm.



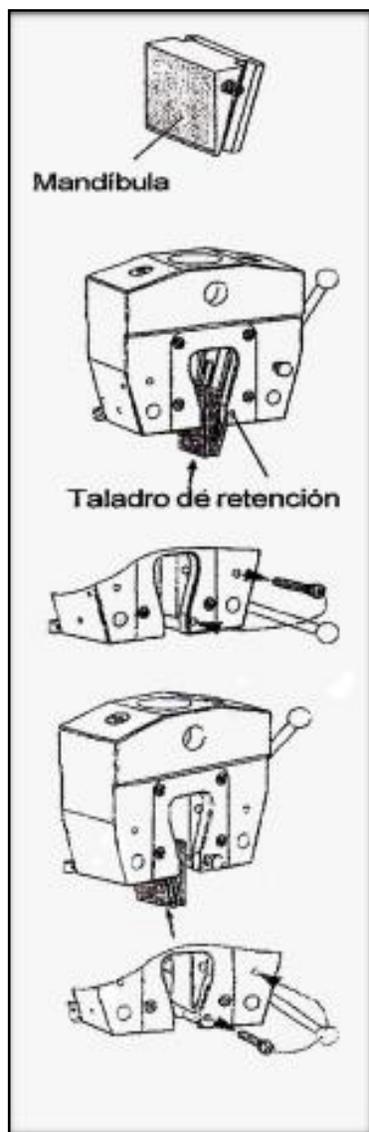
Figura 26: Máquina Zwick / Roell



Figura 27: Mordazas 10-30 Mm



Montaje de los insertos (Figura 28):



- a) Cierre las mordazas.
- b) Introducir la primera mandíbula en el lado del agujero de retención.
- c) Abra la mordaza. La mandíbula será arrastrada en la mordaza.
- d) Retire el bulón pasador del agujero de protección e introdúzcalo en el agujero de retención. Con ello se bloqueara la primera mandíbula.
- e) Cierre las mordazas.
- f) Introducir la segunda mandíbula en la mordaza.
- g) Abrir las mordazas.
- h) Retirar el bulón del agujero de retención e introducirlo nuevamente en el agujero de protección.
- i) Cierre las mordazas.
- j) Repetir la secuencia para la otra mordaza.

Figura 28: Insertos



Las probetas que se utilizarán en el laboratorio de la universidad, tendrán una geometría determinada según la norma *NCh 200 Of72*, estas deben prepararse en un torno, la superficie de la probeta no debe presentar rugosidades ni entallas. Respecto al cambio de sección debe generarse a través de un radio suave (Figura 29).

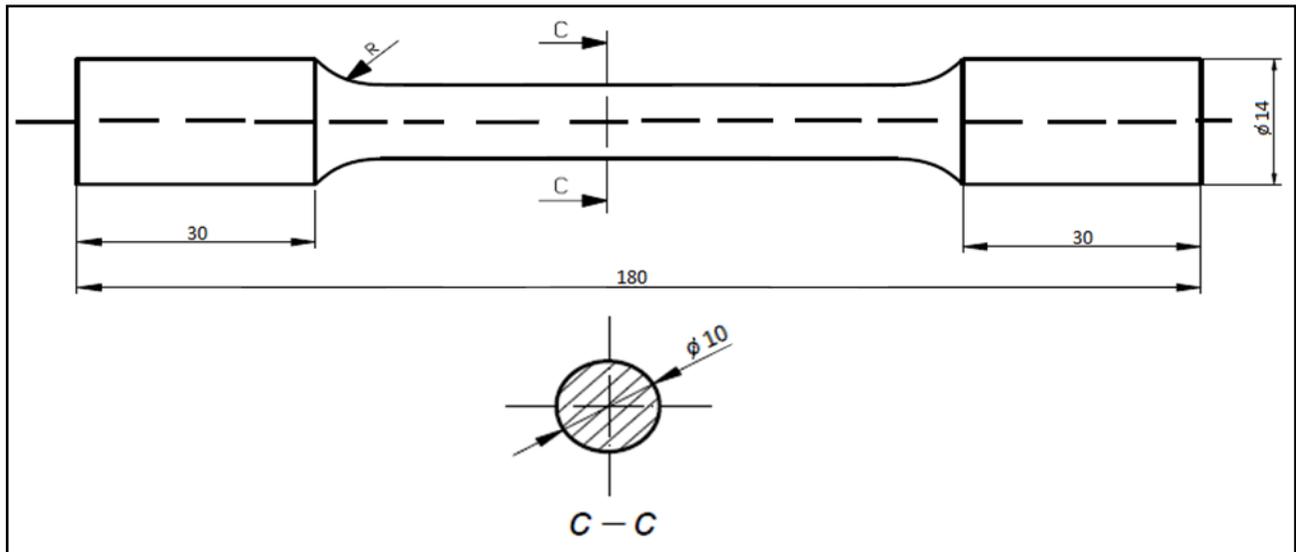


Figura 29: Geometría De Probetas

Teniendo el diámetro de la probeta a ensayar y su longitud, se debe preparar la máquina para realizar el ensayo.

Primer paso

La probeta debe ser colocada entre las mordazas de sujeción adecuadas, según el diámetro de la probeta. Las mordazas de cuña que posee la máquina evitan el resbalamiento de las probetas, haciendo posible el montaje de probetas cilíndricas, sin necesidad de aditamentos de sujeción adicionales. Incluso es posible el ensayo de aceros de construcción estriados.



Segundo paso

La manipulación de la altura de la celda de carga, puede ser modificada de forma manual desde la propia máquina, utilizando los botones del panel frontal, presionando el botón **“POS”** se encenderá una luz bajo la tecla y manteniendo presionado el botón con la flecha hacia arriba o hacia abajo, se desplazará la celda de carga para que adopte la posición deseada. Posterior al ajuste, se debe volver a presionar el botón **“POS”** (Figura 30), para desactivar la función de movimiento manual, apagándose la luz.



Figura 30: Teclas De Posición

Tercer paso

Habiendo posicionado la celda de carga, y estando la probeta correctamente ubicada, se procederá a configurar el software **TestXpert II** para realizar el ensayo, según parámetros y normas.

La configuración del software **TestXpert II** corresponde a los datos de inicio que se le deben dar al programa antes de comenzar con el ensayo.

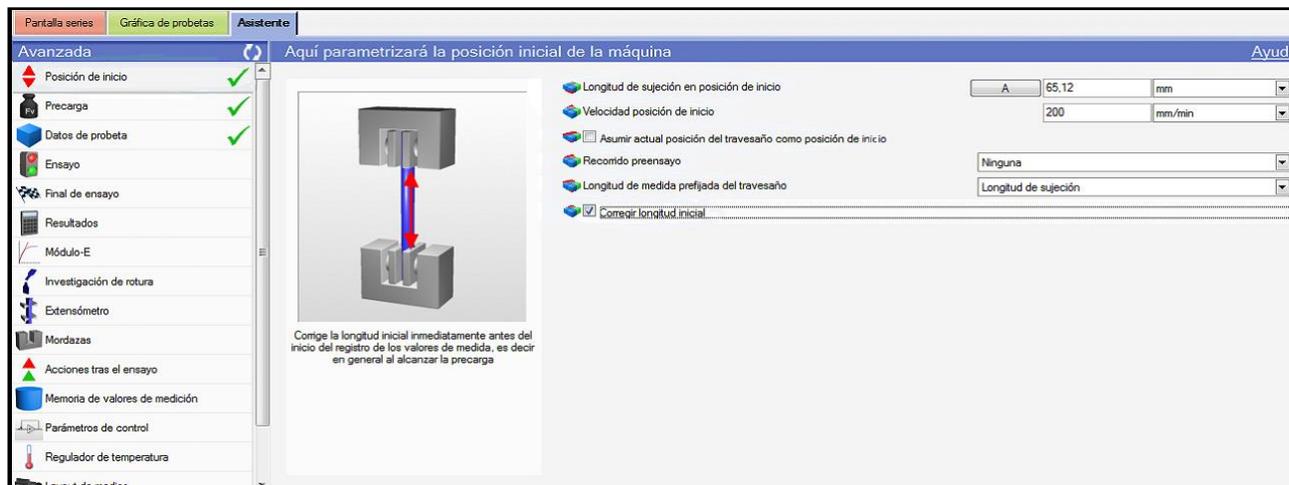


Figura 31: Configuración Testxpert II



En la parte izquierda de la imagen se muestran los parámetros que deben configurarse antes de empezar el ensayo, estos se dividen en varios grupos:

- *Configuración posición de inicio.*
- *Configuración de Precarga*
- *Configuración Datos de probeta.*
- *Configuración Parámetros de ensayo (Modulo E-Limite de fluencia)*
- *Configuración de informe de resultados*

En la pestaña asistente, es posible visualizar el cuadro **Resultados**, donde se editan las variables a exponer en el informe final que realiza la máquina Zwick/Roell. Los resultados más comunes a considerar serán:

- a) Módulo de elasticidad, Emod, GPa
- b) Fuerza en 0.1% de deformación plástica, Newton
- c) Fuerza en 0.2% de deformación plástica, Newton
- d) Límite superior de fluencia, MPa
- e) Fuerza máxima, Fmáx, Newton
- f) Deformación en Fuerza máxima, dl en Fmáx
- g) Fuerza de rotura, Frotura, Newton
- h) Deformación en rotura, dL en rotura
- i) Coeficiente de Poisson, μ
- j) Diámetro, d0, mm
- k) Sección, S0, mm²

Cuarto paso

Luego en la ventana series, se encuentran los datos de probetas actuales. Aquí se debe configurar el diámetro (A) de la probeta, para que **TestXpert II** pueda calcular los datos que se relacionen con el esfuerzo de tracción en la pieza.

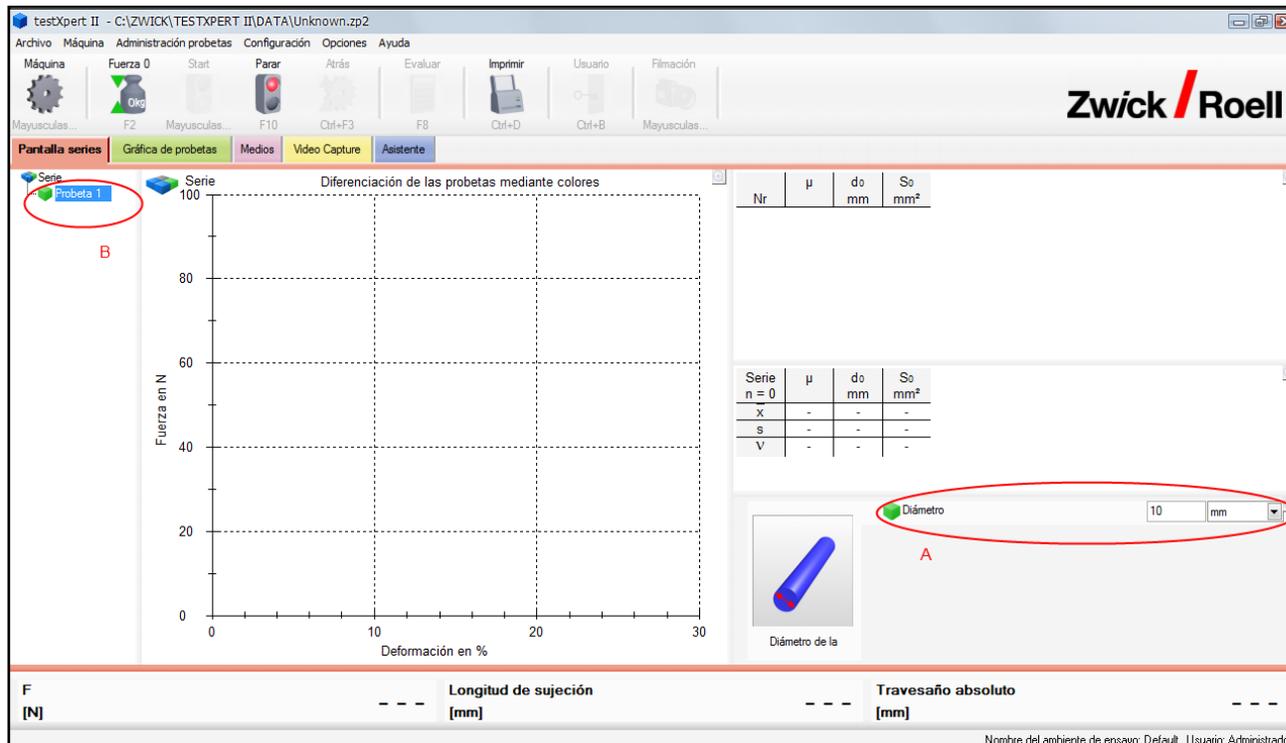


Figura 32: Configuración Del Diámetro De La Probeta

Quinto paso

Con los parámetros definidos y la máquina preparada, se procede a colocar el captador de “Fuerza en 0” (A). En caso de que se debiese detener el ensayo, es posible realizarlo presionando “Parar” (B).

