

**Ministerio de Educación Superior.
Universidad de Holguín.
Facultad de Ingeniería
Sede “Oscar Lucero Moya”**

TRABAJO DE DIPLOMA

**TÍTULO: Relación entre la forma de la grieta y
la temperatura de temple con la tenacidad en
probetas Charpy**

Autor: Andrés Manuel Cantillo Oramas

Tutor: MSc. Ing. Pavel Michel Almaguer Zaldivar

Holguín, 2019

“Año 60 de la Revolución

PENSAMIENTO

Si asumimos que hay un instinto hacia la libertad, que hay oportunidades para cambiar las cosas, entonces hay una posibilidad que puedas contribuir a hacer un **MUNDO MEJOR** esa es tu alternativa.

Noam Chomsky.

DEDICATORIA

A la Revolución por darnos la oportunidad de estudiar y formarnos como profesionales.

A la que paso tantas noches de desvelo y sufrimiento con cada examen que hacía, a la que temía, callaba y tragaba amargo, la que siempre me tuvo la confianza, en fin a la que me dio la vida, a la que me mima cuando me porto mal. A mi Madre.

A mi padre le debo agradecer ese carácter fuerte, intransigente, responsable que siempre me hace conciencia y me hace recapacitar y hacer lo correcto cuando estoy desviado del camino.

A mi hermano que siempre me ha apoyado en todas mis travesuras y en el dolor. Y a todos mis Amigos que sin ellos no estuviera haciéndome hoy un profesional.

A mi tutor que es una gran persona tanto en lo profesional como en lo cotidiano

RESUMEN

El estudio de las propiedades mecánicas es un tema muy importante para los ingenieros mecánicos. En este se realiza un estudio de los fundamentos de la investigación para evaluar la variación de la tenacidad con la temperatura de calentamiento en un acero CT3. Para realizar los experimentos se maquinaron probetas de ensayo a impacto Charpy con dos tipos de grietas diferentes. Se calentaron probetas a 750 y 950 °C, las que fueron enfriadas en agua para mantener la estructura lograda en el calentamiento. Después se realizó el ensayo Charpy a estas y a otras probetas no tratadas. Se obtuvo que la tenacidad disminuyó con el aumento de la temperatura de calentamiento. Con los valores obtenidos de energía se determinó la carga dinámica en el impacto, para lo que se utilizó la Ley de Conservación de la Energía. Se simuló el proceso de calentamiento y enfriamiento. Los resultados se aplicaron como cargas mecánicas en un estudio estático, que sumadas a la carga dinámica, permitió evaluar el estado tensional – deformacional en las probetas.

SUMMARY

The study of the mechanical properties is a very important topic for the mechanical engineers. In this Final Work a study of the theoretical foundations of the investigation to evaluate the variation of the toughness with the temperature of heating in a steel CT3. In order to realize the test, some Charpy specimens with two types of different cracks were machined. Some specimens were warmed up to 750 and 950 and after were cooled in water to maintain the structure achieved in heating treatment. After Charpy test to these specimens and to others that not be heated was made. It was obtained that toughness diminished with the increase of the temperature of heating. The dynamic load in the impact moment was determined by means of the Law of Conservation Of Energy. The process of heating and cooling were simulated. The results were applied like mechanical loads in a static study, than added up to the dynamic load, it allowed evaluating the stress – strain state in the specimens.

Índice

Introducción

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 CAPÍTULO INTRODUCCIÓN

1.2 Procesos de temple

1.3 La unión soldada

1.3.1 Zonas de la unión soldada

1.4 Ensayo Charpy

1.5 El método de los elementos finitos

CAPÍTULO 2. Relación entre la tenacidad, la temperatura de temple y las formas de la grieta

2.1 Introducción al capítulo

2.2 Características del acero CT-3 (AISI 1010)

2.3 Probetas para el ensayo Charpy

2.4 Proceso de calentamiento de las probetas

2.5 Ensayo Charpy

2.6 Simulación del ensayo Charpy

2.7 Análisis de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

INTRODUCCIÓN

La tarea central para la construcción de la base técnico-material del socialismo es la aceleración del proceso de industrialización. Para ello se tiene como base la utilización de la ciencia que aporta el fundamento material para las profundas transformaciones que se requieren realizar en la estructura técnico-productiva del país. (Reyes Lores, 2011)

Para este fin se hace necesario el estudio permanente de los avances de la ciencia y la técnica y dirigir las investigaciones a la búsqueda de soluciones a los problemas que surgen de las características propias de nuestra economía. Se tienen que considerar todo, la rápida incorporación de los logros científicos a la práctica social con el creciente aumento e introducción del diseño industrial. También el aseguramiento normativo y metrológico en la economía, todo lo cual desempeña un papel de gran importancia en el mejoramiento de la calidad de la producción y los servicios que representa uno de los elementos fundamentales en que se manifiesta la elevación de la eficiencia económica.

La actividad del diseño industrial debe ocupar un lugar importante en estos esfuerzos. Esta constituye elementos indispensables para el logro de nuevos productos, disminuir el gasto de material, elevar la calidad para la necesaria promoción de nuevos fondos exportables y la sustitución de importaciones, así como, el crecimiento de la producción del país sobre la base de la economía de materiales y la elevación del bienestar del pueblo.

Para lograr un buen diseño es imprescindible un gran dominio de los conocimientos que aporta al ingeniero la Resistencia de Materiales y a la vez es muy importante para esto la realización de las prácticas de laboratorio. En la universidad existen grandes problemas con el aseguramiento material debido a la situación económica por la que atraviesa el país. En el laboratorio de Resistencia de Materiales se desarrollan experimentos que permiten conocer las propiedades mecánicas de un material. También es posible realizar ensayos mecánicos a estructuras o partes de ellas, para conocer la respuesta de la misma ante la acción de una acción externa.

El conocimiento de las propiedades mecánicas de los metales es de gran importancia para un especialista, mediante esto, se pueden conocer las condiciones en que puede trabajar un metal, así como tener una idea sobre la vida útil de la estructura.

A menudo la integridad de toda una estructura se ve afectada por la integridad de las uniones que la conforman. Dentro de estas uniones, las soldadas tienen un papel

importante. Debido a los procesos térmicos que ocurren durante la soldadura de los metales, en la unión tienen lugar cambios metalúrgicos que influyen en el comportamiento global de la unión. Por esta razón, la búsqueda de alternativas para caracterizar las diferentes zonas que conforman la unión soldada es de interés para los ingenieros e investigadores. Debido a la distribución desigual del calor durante los procesos de soldadura es posible afirmar que en la Zona de Afectación Térmica (ZAT) de una unión ocurre un tratamiento térmico variable. Las diferentes temperaturas alcanzadas en las piezas a unir, si alcanzan las temperaturas a las que ocurren los cambios de fase en la estructura metalográfica del metal base, causan cambios metalúrgicos y por tanto, variación de las propiedades mecánicas.

Lo expuesto en el párrafo anterior da lugar a la siguiente **Situación Problemática**:

El calentamiento desigual durante los procesos térmicos provoca variación de las propiedades mecánicas de los metales ferrosos.

El **problema** se define entonces: ¿Cómo evaluar la variación de la tenacidad en los cambios de fases que ocurren debido al calentamiento a diferentes temperaturas de probetas Charpy de Acero CT-3?

Campo de acción: La variación de las propiedades mecánicas debido al calentamiento a diferentes temperaturas de los metales ferrosos.

Objeto de estudio: las probetas Charpy calentadas a diferentes temperaturas

Hipótesis: Si se calientan diferentes temperaturas, probetas para ensayo Charpy de diferente configuración de grieta, y se ensayan a impacto será posible relacionar la energía consumida en la fractura, con la temperatura de temple y la forma de la grieta.

Objetivo general: Obtener una relación entre la temperatura de calentamiento, la forma de la grieta y la energía consumida durante el ensayo Charpy en probetas de acero CT-3.