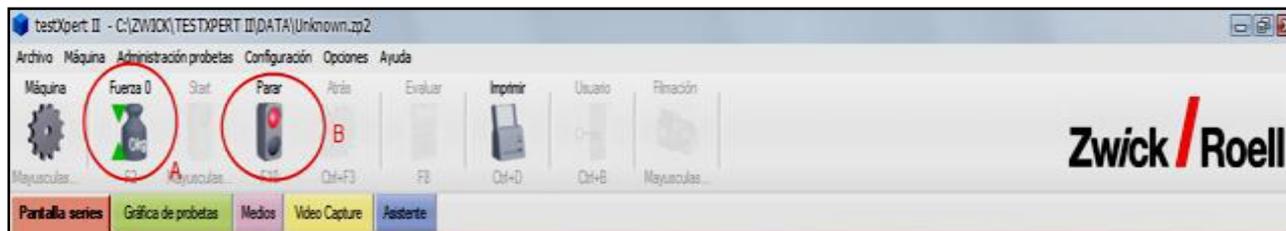


Figura 33; Fuerza En 0 / Parar

Sexto paso

Con la fuerza en cero y la máquina en condiciones presionar “START”, a lo cual el ensayo comenzará automáticamente, realizando la gráfica Esfuerzo v/s Deformación o alguna de sus variantes, dependiendo de lo configurado.



Una vez realizado el ensayo, las probetas rompieron, entregando como resultado la comparación de los 4 materiales en estudio (Ver gráfico 34):

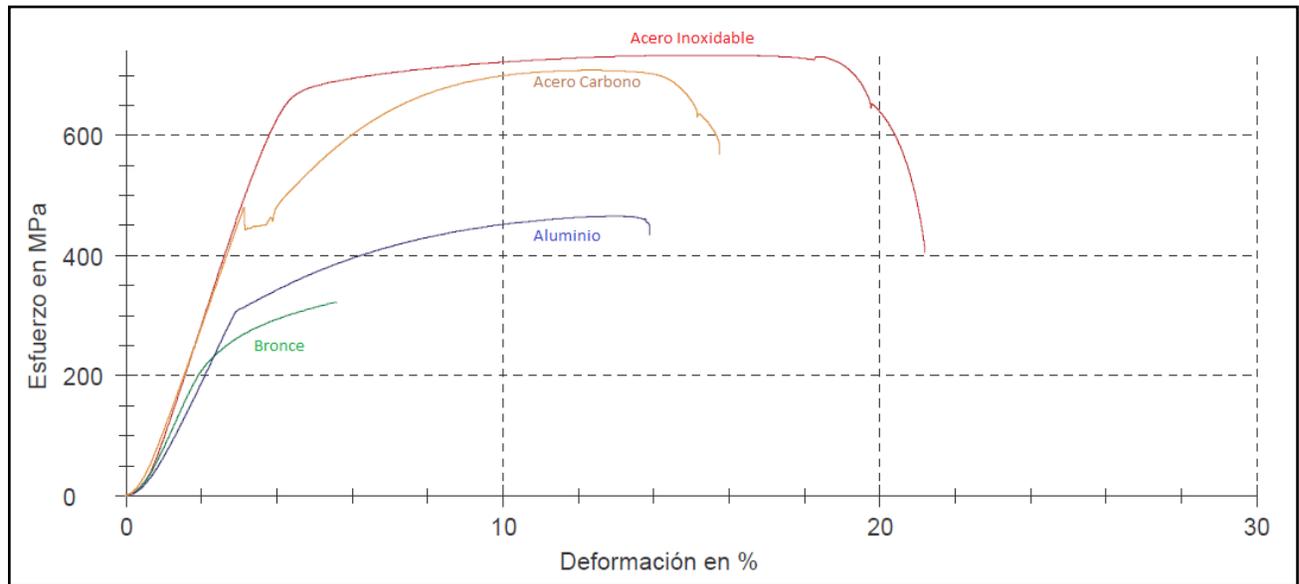


Figura 34: Gráficos Del Ensayo De Tracción

Valores entregados por el programa *TestExpert II*:

Tabla 4: Resultados Del Ensayo De Tracción

Acero	E _{mod} [Mpa]	F en def. plástica 0,2% [N]	Límite sup. de fluencia [Mpa]	F _{max} [N]	dL en F _{max} [%]	Frotura [N]	dL en rotura [%]
Acero Inoxidable	192000	48900	734	57600	15,4	31800	21,2
Acero Carbono	177000	36700	480	57900	12,3	46400	15,7
Aluminio	133000	25700	465	38000	13,0	35500	13,9
Bronce	139000	18600	-	26300	5,6	26200	5,6



Este ensayo, nos permite obtener resultados como los que se muestran en la tabla, de los cuales, el más importante y que en realidad interesa para esta memoria, es el módulo de elasticidad ***Emod***, para obtener las otras dos constantes, se necesita un ***instrumento digital*** que mide la estricción de la probeta antes de romperse (***dispositivo para el cálculo del módulo de Poisson***), como la universidad no cuenta con dicho aparato, esto no se puede realizar en las probetas.

Cálculo del Módulo de Poisson

Anteriormente se mencionaba que la Razón o Modulo de Poisson es la relación de la elongación indirecta con respecto a la elongación directa que experimenta una barra cargada uniaxialmente como lo es el caso de este ensayo realizado, la fórmula que se utiliza para obtener este valor es la fórmula (12) del capítulo II.

$$\nu_{ij} = \frac{\varepsilon_{jj}}{\varepsilon_{ii}}$$

Como no se puede obtener el módulo de Poisson por medio del ensayo de tracción (debido a la falta del dispositivo digital), existe otra forma práctica de hacerlo, que es por medio de los conocidos ***Strain Gages***, con los cuales la universidad si cuenta. Como en esta memoria no se realizó este ensayo, se hace necesario citar la memoria de ***Claudio Andrés Sandoval Rodríguez***, quien realizo su seminario en la universidad del Bio Bio llamado ***Clasificación y selección de Strain Gages y su aplicación en la industria mecánica***.

El método consiste en lo siguiente:

Para el ensayo se utilizó una barra prismática ubicada en voladizo. Ésta barra se encontraba con un extremo fijo y con carga centrada de 0.5 Kilogramos en el extremo libre.

La barra es de acero inoxidable ***AISI 316***, su módulo de elasticidad es de 190 N/m² y sus medidas son: 270 mm de largo, 24.3 mm. de ancho y 4 mm. de espesor.



Para la medición tanto teórica como práctica de deformación se emplearon dos Strain Gages, uno longitudinal y uno transversal adheridos a la barra, ambos se encontraban instalados en las superficies opuestas enfrentadas directamente entre sí, cuyos centros tenían a una distancia de 135 mm. de la carga centrada.



Figura 35: Barra Instrumentada Con Nodos Micro Strain

Los Strain calculan la deformación en ambas direcciones, longitudinal y transversal, los cuales dan como resultado lo siguiente:

Deformación longitudinal: $\varepsilon_l = 53,6 \mu\varepsilon$

Deformación transversal: $\varepsilon_t = 15,2 \mu\varepsilon$

Utilizando la fórmula (12) del capítulo II, se obtiene el siguiente valor:

$$v_{AceroInox.} = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} = \frac{15,2}{53,6} = 0,284 \quad (31)$$



La tabla con el módulo de Poisson obtenido, queda como sigue:

Tabla 5: Módulo De Poisson

Acero	$\varepsilon_1 [\mu\varepsilon]$	$\varepsilon_t [\mu\varepsilon]$	ν
Acero Inoxidable	53,6	15,2	0,28

Con este valor se procede a calcular el *Módulo de Corte*, usando la fórmula de la tabla 3, la cual dice:

$$G_{Acero} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (32)$$

Para el resto de los módulos de Poisson, se utilizan los valores de la tabla 2 que la literatura entrega:

Tabla 6: Constantes Elásticas (Ensayo De Tracción)

Acero	E [Gpa]	N	G [Gpa]
Acero Inoxidable	192,0	0,28	75
Acero Carbono	177,0	0,29	69
Aluminio	133,0	0,33	50
Bronce	139,0	0,35	51



CAPÍTULO IV:

ENSAYO DE ULTRASONIDO

*"El tiempo saca a luz todo lo que está oculto y encubre y esconde
lo que ahora brilla con el más grande esplendor".*

Horacio Flaco, Quinto (65 a. C. -8 a. C.); poeta latino.



4.1 ENSAYO DE ULTRASONIDO

El principio de este ensayo se basa en la propagación de ondas mecánicas producidas por un piezoeléctrico (Santos De La Cruz, E., Cancino Vera, N., & Yenque Dedios, J. 2005).

El piezoeléctrico convierte la energía eléctrica en energía mecánica, éste envía ondas que se reflejan por cambio en el medio. Es de esta manera que se puede saber que hay una discontinuidad en la pieza estudiada, ya que al recibir un estímulo en el medio se puede saber que hay un cambio en la pieza que significa una discontinuidad.

Existen dos métodos para emplear: transmisión y reflexión. En el primero se coloca el palpador en una cara de la pieza y el receptor en la otra cara y éste envía las ondas que son recibidas por el transmisor. En el método de reflexión el palpador que envía la señal es el mismo que recibe el eco de reflexión, ya sea de una discontinuidad o del extremo del material.

La ventaja de este ensayo es que por medio del método de transmisión sólo se necesita una cara de la pieza para poder ser evaluada. La desventaja del mismo es que si no hay un cambio de medios no habrá reflexión y limita el ensayo, además es 100% comparativo y si no se cuenta con un patrón no se puede realizar.

Los equipos modernos de ultrasonido pueden mostrar la imagen en 3D y además niveles topográficos y con esto se puede ver la morfología y profundidad de la discontinuidad.

Para este ensayo se trabajará con el equipo de ultrasonido **EPOCH 1000i** del laboratorio del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Bio Bio, con palpador recto para determinar el módulo elástico y palpador angular para determinar el módulo de corte y módulo de Poisson.



4.1.1 FUNDAMENTO TEÓRICO

La inspección por ultrasonido se realiza básicamente por el método en el cual la onda ultrasónica se transmite y se propaga dentro de una pieza hasta que es reflejada y regresa al transmisor proporcionando información de su recorrido.

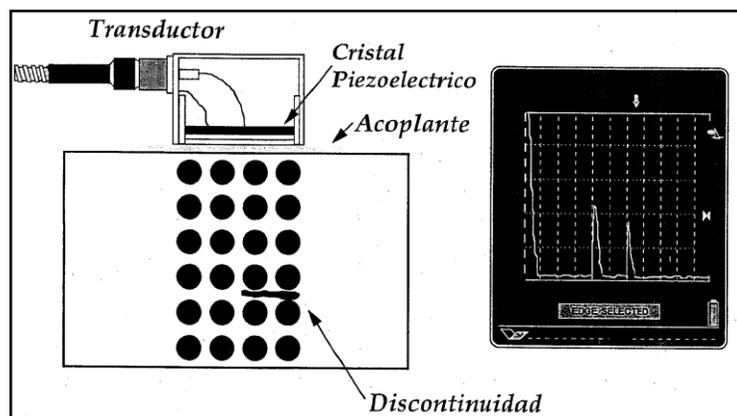


Figura 36: Método De Medición

El sistema de inspección ultrasónica está constituido por los siguientes componentes básicos:

I.- Generador de la señal eléctrica, Instrumento Ultrasónico.



Figura 37: Equipo De US Estándar



2.- Conductor de la señal eléctrica, Cable coaxial.



Figura 38: Interfaces De Conexión

3.- Elemento transmisor – receptor, Transductor.



Figura 39: Transductores De Haz Ultrasonico
Directo

4.- Medio para transferir la energía acústica a la pieza y viceversa, Acoplante acústico.



Figura 40: Fluido De Acople



5.- Piezas a inspeccionar.

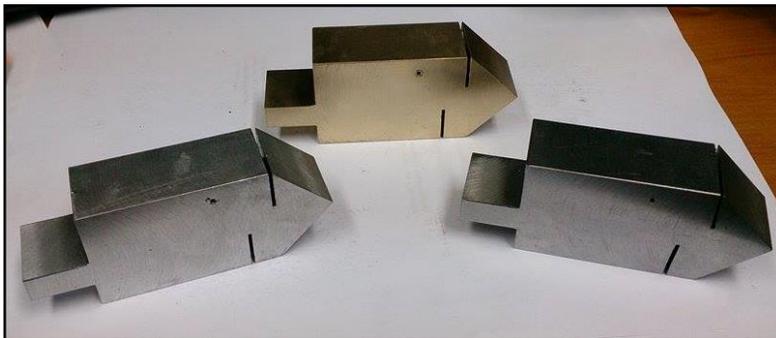


Figura 41: Probetas De Ultrasonido

En primer lugar, el sonido es una onda mecánica que se propaga a través de sólidos, líquidos y gases, con un rango de frecuencias de 16 a 20,000 Hertz. La facilidad con la cual viaja el sonido depende de su frecuencia y la naturaleza del medio.