Tareas de investigación:

1. Búsqueda bibliográfica sobre los procesos térmicos en los metales ferrosos.
2. Caracterizar el material para conocer la composición química y las propiedades físico – mecánicas.
3. Fabricar las probetas Charpy para realizar los procesos de calentamiento y los ensayos a impacto.
4. Determinar los parámetros del proceso de temple
5. Realizar los procesos de calentamiento y ensayar las probetas a impacto.

6. Simular el ensayo de impacto
7. Elaborar el informe general

Los **métodos** utilizados en la investigación fueron entre otros:

- Método histórico-lógico: Para conocer el estado de la problemática objeto de investigación en nuestro entorno, constituye la fundamentación teórica del trabajo.
- Métodos analíticos: Para el conocimiento de la realidad según las diferentes fuentes de información.
- Método de análisis y síntesis: Para el procesamiento de la información obtenida.
- Interpretación de los resultados: Para hacer una valoración del estado de los diferentes indicadores.

Capítulo 1. Fundamentación teórica de la investigación.

1.1 Introducción

En este capítulo se aborda sobre los procesos de temple, las uniones soldadas, las zonas de las uniones soldadas, los ensayos Charpy y el Método de los Elementos Finitos. Estos son temas necesarios para conocer los fundamentos de las distintas pruebas que se realizan en este trabajo para evaluar la dependencia entre la tenacidad, la forma de la grieta y la temperatura de calentamiento en probetas Charpy con dos tipos de grietas.

1.2 Procesos de temple

El acero es el material principal que se emplea de una manera amplia en la construcción de máquinas, aparatos e instrumentos, la construcción, como también para la fabricación de diferentes herramientas es relativamente de bajo costo y se fabrica en grandes cantidades. El acero posee un complejo apreciable de propiedades mecánicas, físico – químicas y tecnológicas. Los aceros al carbono no solo contienen hierro y carbono debido a que en la extracción del mineral y obtención del acero intervienen distintos procesos como metalúrgicos, siderúrgicos y tecnológicos, por lo cual resulta muy difícil obtener aceros o fundiciones puras. Quiere decir que siempre van a existir impurezas.

En los aceros las impurezas se pueden dividir en cuatro grupos:

1. *Constantes:* (Mn, Si, Al) se utilizan como desoxidantes y (P y S) porque en las producciones en gran escala es imposible eliminarlos.

Mn (0,3 – 0,7), Si (0,2 – 0,4), Al (0,01 – 0,02), P (0,01 – 0,05), S (0,01 – 0,04).

2. *Latentes:* (O₂, H₂, N) que están presentes en alguna forma en cantidades muy pequeñas. Los métodos para determinarlas químicamente son complicados y, por esto, el contenido de estos elementos no se indica en las condiciones técnicas ordinarias.

3. *Accidentales:* a este grupo pertenecen las impurezas que llegan al acero procedente de los materiales de carga o de un modo casual.

4. *Elementos de aleación:* que se adicionan en determinadas concentraciones con el fin de variar las estructuras y propiedades mecánicas (Guliaev, 1978)

Influencia del carbono.

El carbono influye mucho en las propiedades del acero, incluso cuando su contenido varía de forma insignificante. Por esto cuando el contenido de todas las demás posibles impurezas es pequeño, el elemento principal, por medio del cual pueden hacerse variar las

propiedades de una aleación ferrosa, es el carbono.

A medida que aumenta el contenido de carbono, varía la estructura del acero. El acero que contiene más del 0,8 % de C está constituido por perlita; en el acero que contiene más del 0,8 % de C, además de la perlita, hay cementita secundaria; si el contenido de carbono es menor que el 0,8 %, la estructura constará de ferrita y perlita.

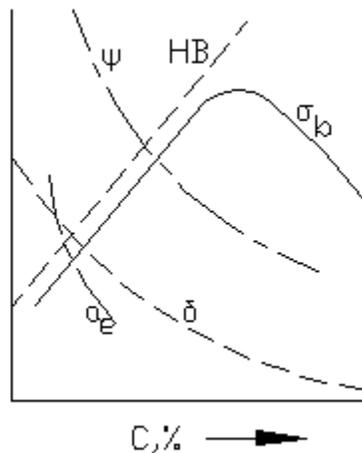


Figura 1.1 Influencia del Carbono

El aumento del contenido de carbono en el acero hace que se eleve su resistencia y que descienda su plasticidad. Las propiedades mecánicas que se dan se refieren a piezas laminadas en caliente sin tratamiento térmico, es decir, con estructura de perlita más ferrita (o perlita más cementita). Si el acero se utiliza en forma de pieza fundida, la estructura de la fundición es más burda y posee peores propiedades que las que se muestran en la figura anterior.

El aumento del contenido de carbono eleva la temperatura del umbral de fragilidad en frío (intervalo de temperaturas de la transición del acero al estado frágil) en término medio en 20 °C por cada 0,1 % de carbono.

El crecimiento de la cantidad de cementita es directamente proporcional al contenido de carbono. La dureza de la cementita (HB 800) es de un orden mayor que la dureza de la ferrita (HB 80). Las partículas duras de la cementita elevan la resistencia a la deformación, reduciendo la plasticidad y resiliencia. De este modo al elevarse en el acero el contenido de carbono, aumenta la dureza, el límite de rotura y se reduce la resiliencia, el alargamiento y estrechamiento relativos. (Guliaev, 1978)

1. Influencia de las impurezas constantes en las propiedades del acero.

Como se mencionó al principio, se consideran impurezas constantes de los aceros: el manganeso, silicio, fósforo, azufre y ciertos gases (hidrogeno, nitrógeno, oxígeno), que en mayor o menor cantidad están siempre presente en los tipos técnicos de aceros.

Por lo general, el contenido de estos elementos está limitado por los siguientes límites posteriores, en porciento; 0,8 Mn; 0,5 Si, 0,05 P; 0,05 S.

Si su contenido es mayor, el acero debe considerarse aleado, tipo en el cual estos elementos se introducen especialmente para lograr un objetivo o propiedad determinada.

El *silicio* y el *manganeso* son impurezas benignas. Están pasan al acero en el proceso de desoxidación durante la fusión. La desoxidación mejora las propiedades del acero. El *silicio* eleva considerablemente el límite de fluencia del acero, lo que reduce la capacidad del acero a la embutición. Por ello en los aceros destinados para el estampado en frío debe ser mínimo el contenido de silicio.

El manganeso eleva la resistencia del acero sin reducir su plasticidad y disminuye bruscamente la fragilidad a altas temperaturas (fragilidad al rojo). El manganeso reduce la influencia nociva del oxígeno y el azufre.

El azufre es una impureza nociva en el acero, su contenido en dependencia de la calidad del acero no debe superar el 0,06 %. El azufre es insoluble en el hierro. Combinado con el hierro forma el compuesto químico sulfuro ferroso. El compuesto FeS crea con el hierro una aleación eutéctica con una temperatura de fusión de 988 °C. Cuando se calienta el acero hasta 1000 – 1300 °C la eutéctica se funde y se distorsiona el enlace entre los granos del metal, es decir, se torna más frágil, a consecuencia de la fusión de las impurezas por los límites de los cristales. El fenómeno de la fragilidad al rojo puede revelarse durante el forjado o la laminación del acero, cuando debido a la fragilidad al rojo en el metal deformado en los lugares de disposición de la eutéctica surgen desgarros y grietas.

Los sulfuros, tanto como otras inclusiones no metálicas, reducen considerablemente la homogeneidad de la estructura y las propiedades mecánicas del acero, especialmente, la plasticidad, la resiliencia y el límite de fatiga, como también empeora la soldabilidad y la resistencia a la corrosión.