El Ultrasonido corresponde a todas las ondas mecánicas con frecuencias mayores al límite superior del rango audible. A tales frecuencias y gracias a su energía, el ultrasonido es utilizado para rastrear el volumen de un material.

Un haz ultrasónico cumple con algunas reglas físicas de óptica por lo que es reflejado, refractado y difractado.

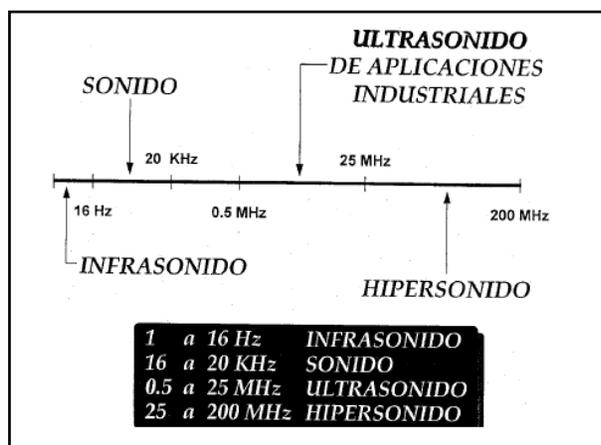


Figura 42: Límites Del Sonido



La propagación del ultrasonido está caracterizada por vibraciones periódicas de los átomos o partículas representadas por un movimiento ondulatorio.

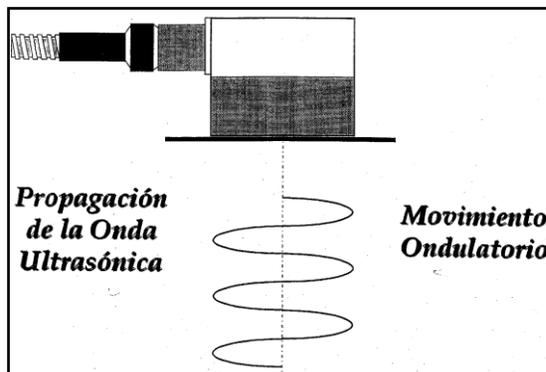


Figura 43: Propagación Del Sonido

Las características de la onda ultrasónica son:

- Longitud de onda
- Frecuencia
- Velocidad

Longitud de onda: Distancia de viaje de un ciclo; distancia desde un punto en el siguiente ciclo. Se identifica con la letra λ .

La longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad v: \text{Velocidad} \ ; \ f: \text{Frecuencia} \quad (33)$$

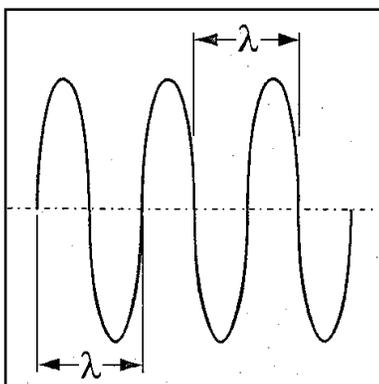


Figura 44: Longitud De Onda



Frecuencia: Número de ciclos completos que pasan por un punto en la unidad de tiempo, normalmente, un segundo. Se identifica con la letra f

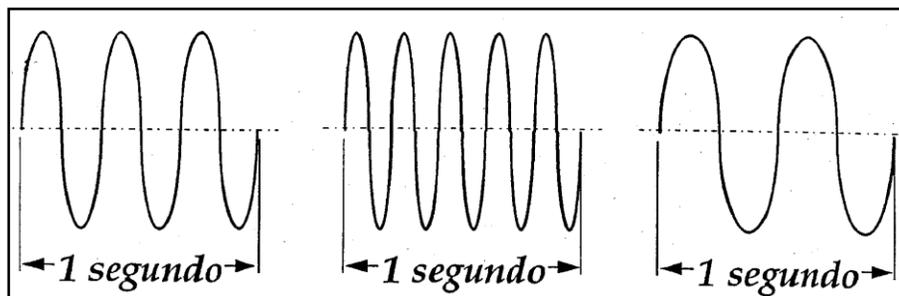


Figura 45: Frecuencia De Una Onda

1 Ciclo/ seg = 1 Hertz (Hz)

1,000 Ciclos / seg = 1 Kilohertz = 1 KHz

1,000,000 Ciclos / seg = 1 Megahertz = 1 MHz

Velocidad Acústica: Distancia de viaje por tiempo, o rapidez del movimiento ondulatorio. Se identifica con la letra V o C

La velocidad del sonido depende de:

- Las constantes elásticas del medio
- La densidad del medio
- La temperatura, y
- El modo de onda

Para las ondas longitudinales, la velocidad es:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (34)$$

Para las ondas transversales, la velocidad es:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (35)$$

Más adelante se verán las fórmulas a utilizar en detalle para la obtención de las velocidades.



MODOS DE ONDA

La energía ultrasónica se propaga por medio de vibración de las partículas del material. La dirección en la que vibran las partículas con respecto a la dirección de propagación de la onda ultrasónica depende del *Modo de Onda*.

Las formas de propagación de ondas son:

- Ondas longitudinales o de compresión
- Ondas transversales o de corte
- Ondas superficiales o de Rayleigh

Ondas Longitudinales

También llamadas *Ondas de Compresión*. La vibración de las partículas del medio es *paralela* con respecto a la dirección de propagación de la onda.

- Esta forma de onda puede propagarse a través de sólidos y líquidos.

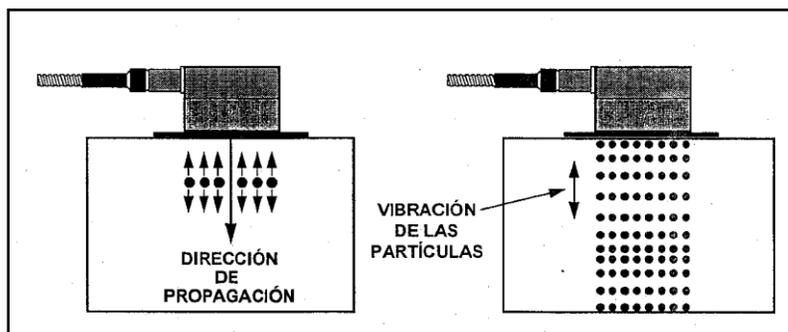


Figura 46: Onda Longitudinal



Ondas transversales

También llamadas *Ondas de Corte*. La vibración de las partículas del medio es *perpendicular* con respecto a la dirección de propagación de la onda.

- Esta forma de onda se propaga solamente a través de sólidos.
- Su velocidad es de aproximadamente la mitad de la velocidad de las ondas longitudinales.

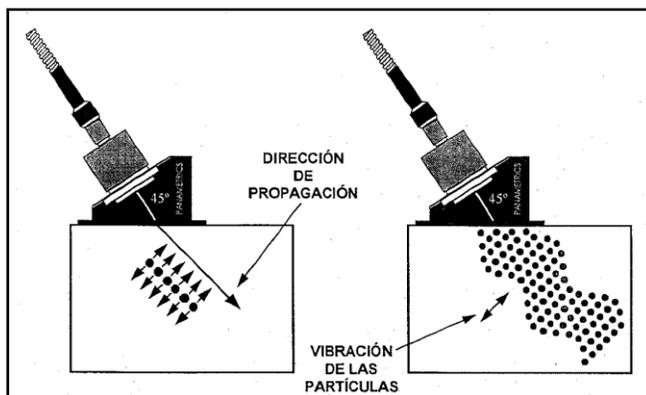


Figura 47: Onda Transversal

Ondas superficiales

También conocidas como *Ondas de Rayleigh*. El movimiento de las partículas, de la superficie o cercanas a ella, es elíptico.

- Sólo se propagan en sólidos.
- Su velocidad es de aproximadamente 90% de la velocidad de las ondas transversales.
- Adecuadas para detectar discontinuidades superficiales. Su energía decae rápidamente debajo de la superficie hasta una profundidad de aproximadamente una longitud de onda.

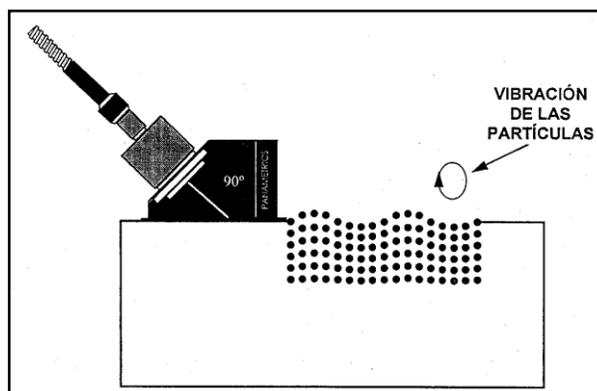


Figura 48: Ondas Superficiales



ACOPLANTE

Para realizar satisfactoriamente la transmisión del sonido desde el transductor a la pieza de prueba es necesario eliminar el aire atrapado en el espacio entre las superficies de ambos, por lo cual se requiere del uso de un medio conocido como **Acoplante**. Los materiales usados como acoplante, son:

Aceites con varios grados de viscosidad, glicerina, pastas especiales, goma de celulosa, agua, grasa y en algunas aplicaciones especializadas se ha llegado a utilizar láminas de elastómeros.

- **Humectabilidad:** Ayuda al acoplante a **mojar** la superficie del transductor y de la pieza de prueba.
- **Viscosidad:** Permite al acoplante mantenerse sobre la superficie y evita que se escurra.
- **Costo:** La facilidad de adquisición.
- **Remoción:** Residuos fácil de eliminar.
- **No corrosivos:** Evitar agrietamiento por corrosión, por la presencia de contaminantes.
- **Toxicidad:** Evitar que el personal técnico sufra de intoxicación por el manejo.
- **Atenuación:** Evitar que existan pérdidas de la energía de la onda ultrasónica en el Acoplante.
- **Impedancia acústica:** Similar a los materiales inspeccionados para que sea transmitida la mayor energía posible.



MÉTODOS DE INSPECCIÓN

ULTRASONIDO POR CONTACTO

El transductor se coloca directamente sobre la superficie de la pieza y es utilizada una película ligera de acoplante.

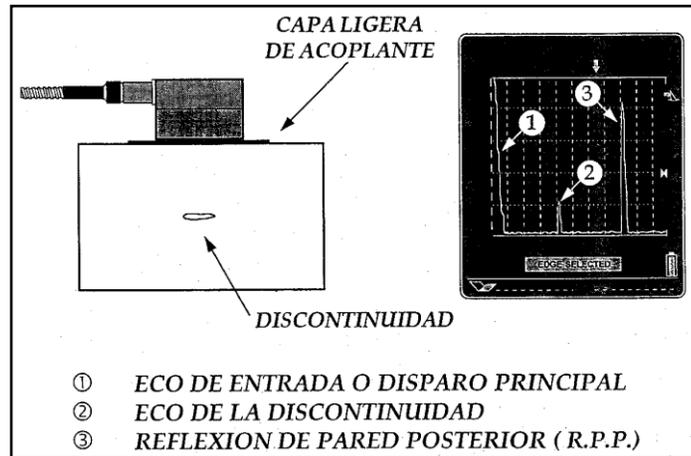


Figura 49: Ultrasonido Por Contacto

ULTRASONIDO POR INMERSIÓN

Cuando el transductor está separado de la superficie de la pieza inspeccionada por una columna de acoplante, normalmente agua, existen dos situaciones prácticas, tanto el transductor como la pieza prueba se sumergen en el acoplante, o solamente el transductor se encuentra sumergido en el acoplante utilizando algún accesorio. La mayoría de inspecciones se llevan a cabo utilizando sistemas automáticos.

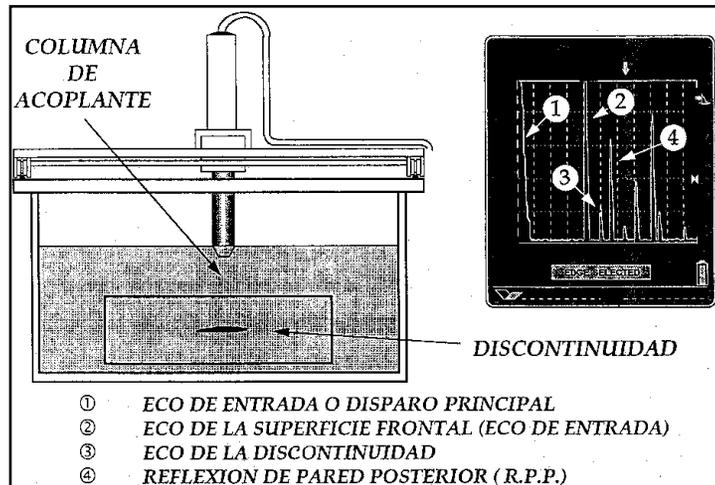


Figura 50: Ultrasonido Por Inmersión



TÉCNICAS DE INSPECCIÓN

La técnica de inspección consiste en enviar un pulso acústico que viaja a través del medio hasta que un cambio en la impedancia (por la presencia de una discontinuidad o cualquier interface acústica) provoca que sea reflejado, refractado y/o difractado para que posteriormente sea recibido. Dicho reflejo, refracto o difracto contiene información sobre la distancia recorrida por el pulso y la intensidad de la presión acústica en ese punto reflector.

Existen tres modos de inspección:

1.- PULSO – ECO

Se utiliza un solo transductor que envía y recibe el pulso (transmisor – receptor), por lo que requiere acceso a una sola superficie.

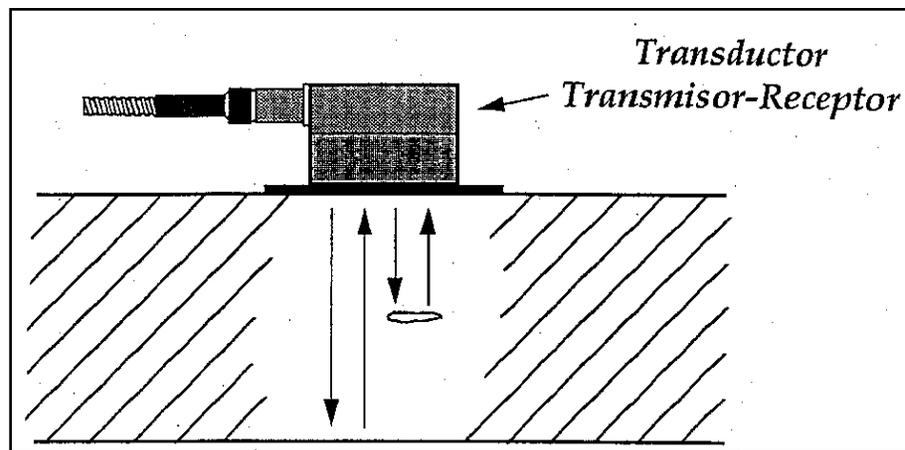


Figura 51: Pulso - Eco



2.- PICA Y CACHA (PITCH – CATCH)

Se utilizan dos transductores, uno envía el pulso y el otro lo recibe (un transmisor y un receptor), ambos transductores se localizan en una superficie.

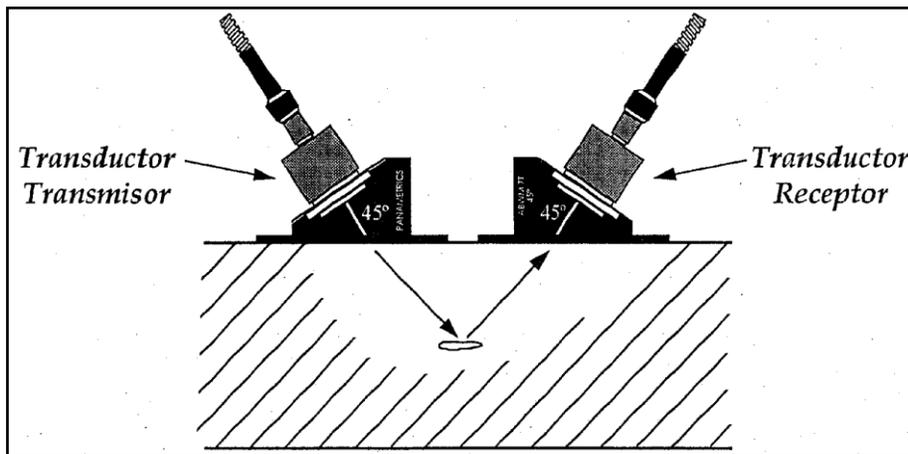


Figura 52: Pitch - Catch

3.- TRANSMISIÓN A TRAVÉS (THROUGH TRANSMISSION)

También se utiliza un transmisor y un receptor, sólo que en este caso se encuentran localizados en superficies opuestas.

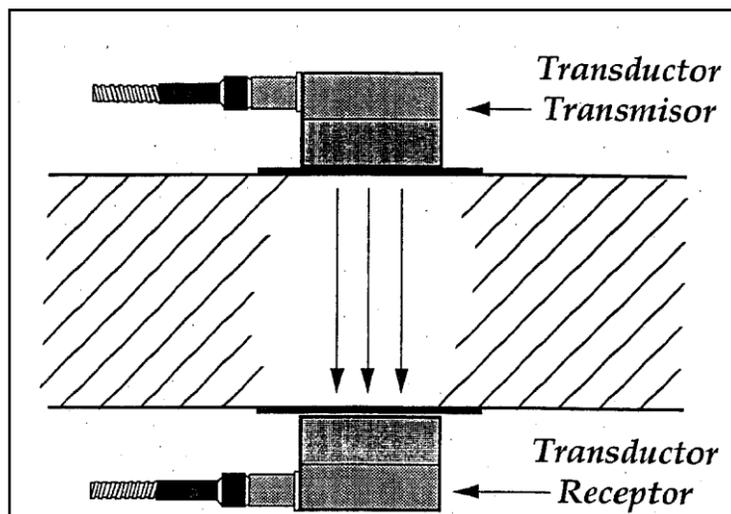


Figura 53: Through Transmission



PRESENTACIÓN DE DATOS

BARRIDO TIPO “A” (A-SCAN)

Este tipo de barrido está basado en una relación tiempo – amplitud. La condición de los materiales (presencia de discontinuidades) es representada por medio de *ecos o reflexiones* sobre la pantalla. Con este barrido se puede determinar la profundidad o posición de una discontinuidad o el espesor de un material, y la magnitud de una discontinuidad.



Figura 54: A - Scan

BARRIDO TIPO “B” (B-SCAN)

Este barrido muestra una sección transversal del material inspeccionado. En la pantalla se tiene como referencia la superficie frontal y posterior del material así como la longitud y profundidad de las discontinuidades. El tiempo de arribo de un pulso (en dirección vertical) es representado por una línea punteada en función de la posición del transductor (en dirección horizontal). Generalmente la inspección se realiza por inmersión y el movimiento del transductor es automático.



Figura 55: B - Scan



BARRIDO TIPO “C” (C-SCAN)

Este tipo de barrido es una vista de planta (vista superior en forma de mapa), similar a una imagen radiográfica. En la pantalla se muestra la proyección de los detalles internos, si existe una discontinuidad se obtiene el contorno de la misma. En este barrido no se utilizan las reflexiones frontal y posterior, sólo la reflexión de las discontinuidades. La inspección se realiza por medio de un sistema de barrido automático y proporciona un registro permanente.

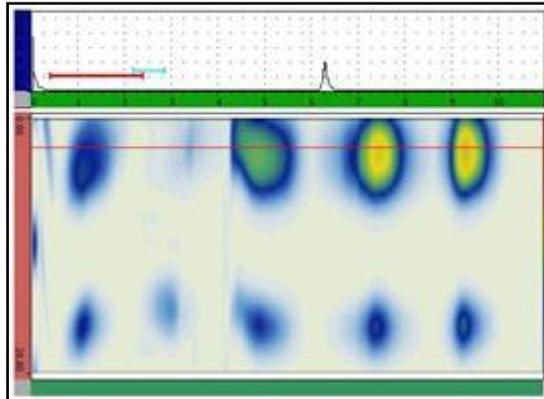


Figura 56: C - Scan

BARRIDO TIPO “S” (S-SCAN)

Éste proviene del término *Sectorial Scan* y es la imagen más utilizada en la industria del ultrasonido. Se basa en la generación de un abanico de haces a partir de un punto fijo. Es especialmente diseñado para inspección a soldaduras y su escaneo permite realizar, en una sola pasada la adquisición de datos desde ambos lados de la soldadura.

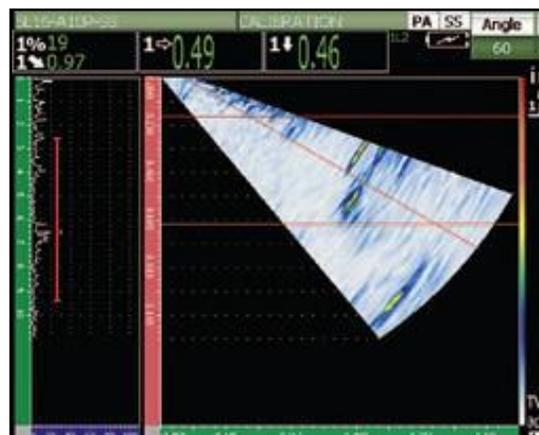


Figura 57: S - Scan



CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

La calibración del equipo permitirá obtener la velocidad tanto longitudinal como transversal dependiendo del palpador que se use. Con estas velocidades, se pueden calcular los valores de las constantes elásticas en estudio, para ello se hace necesario explicar cómo se llega teóricamente a dicho cálculo.

PROPAGACIÓN UNIDIMENSIONAL DE ONDAS ACÚSTICAS

Los ensayos por ultrasonido se enfocan en la variación de la deformación de los materiales respecto al tiempo. Los materiales están compuestos de átomos, los cuales pueden ser forzados a movimientos vibratorios sobre la posición de equilibrio.

La acústica actúa sobre las partículas que contienen átomos y producen una onda mecánica al moverse en una dirección. Al NO aplicarle al material un esfuerzo a tensión o compresión, mayor a su límite elástico, éste produce oscilaciones elásticas. Cuando se desplazan las partículas de su posición de equilibrio, aparecen las fuerzas de restauración interna (electrostática). Estas fuerzas, combinadas con la inercia del material, producen movimientos oscilatorios dentro del medio.

Anteriormente se mencionaba que las ondas longitudinales, también llamadas de presión, son una perturbación en la tensión mecánica que se propaga en el material y donde el movimiento vibratorio de una partícula ocurre en la misma dirección de propagación. En el caso de las ondas transversales, el movimiento vibratorio de una partícula ocurre en la dirección perpendicular de propagación.

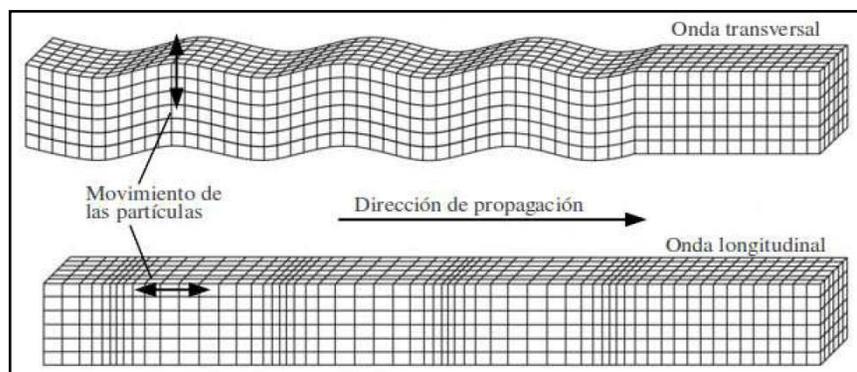


Figura 58: Ondas De Cuerpo En Sólidos



Estas ondas tienen relación directa con las tensiones normal y transversal y su **velocidad de propagación depende de las constantes elásticas del material**.

Para el caso de un material isotrópico y homogéneo, la propagación unidimensional de una onda acústica de cuerpo es modelada por:

$$\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{1}{C^2} \frac{d^2u}{dt^2}, \quad \text{Donde } C \rightarrow C_L \rightarrow C_T \quad (36)$$

Donde u es el desplazamiento de una partícula, t es el tiempo, x es la dirección de propagación y C es la velocidad de propagación de la onda. La solución de la ecuación diferencial (36) de segundo orden es una función oscilatoria en términos de las variables independientes x y t (Kinsler, 1962):

$$u(x, t) = x_0 e^{j(\omega t \pm kx)} \quad (37)$$

Donde x_0 es la amplitud de la onda, $K=2\pi/\lambda$ es el número de onda, λ es la longitud de onda, $j = \sqrt{-1}$ es el operador imaginario, ω la frecuencia angular y los signos - y + representan una onda propagándose para la izquierda y para la derecha, respectivamente. La ecuación anterior puede expresarse en términos de senos y cosenos aplicando la identidad de Euler.

Derivando la ecuación (37), se pueden obtener las constantes de la matriz de materiales isotrópicos, las cuales representan las velocidades de propagación del sonido en función de los valores de cedencia de la matriz. La ecuación queda como sigue para la velocidad longitudinal (V_L):

$$V_L = \frac{\omega}{K_L} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad (38)$$

Y para la velocidad de la onda transversal (V_T):

$$V_T = \frac{\omega}{K_T} = \sqrt{\frac{C_{11} - C_{12}}{\rho}} \quad (39)$$



Donde C_{11} y C_{12} son las constantes independientes de la matriz de rigidez (27), en notación simplificada, para un material isotrópico (W.P. Mason, 1964). Esas dos constantes son representadas en la literatura de diferentes maneras, la más común de ellas es mediante el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, y el módulo de corte, relacionados con las constantes de la matriz de rigidez y la velocidad de las ondas mediante las ecuaciones (40) y (41) (G.S. Kino, 1987):

$$V_L = \sqrt{\frac{G(4G - E)}{\rho(3G - E)}} = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (40)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (41)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, G es el módulo corte o de cizallamiento, ν es el módulo de Poisson y ρ es la densidad. Se debe recordar que las propiedades elásticas de un material isotrópico son modeladas completamente por dos constantes elásticas, entonces los pares de constantes (G, E) y (E, ν) son maneras diferentes de representar las propiedades elásticas del mismo material, tal y como se muestra en la tabla 3 del capítulo II.

En general, el módulo transversal de un material es menor que el módulo de Young, debido a que las ondas longitudinales se propagan a mayor velocidad que las transversales. En la siguiente tabla se muestran las propiedades acústicas de algunos de los materiales más usados en ultrasonido.



Tabla 7: Propiedades De Materiales (Kino G.S. 1987)

Material	ρ (kg/m ³)	V_L (m/s)	V_T (m/s)
Acero	7900	5900	3200
Aluminio	2700	6420	3040
Vidrio	2260	5640	3280
Agua	1000	1480	-
Aire	1,24	344	-

Resolviendo las ecuaciones (38) y (39) para V_L y V_T , se obtienen las propiedades elásticas (módulo de elasticidad y módulo de Poisson) del material en función de las velocidades de las ondas longitudinal y transversal:

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} \quad (40)$$

$$E = V_T^2 \cdot 2\rho(1 + \nu) \quad (41)$$



4.1.2 PROCEDIMIENTO UTILIZADO DEL ENSAYO DE ULTRASONIDO

Anteriormente se mencionaba que sólo se necesita el equipo de ultrasonido para calibrar el material que se inspeccionará, en este caso basta calibrar sólo la velocidad del equipo y no la calibración de ganancia y calibración del cero como se hace para el *Phased Array*.

Cada vez que se usa un equipo de ultrasonido, lo primero que se debe hacer es calibrarlo con el material que se inspeccionará o parecido, cuando esto se hace, el equipo entrega el valor exacto de la velocidad de propagación del sonido que tiene dicho material, en este caso, corresponde a lo que se busca para la obtención de los valores de las constantes elásticas, tal y como se muestra en la teoría de la elasticidad de materiales isotrópicos.

En esta memoria, no se usarán patrones de calibración normados, pues la idea es determinar las velocidades de materiales diferentes a los materiales de los patrones, en este caso se usaran los metales anteriormente nombrados (*Acero Carbono SAE 1020, Acero Inoxidable AISI 316, Duraluminio Lamido y Bronce SAE640*), donde se utilizará un palpador recto para determinar la velocidad longitudinal y un palpador angular para determinar la velocidad transversal del material.

La forma y las dimensiones de las probetas que se ensayaran con el ultrasonido son como se muestra en la siguiente figura:

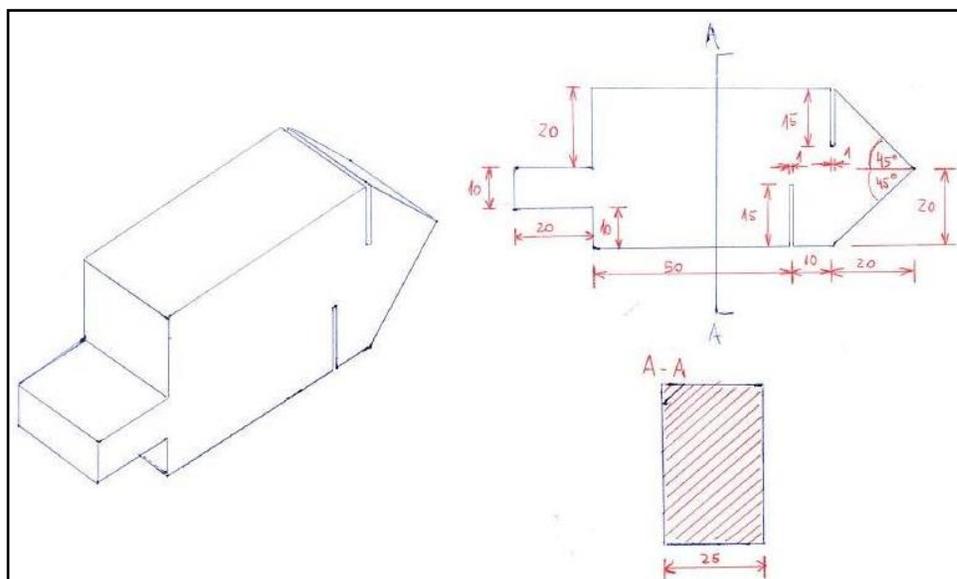


Figura 59: Probetas De Ensayo Ultrasonico



CALIBRACIÓN CONVENCIONAL (UT)

Antes de efectuar una calibración es importante ejecutar un procedimiento de verificación y de configuración de bases.

Primero

Se debe verificar que el equipo **EPOCH 1000i** este en el modo **UT** (ultrasonido convencional), el cual activa automáticamente en el modo de inspección **A-Scan**.

Segundo

Se debe seleccionar un valor adecuado de ganancia para efectuar la calibración, permitiendo aumentar o disminuir la amplitud de la señal, en el caso de desconocer el valor inicial de decibeles es recomendable probar inicialmente con **20 dB** (de ser necesario se debe modificar este valor para obtener una amplitud de señal de mejor notoriedad).

Tercero

Se debe verificar en la pantalla, que el parámetro de velocidad no está desactivado en el modo tiempo de vuelo. En la selección **3/5>Ajuste medición[F2]**, seleccionar el parámetro **Unidad** pulsando la tecla **[P2]**, configurando la unidad en **mm**, activando de este modo el parámetro de la velocidad.

Cuarto

En la selección **1/5>Base[F1]** se encuentran los parámetros **Velocidad**, **Cero**, **Rango** y **Retardo**. La **Velocidad** y el **Rango** se modifican dependiendo del tipo de pieza, en cambio para los parámetros **Cero** y **Retardo** se deben ajustar los valores a **0.000 μ s** y **0.00** respectivamente.

Quinto

Al ubicarse en la selección **1/5>Disparo[F4]**, se debe seleccionar el parámetro **Ángulo** pulsando **[P1]** para introducir el ángulo del palpador seleccionado.



Sexto

En la segunda selección 2/5>**Puerta 1**[F1], seleccionar el parámetro **Estado** pulsando [P7] y activar la **Puerta 1**.

Para la obtención de las velocidades de propagación en el material, se deben hacer dos tipos de calibración, tanto para un palpador recto, como para un palpador angular, por lo tanto se procede a especificar paso a paso como se debe efectuar dicha operación:

4.1.2.1 CALIBRACIÓN CON PALPADOR RECTO

Para la calibración del equipo con un palpador recto se deben seguir los siguientes pasos:

1.- Para empezar se utilizará el **bronce SAE 640** y el tipo de palpador a utilizar, en este caso será el **palpador recto A109S 5MHz/0,5"**.

2.- En la selección del ángulo ajustar el valor a 0°.

3.- Se deben modificar los valores de la selección 1/5>**Base**[F1] que se detallan a continuación:

- **Velocidad:** 3500 m/s. Esta velocidad es una velocidad que entrega la literatura.
- **Rango:** 20 mm. Se utiliza el doble de la dimensión que se está evaluando.

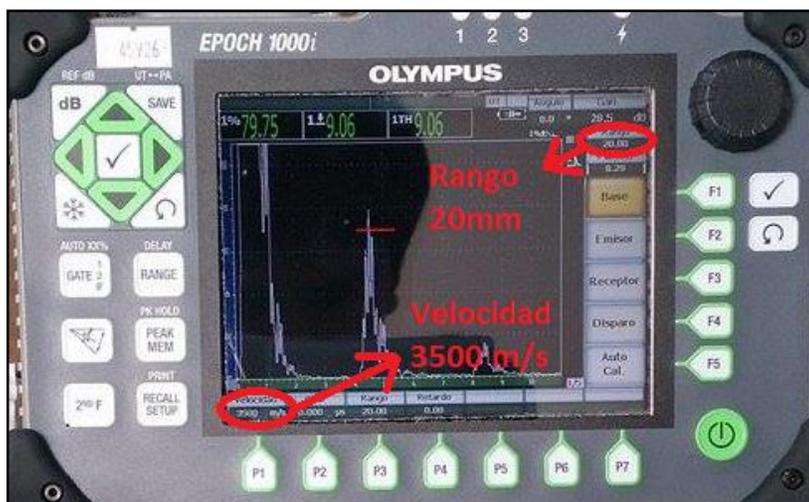


Figura 60: Velocidad / Rango



4.- En la selección *1/5>Emisor[F2]*, se encuentran los siguientes parámetros: **Modo PRF**, **PRF**, **Energía**, **Amort.** (Amortización), **Modo**, **Emisor** y **Frec.** (Frecuencia). En cada parámetro se deben realizar las siguientes modificaciones:

- **Modo PRF:** Auto min.
- **Energía:** 100 V.
- **Amort.:** 50 Ω .
- **Modo:** Eco- Pulso. Anteriormente se mencionaron las técnicas de inspección, en este caso se utilizará el **PULSO-ECO**.
- **Emisor:** Cuadrado.
- **Frecuencia:** 5 MHz. Corresponde a la frecuencia del **palpador recto A109S 5MHz/0,5''**

5.- Luego en la selección *1/5>Receptor[F3]*, se encuentran los siguientes parámetros: **Grupo filtro**, **Filtro**, **Rectif.** (Rectificado) y **Supres.** (Supresión). En cada parámetro se deben realizar las siguientes modificaciones:

- **Grupo filtro:** Standard.
- **Filtro:** 1,5-8,5.
- **Rectif.:** Completa.
- **Supres.:** 0.

6.- En la selección *1/5>Disparo[F4]*, aparecen los siguientes parámetros: **Angulo**, **Esp.** (Espesor), **Valor X**, **CSC** y **Diámetro**. Solo se debe desactivar el parámetro **CSC**.

7.- Ya configurado todos los parámetros de las selecciones anteriores, se pone el cursor en *1/5>Auto Cal.[F5]* y se posiciona la probeta para su medición. Se agrega gel acoplante a la pieza y se realiza el primer contacto como se muestra en la figura siguiente:

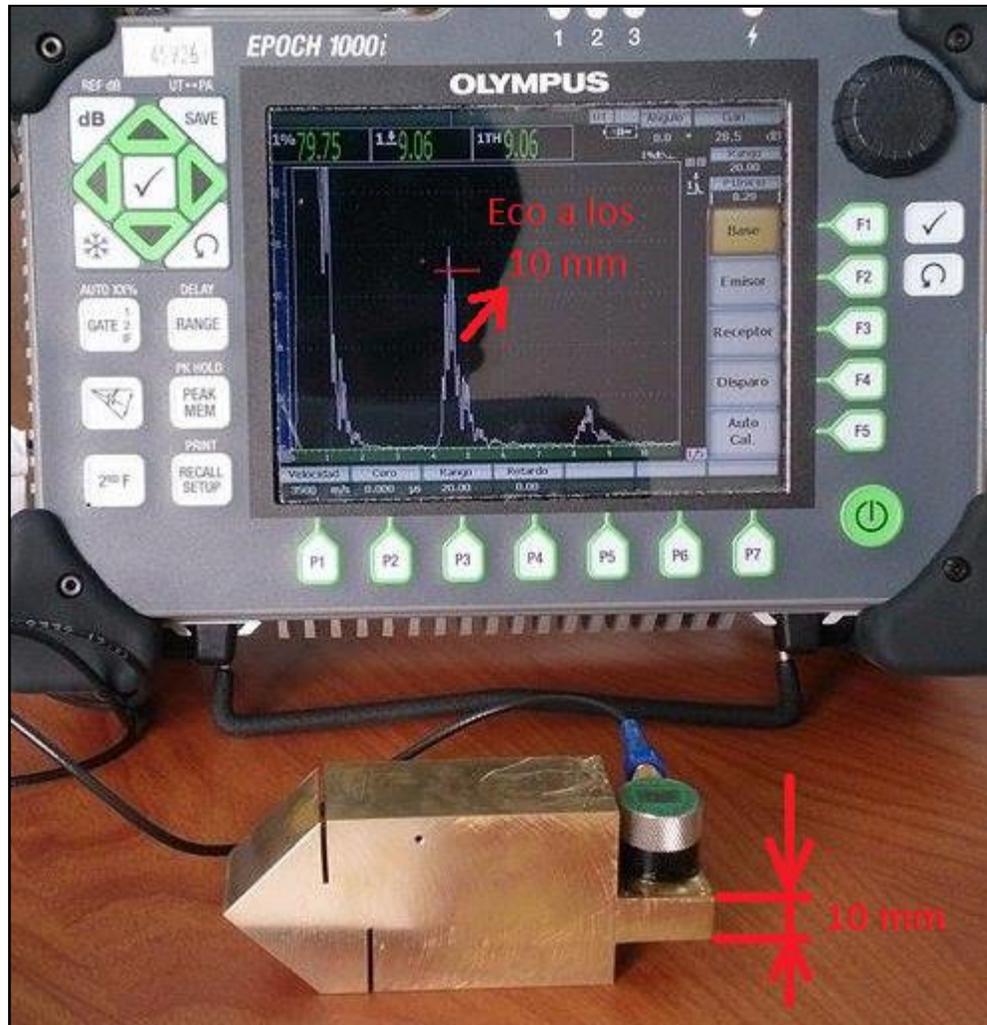


Figura 61: Espesor Delgado / Palpador Recto

8.- Luego de acoplar el palpador en la parte delgada, se presiona la tecla rápida **[GATE]**, la cual activa la puerta **P1 Inicio**, la cual se debe ubicar donde existe la primera variación de amplitud y realizar un **Auto 80%** presionado **[2NDF]+[GATE]**.

9.- En la selección **1/5>Auto Cal.[F5]** se debe seleccionar el parámetro **Cal. Cero** pulsando la tecla **[P3]**, e ingresar el valor de **10 mm** (el valor se ajusta girando la perilla).



Ya se ha realizado la calibración del espesor delgado de la probeta ahora el siguiente paso es cambiar de posición el palpador sobre el espesor grueso de la pieza, como se muestra en la siguiente figura.

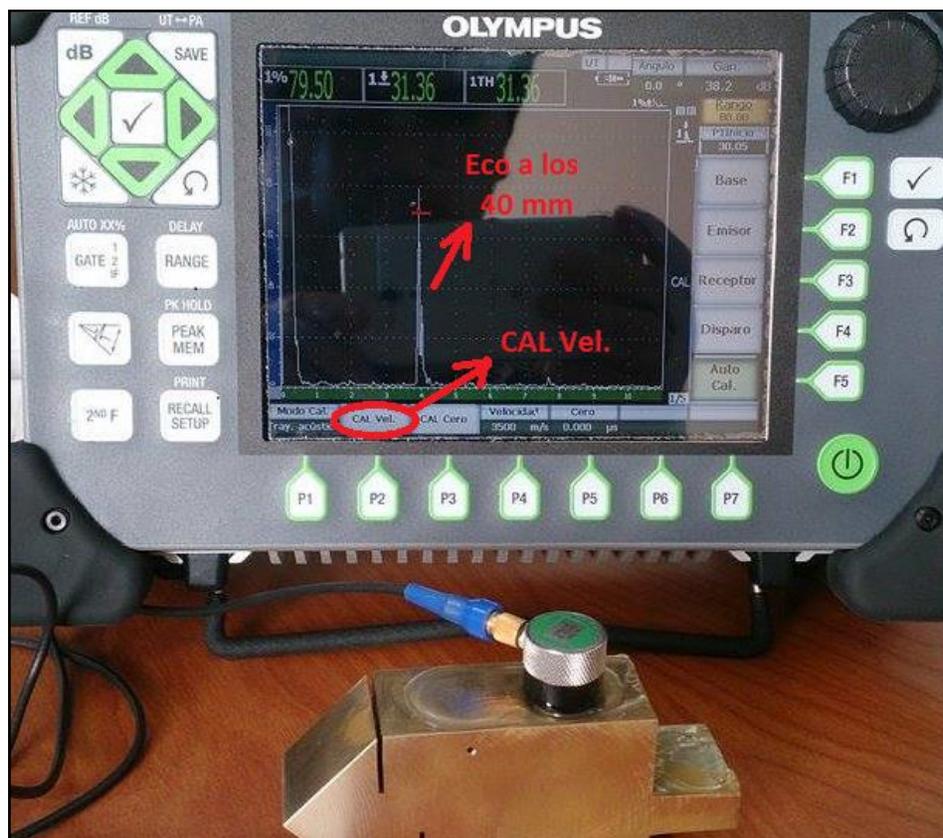


Figura 62: Espesor Grueso / Palpador Recto

10.- Mover la puerta *P1* con la perilla, donde se encuentra la variación de amplitud en pantalla y aplicar un *Auto 80% [2NDF]+[GATE]*.

11.- Seleccionar el parámetro *Cal. Velocidad* presionando la tecla [*P2*], agregar el valor de **40 mm**. Al presionar aceptar el equipo entrega el valor real de la *velocidad longitudinal* del sonido en el bronce. Este proceso se repite para todos los demás metales, obteniéndose los valores que se ven a continuación en la siguiente tabla:



Tabla 8: Velocidades Longitudinales Del Sonido

Acero	Velocidad Longitudinal del sonido [m/s]
Acero Inoxidable	5786
Acero Carbono	5917
Aluminio	6373
Bronce	4680

4.1.2.2 CALIBRACIÓN CON PALPADOR ANGULAR

Cabe destacar que la calibración entre un palpador y otro varía muy poco, a continuación, se definen los siguientes pasos de la calibración para el palpador con zapata (dispositivo que le da el ángulo al palpador para enviar una onda transversal):

1.- Una vez más se utilizará el **bronce SAE 640** y el tipo de palpador a utilizar, en este caso será el **palpador A543S**, con la zapata **ABWM-4T 45°**.

2.- Ingresar a la selección **1/5>Emisor[F2]**, en donde se encuentran los siguientes parámetros: **Modo PRF**, **PRF**, **Energía**, **Amort.**, **Modo**, **Emisor** y **Frec**. En cada parámetro se deben realizar las siguientes modificaciones:

- **Modo PRF:** Auto min.
- **Energía:** 100 V.
- **Amort.:** 50 Ω.
- **Modo:** Eco- Pulso. Pulso. Anteriormente se mencionaron las técnicas de inspección, en este caso se utilizará el **PULSO-ECO**.
- **Emisor:** Cuadrado.
- **Frecuencia:** 5 MHz. Corresponde a la frecuencia del **palpador A543S**.



3.- Luego en la selección *1/5>Receptor[F3]*, encontraremos los siguientes parámetros: **Grupo filtro**, **Filtro**, **Rectif.** y **Supres.** Se debe verificar que los siguientes parámetros estén activados.

- **Grupo filtro:** Standard.
- **Filtro:** 1,5-8,5.
- **Rectif.:** Completa.
- **Supres.:** 0.

4.- Ingresar a la selección *1/5>Disparo[F4]*, seleccionar **Ángulo** presionado [**P1**] e introducir el valor del ángulo, para esta calibración **45°**. (El **ángulo** depende del tipo de zapata que se selecciona).

5.- En la selección *1/5>Base[F1]*, se deben modificar los siguientes parámetros:

- **Velocidad:** 1750 m/s. La velocidad transversal de propagación es aproximadamente la mitad de la velocidad longitudinal.
- **Rango:** 10 mm. Se utiliza el doble de la dimensión que se está evaluando.

6.- En la selección *1/5>Disparo[F4]*, modificar el Espesor presionando la tecla [**P2**] e ingresar 0 mm.

7.- Colocar el palpador en la marca de la probeta (al realizar la unión del palpador con la zapata es importante aplicar una pequeña porción de gel acoplante).

8.- Mover el palpador en la marca hacia delante y atrás, hasta que el eco alcance la amplitud máxima. Si la amplitud sobrepasa el 100% de la pantalla, se debe de disminuir la ganancia, para que se puedan observar la máxima amplitud con notoriedad.

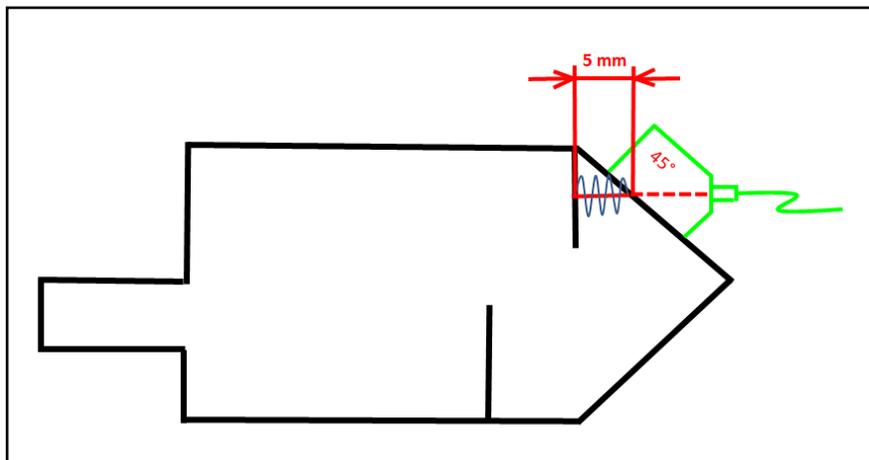


Figura 63: Espesor Delgado / Palpador Angular

9.- Presionar la tecla rápida **[GATE]**, la cual activa la puerta **P1 Inicio**, ésta se debe ubicar donde existe la primera variación de amplitud (esta se debe ubicar a una distancia angular de trayectoria acústica, aproximadamente de **5 mm**) y realizar un **Auto 80%** presionando las siguientes teclas **[2NDF]+[GATE]**.

10.- Ingresar a la selección **1/5>Auto Cal.[F5]**, presionar la tecla **[P3]** se activará el parámetro **CAL Cero**. Se debe ingresar **5 mm** y finalizar el proceso presionando **Continuar**. Ver figura 64.

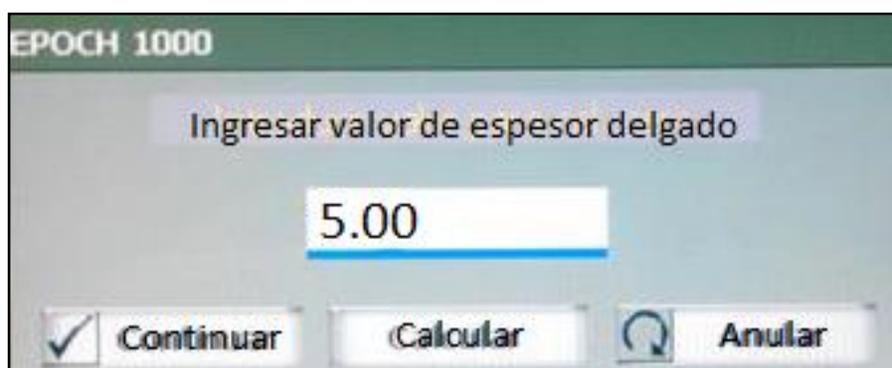


Figura 64: Valor De Espesor Delgado

Ya se ha realizado la calibración del espesor delgado de la probeta ahora el siguiente paso es cambiar de posición el palpador sobre el espesor grueso de la pieza, como se muestra en la siguiente figura.

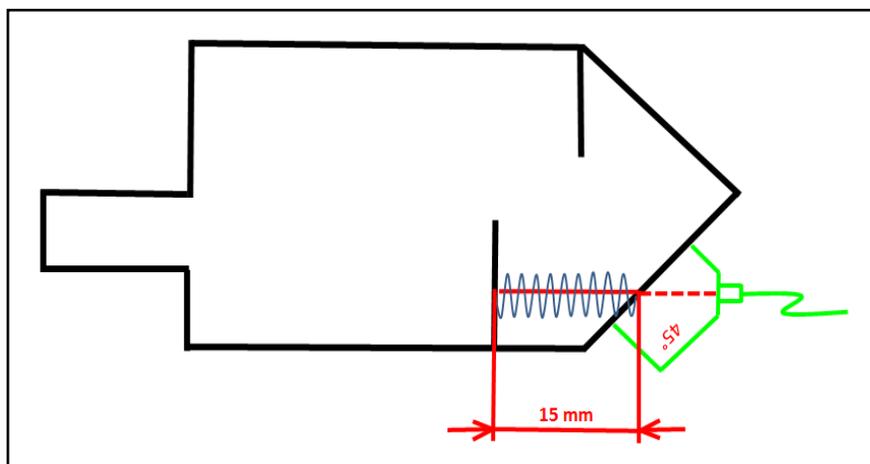


Figura 65: Espesor Grueso / Pulsador Angular

11.- Luego presionar la tecla rápida **[GATE]**, la cual activa la puerta **P1 Inicio**, ésta se debe ubicar nuevamente en la primera variación de amplitud del eco (ubicada aproximadamente a una distancia angular de trayectoria acústica, de **15 mm**) y realizar un **Auto 80%**, presionando las siguientes teclas **[2NDF]+[GATE]**.

12.- Presionar la tecla **[P2]**, la cual activa el parámetro **CAL Velocidad**. Se abrirá una ventana de diálogo donde se debe ingresar el valor de **15 mm**. Ver figura 66.

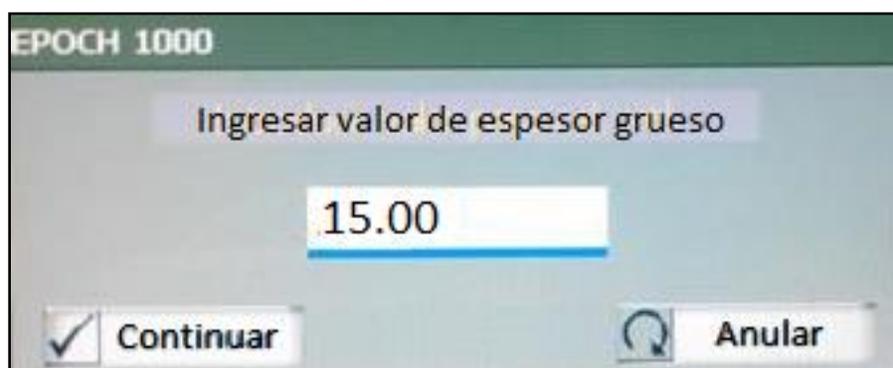


Figura 66: Valor De Espesor Grueso

Al presionar **Continuar** el equipo entregará el valor real de la **velocidad transversal** del sonido en el bronce. Este proceso se repite para todos los demás metales, obteniéndose los valores que se ven a continuación en la siguiente tabla:



Tabla 9: Velocidades Transversales Del Sonido

Acero	Velocidad Transversal del sonido [m/s]
Acero Inoxidable	3257
Acero Carbono	3157
Aluminio	3140
Bronce	2480

Ya con el valor de las velocidades se pueden obtener las constantes de elasticidad en estudio, sin embargo falta aún un valor más, que corresponde a la densidad (ρ) de los materiales, para ello fue necesario obtener el volumen (m^3) y la masa (kg) de cada probeta, donde $\rho = masa/volumen$. (Ver tabla 11)

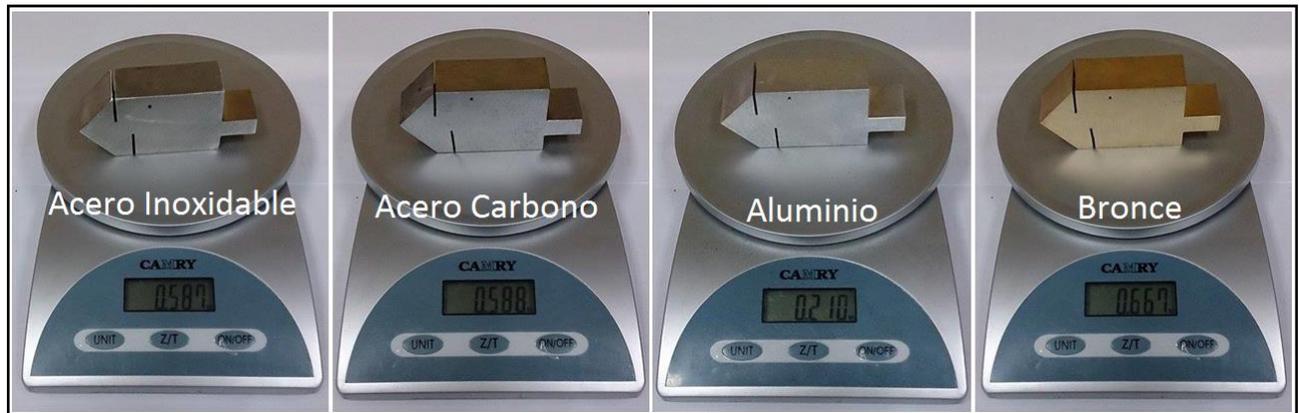


Figura 67: Masa De Probetas

Tabla 10: Densidad De Probetas

Acero	Masa [Kg]	Volumen [m^3]	Densidad [Kg/m^3]
Acero Inoxidable	0,587	0,0000738	7954
Acero Carbono	0,588	0,0000738	7967
Aluminio	0,210	0,0000738	2846
Bronce	0,667	0,0000738	9038



Ya se tienen todos los valores necesarios para el cálculo de las constantes elásticas, ahora se necesita requerir a la teoría y proceder a obtener los resultados.

Usando las ecuaciones (40) y (41), se obtienen los valores del módulo elástico y el módulo de Poisson, luego con la ecuación (32) de la tabla 2 del capítulo II se obtiene el módulo de corte.

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} \quad (40)$$

$$E = V_T^2 \cdot 2\rho(1 + \nu) \quad (41)$$

$$G_{Acero} = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (32)$$

La tabla con los valores de las constantes elásticas queda como sigue:

Tabla 11: Constantes Elásticas (Ensayo De Ultrasonido)

Acero	E [Gpa]	ν	G [Gpa]
Acero Inoxidable	214,0	0,27	84,4
Acero Carbono	206,6	0,30	79,4
Aluminio	75,1	0,34	28,1
Bronce	145,1	0,30	55,6



CONCLUSIÓN

Después de analizar y estudiar el marco teórico de “La elasticidad de materiales isotrópicos” y realizar los ensayos pertinentes, se concluye que:

- En la aplicación de las teorías para la obtención de las tres constantes elásticas de los materiales, fue necesario *reducir* paso a paso la matriz de cedencia que compone globalmente el comportamiento interno de un material elástico, hasta llegar a lo que es un material isotrópico. De esta manera, la cantidad de datos que se debieron tomar por medio de los ensayos fue muy inferior a lo que se debería haber tomado en el caso de haber usado otros materiales, como los anisotrópicos. Finalmente, gracias a la reducción correcta de la matriz, bastó encontrar los valores de sólo 2 constantes independientes de la matriz de rigidez (Ver ecuación 27) para lograr la obtención de los módulos elásticos. Los valores de la matriz correspondían a C_{11} y C_{12} , valores que se resolvieron por medio de las ecuaciones (38) y (39).
- Para enlazar la *mecánica de los cuerpos rígidos* con la *propagación del movimiento* finito dentro del material, fue necesario se determinar la influencia que tenía uno sobre el otro. En este caso fue debió producirse movimiento (ultrasonido) dentro del cuerpo, con el fin de obtener el valor de la velocidad con que viaja el sonido. Una vez conseguida las velocidades de propagación, por medio de las ecuaciones (40), (41) y (32), se obtuvieron las constantes de elasticidad (Ver tabla 12). La teoría utilizada en este punto es la *Elastodinámica*, donde la *deformación* del material corresponde al *desplazamiento* de las partículas producida por el ultrasonido y el *esfuerzo* se interpreta por medio de las *fuerzas* de movimiento del sonido mientras viaja por la pieza.



- Para el correcto montaje y ensayo de las probetas de tracción, se consideraron varios puntos, los cuales fueron básicos en la toma de datos por medio de esta práctica:

1.- Las probetas debían tener una forma específica, que al estirarse no se rompieran en la sección donde van sujetadas por las mordazas, para ello se fabricaron como la norma **NCh 200 Of72** dice (Ver figura 29).

2.- Era necesario conocer y manejar bien el programa **TestExpert II**, para obtener de manera correcta los valores que se necesitaban en el cálculo de las constantes elásticas, en este caso, el software entregó de manera instantánea el **Módulo de Young**, junto con otros valores como la tensión máxima, % estiramiento máximo, velocidad de estiramiento, etc. Además se obtuvieron los valores de la deformación v/s la fuerza aplicada en la pieza en formato Excel, con los cuales se pudo trabajar manualmente (*en el Anexo se explica brevemente como obtener el Módulo de Young de forma manual con los datos del Excel*).

3.- Fue necesario tener conocimiento básico en como retirar y colocar las mordazas, cual es el punto óptimo en donde se debían tomar las probetas, saber medir de manera correcta, el diámetro de la pieza antes y después del ensayo (es importante saber usar correctamente el pie-metro) y así se configuró el programa con los valores pertinentes para cada material antes de empezar.



- En el *Capítulo IV*, se mencionó que se debía calibrar el *equipo de ultrasonido* para obtener las velocidades de propagación del sonido dentro del material, para ello se debía conocer el equipo (*Epoch 1000i*), sus funciones y tipo de materiales que se podían medir.

1.- Para el *ensayo de ultrasonido*, se usaron los mismos materiales que en el *ensayo de tracción*, fabricados en la misma maestranza (*CONACER, Chiguayante*), con el fin de comparar diferentes ensayos pero con los mismos materiales. El diseño de estas probetas (Ver figura 59) se realizaron con dos medidas de espesor diferente en cada material, para efectuar la medición en un solo ejemplar, ya que para calibrar el equipo, se necesitaban efectivamente dos espesores diferentes.

En las figuras (61) y (62) se ven como tomar la medición de los dos espesores diferentes utilizados para la calibración con palpador recto, y en las figuras (63) y (65) se ven como tomar la medición de los dos espesores diferentes utilizados para la calibración con palpador angular.

2.- Seguidamente, se debió seleccionar el *palpador indicado* para cada probeta, en este caso se utilizó el mismo en todos los materiales (*palpador recto A109S 5MHz/0,5''* y *palpador A543S, con zapata ABWM-4T 45° para la medición angular*) ya que éstos poseen una estructura interna fina, sin tamaños de granos grandes que muchas veces produce demasiada interferencia en la señal de ultrasonido, lo que impide la toma correcta de los datos.

3.- Finalmente, para calibrar de manera correcta el equipo de ultrasonido, se hizo imprescindible tener conocimiento sobre los valores de las velocidades que la literatura entrega, ya que el equipo necesita un *valor tentativo* antes de obtener el valor real. En el *Capítulo IV* se explica en detalle cómo se obtuvieron las velocidades tanto longitudinal como transversal.



El análisis y la evaluación de los resultados entregados por ambos ensayos se ven reflejados en tablas con los respectivos valores para cada material, donde se utilizó el *acero carbono SAE 1020*, *acero inoxidable AISI 316*, *Duraluminio Laminado* y *bronce SAE 640*, metales diferentes, con propiedades específicas propias, pero con la singularidad de ser todos, *materiales isotrópicos*, lo que implicó, que la teoría se aplicó para todos igual.

Los valores de las constantes elásticas de materiales isotrópicos obtenidas por medio del ensayo de tracción, se encuentran en la tabla (7) y los valores obtenidos por medio del ensayo de ultrasonido se encuentran en la tabla (12). Los valores que la literatura entrega se encuentran en la tabla (2) del *Capítulo II*.

Al contrastar los valores anteriormente mencionados, utilizando el *valor medio de los desfases*, se puede determinar:

Tabla 12: Comparación De Valores Del Módulo Elástico

	Literatura	Tracción	Ultrasonido	Desfase Tracción	Desfase Ultrasonido
Acero	E [Gpa]	E [Gpa]	E [Gpa]	[%]	[%]
Acero Inoxidable	190	192	214	1,1	12,6
Acero Carbono	207	177	206,6	14,5	0,2
Aluminio	71	133	75,1	87,3	5,8
Bronce	111	139	145,1	25,2	30,7
				32,0	12,3



Tabla 13: Comparación De Valores Del Módulo De Poisson

	Literatura	Tracción	Ultrasonido	Desfase Tracción	Desfase Ultrasonido
Acero	ν	ν	ν	[%]	[%]
Acero Inoxidable	0,31	0,28	0,27	9,7	12,9
Acero Carbono	0,29	-----	-----	-----	3,4
Aluminio	0,33	-----	-----	-----	3,0
Bronce	0,35	-----	-----	-----	14,3
				9,7	8,4

Tabla 14: Comparación De Valores Del Módulo De Corte

	Literatura	Tracción	Ultrasonido	Desfase Tracción	Desfase Ultrasonido
Acero	G [Gpa]	G [Gpa]	G [Gpa]	[%]	[%]
Acero Inoxidable	73,1	75	84,4	2,6	15,5
Acero Carbono	79,3	69	79,4	13,0	0,1
Aluminio	26,2	50	28,1	90,8	7,3
Bronce	41,4	51	55,6	23,2	34,3
				32,4	14,3



Al analizar las tablas se logra determinar que el ensayo de Tracción es más impreciso que el ensayo de Ultrasonido, sin embargo, nos fue posible registrar el valor real del módulo de Poisson, debido a que no se puede medir su elongación v/s su estricción de manera instantánea, como solución a este problema, existe un dispositivo digital que capta dicha medida de forma más exacta evitando, desfases significativos en el resultado.

Los valores del *módulo elástico* y el *módulo de corte* en ambos ensayos se encuentran cercanos a lo que la literatura entrega, excepto el Aluminio que al ser traccionado entregó valores muy alejados a lo real. Uno de los factores que puede explicar tanto desfase en su valor, puede ser debido al proceso de fabricación del aluminio (*Duraluminio Laminado*), esto se evidenció en el comportamiento que mostró el material cuando se le practicó el ensayo de tracción, donde debía estirarse más que el resto de los metales, éste rompió antes de lo esperado, lo que no se suponía que debía ocurrir en un material dúctil como el aluminio. Al ser laminado el material, este adopta en cierta medida un grado de anisotropía, y considerando que las formulas usadas para los cálculos de las constantes elásticas son solo para materiales isotrópicos, el valor obtenido tiende a desfasarse.

Finalmente se refleja en los resultados que el ultrasonido es mucho más completo que el ensayo de tracción, hoy día existe una manera diferente de obtener los valores de las constantes elásticas en la universidad del Bio Bio que muchos alumnos desconocen, las siguientes generaciones podrán determinar estos valores con un dispositivo nuevo, limpio, seguro y rápido como lo es el equipo Epoch 1000i.

Si se logra dominar bien el método de medición sería posible incluso usarse a nivel industrial, en trabajos de cambios de repuestos, medición de esfuerzos en estructuras, pruebas de materiales nuevos como sustitutos, etc.

*BIBLIOGRAFÍA*

- [1] Mason, W.P. (1964). "Physical Acoustics, Academic Press", Volume 1, New York, EE.UU, pp. 72-76.
- [2] Kino, G.S. (1987). "Acoustic Waves: Devices, Imaging & Analog Signal Processing. Prentice-Hall", New York, EE.UU, pp. 1-84.
- [3] White, G. (2009). "Introducción al análisis de vibraciones". Recuperado el, 18.
- [4] Olarte, W., Botero, M., & Zabaleta, B. C. (2011). "Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo". *Scientia et Technica*, 2(48), 253-256.
- [5] Mazari, M. (1981). "Los métodos magnéticos de la física de partículas cargadas desarrollados en México". *Instrumentación y Desarrollo*, 1, 20.
- [6] Aditivos, S. (1997). "Práctica recomendada para el examen de uniones soldadas mediante la utilización de líquidos penetrantes". *UNE*, 14612(1980), 12517-1.
- [7] De la Vega Muñoz, C. A. (1989). "Interpretación de radiografías para el control de calidad en soldadura industrial". *Marcombo*.
- [8] Martínez Rodríguez, J. A., Vitola Oyaga, J., & Sandoval Cantor, S. D. P. (2007). "Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido". *Revista Tecnura*, 10(20), 4-18.
- [9] Lacalle, R., García, J., Álvarez, J. A., & Gutiérrez-Solana, F. (2009). "Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos". In *Anales de Mecánica de la Fractura* (Vol. 26, pp. 501-506).
- [10] Santos De La Cruz, E., Cancino Vera, N., & Yenque Dedios, J. (2005). "El ultrasonido y su aplicación". *Ind. data*, 8(1), 25-28.



- [11] Rodríguez González, C. (2012). "Sistema automatizado de detección de defectos en piezas metálicas mediante ensayos no destructivos con ultrasonidos".
- [12] París, F., Cañas, J., Marín, J. C., & Barroso, A. R. D. (2006). "Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos". Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.
- [13] García Alonso, M. D., Alonso Alonso, M. C., Andrade Perdrix, M. C., & Rodríguez Santiago, J. (1998). "Influencia de la corrosión en las propiedades mecánicas del acero, Hormigón y Acero", (210)
- [14] López, G. A. (1999). "Estudio de la intercara de uniones entre metales disímiles por medio de ultrasonido." *Revista de metalurgia* 35.1, 17-21.
- [15] Lacalle, R., Álvarez, J. A., & Gutiérrez-Solana, F. (2007). "Análisis de aspectos fundamentales para la interpretación de los resultados del ensayo Small Punch". In *Anales de Mecánica de Fractura* (Vol. 24, pp. 515-520).
- [16] Rubio, L., Fernández-Sáez, J., & Navarro, C. (1998). "Factor de intensidad de tensiones dinámico en probetas de flexión en tres puntos y de flexión en un punto, sometidas a pulsos de carga de corta duración". En *Análisis de Mecánica de la Fractura* (Vol. 15, pp. 97-101).
- [17] Jiménez, J. (2008). "Implementación de un algoritmo para la detección de defectos en tuberías mediante ensayo no destructivo de materiales por ultrasonido" [tesis de maestría]. Universidad del Valle: Cali, Colombia.
- [18] R. J. Atkin & N. Fox. (1980). "An Introduction to the Theory of Elasticity", ed. Dover.
- [19] Baker, Joanne (06 de 2013). "50 cosas que hay que saber sobre física (1ª edición)". p. 224. ISBN 978-84-672-5575-1.
- [20] Timoshenko, Stephen; Godier J.N. (1951). "McGraw-Hill, ed. Theory of elasticity".



[21] Ortiz Berrocal, Luis (1998). “McGraw-Hill, ed. Elasticidad”. Aravaca (Madrid). pp. 94–96. ISBN 84-481-2046-9.

[22] Olivella, X., Agelet de Saracibar, C. (2000). “En Edicions UPC. Mecánica de Medios Continuos para Ingenieros”. Barcelona. pp. 71–75. ISBN 978-84-8301-412-7

[23] Mroginski, J. L., Beneyto, P. A., Di Rado, H. A., Manzollilo, J. E., & Awruch, A. M. (2004). “Análisis Tridimensional de Sólidos por el MEF”. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de la UNNE.

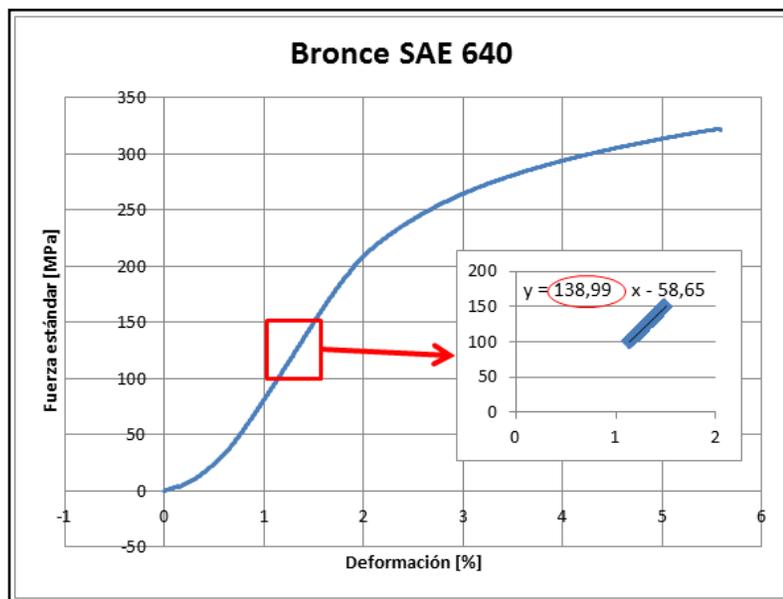
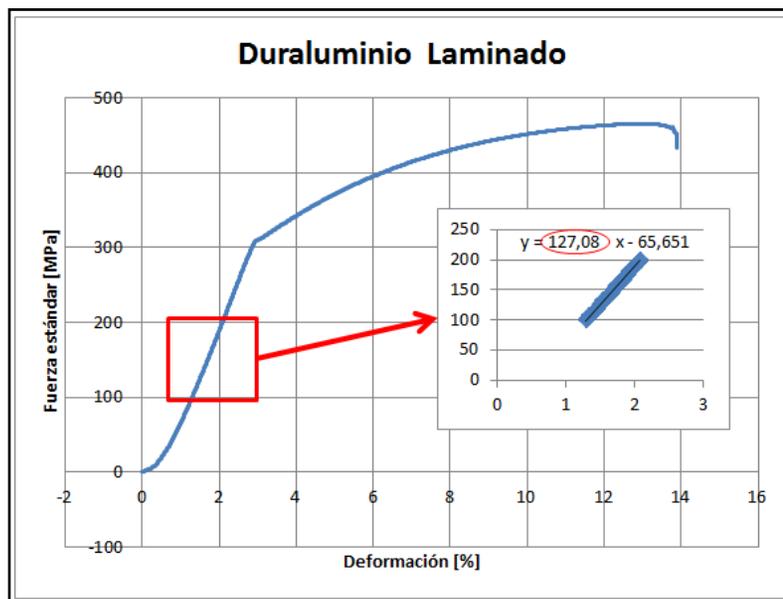
[24] Tascón Mosquera, D. J., & Ruíz Giraldo, A. F. (2013). “Medición de propiedades elásticas de materiales isotrópicos por ultrasonido”.

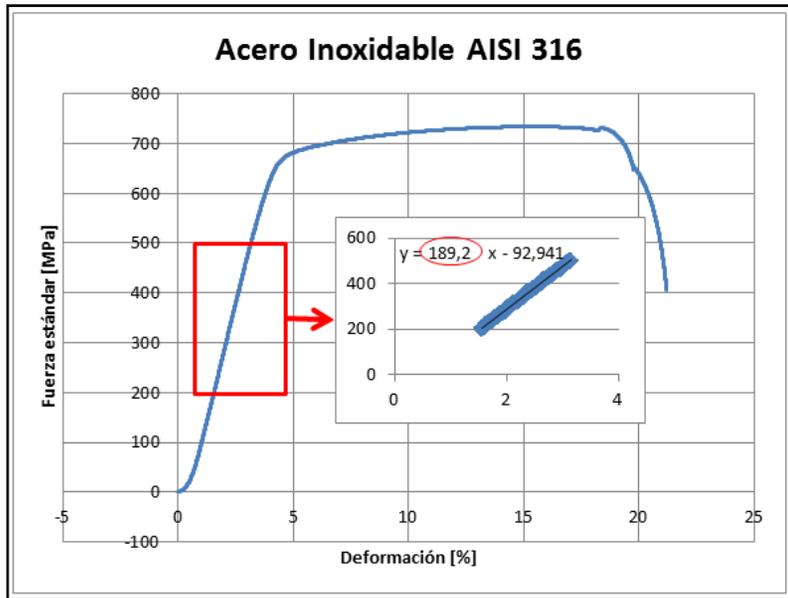
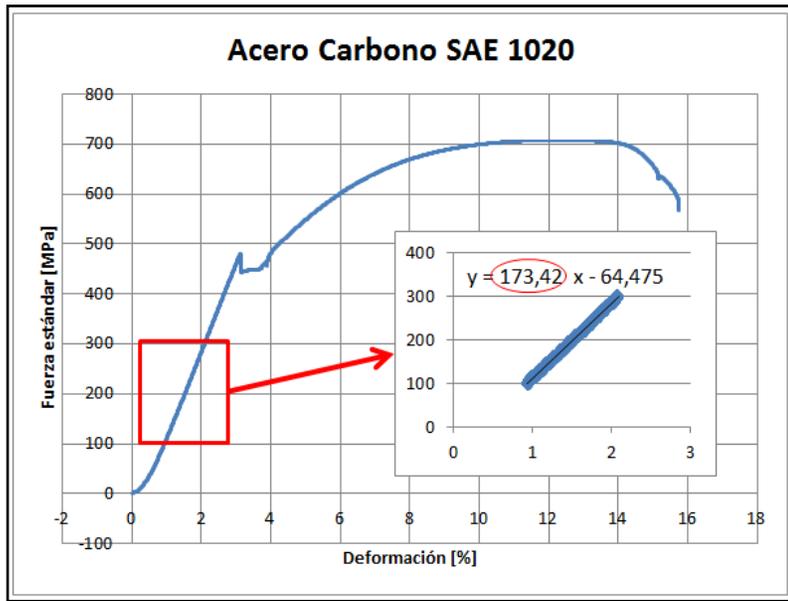
[25] Guerrero, A. (2000). "Evaluación del comportamiento de cabillas de acero con bajo contenido de carbono soldadas a tope y sometidas a ciclos severos de carga pulsante". Trabajo Especial de Grado para optar por el Título de Ingeniero Metalúrgico, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, mayo.

[26] Budynas R. G., Nisbett J. K. (2008). "Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley". Octava Edición. Mc Graw Hill. Santa Fe de Bogotá.



Una forma de obtener el **módulo de Young** es el valor que automáticamente entrega el programa **TestExpert II**, sin embargo el mismo programa, presenta los datos del ensayo en formato, Excel lo que permite determinar este módulo de forma manual:





Tal y como dice la teoría, el valor que acompaña a la x , es el valor de la pendiente, dicha pendiente pertenece al módulo de Young, y está marcado con una elipse de color rojo dentro de la ecuación.