El fósforo, al igual que el azufre es una impureza nociva. Disolviéndose en la ferrita, el fósforo distorsiona y compacta sustancialmente su red cristalina. En este caso, se elevan

los límites de rotura y fluidez de la aleación, pero se reduce su plasticidad y resiliencia. El fósforo eleva considerablemente el umbral de la fragilidad en frío del acero y aumenta la tendencia de la aleación a la segregación.

Los gases (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno) se disuelven parcialmente en el acero y se hallan en forma de inclusiones no metálicas frágiles: óxidos y nitratos. Las impurezas concentradas por los límites de los granos en forma de nitruros y óxidos, elevan el umbral de fragilidad en frío, reducen el límite de fatiga y la resistencia a la rotura frágil.

La influencia del hidrogeno disuelto en el acero se revela en que la aleación se torna más frágil. Además, el hidrogeno absorbido durante la fusión del acero acarrea la formación de flósculos en grandes piezas forjadas: grietas muy finas de forma ovalada o redonda. (Guliaev, 1978).

Acero al carbono común.

El acero laminado en caliente que suministran las fábricas metalúrgicas en forma de lamidos (barras de diversa sección, vigas, chapas, etc.) es el material que más se emplea en la fabricación de maquinarias, máquinas herramientas, estructuras metálicas de construcción, etc. Según las normas GOST, el acero debe responder a determinadas condiciones.

Si el acero se utiliza para piezas que no han de someterse a trabajo en caliente (soldadura, forja, etc.) la estructura y propiedades que obtiene el acero al salir del taller de laminación, las conserva cuando llegar al consumidor. En este caso el acero se suministra al consumidor de acuerdo únicamente con las propiedades mecánicas. La composición química no se garantiza.

Si el consumidor va a someter el acero a trabajo en caliente la estructura y las propiedades mecánicas iniciales no se conservan. En este caso lo más importante para el consumidor es la composición del acero, ya que ella determina el régimen de trabajo en caliente y las propiedades mecánicas finales de la pieza. El acero se suministra al consumidor, en este caso, de acuerdo a su composición química.

Si el acero se ha de someter a soldadura, en la Zona de Afectación Térmica de la costura soldada varían las propiedades del metal. Para el consumidor tiene importancia conocer la composición química del acero, puesto que ella es la que determinan las propiedades en dicha zona y el régimen de soldadura. Al mismo tiempo se deben conocer las propiedades mecánicas iniciales del metal, por que las partes de la pieza que no sufren la influencia

térmica de la costura soldada conservan sus propiedades. En este caso, se suministra el metal garantizando a la vez su composición química y propiedades mecánicas. (Guliaev, 1978)

- **Clasificación de los aceros.**

Los aceros se pueden clasificar atendiendo:

1) A su estructura en equilibrio en:

1. Aceros hipoeutectoides, los cuales tienen en su estructura exceso de ferrita.
2. Aceros eutectoides, que tienen estructura perlítica.
3. Aceros hipereutectoides, que tienen en su estructura exceso de carburos (secundarios).
4. Aceros ledeburíticos, que tienen en su estructura carburos primarios, que se separan del acero líquido.

2) A su estructura después de enfriarse al aire en:

5. Perlíticos, que se caracterizan por tener un contenido relativamente bajo de elementos de aleación.
6. Martensíticos, presentan un contenido más considerable de elementos de aleación.
7. Austeníticos, que contienen un alto contenido de dichos elementos.

3) A su composición en:

8. Aceros al carbono.
9. Aceros aleados (al cromo, al cromo-níquel, al cromo-níquel-molibdeno, etc.)

4) A sus aplicaciones en:

10. Aceros de construcción, que por regla general son sometidos al tratamiento térmico por el consumidor.
 2. Aceros para herramientas.
 3. Aceros con propiedades físico-químicas especiales.

5) Según el grado de desoxidación:

- Se denomina desoxidación el procedimiento de eliminar el oxígeno del acero líquido. El acero sin desoxidar posee una plasticidad insuficiente y es expuesto a una frágil destrucción durante el labrado a presión en caliente.
- Los aceros por el grado de desoxidación se clasifican en calmados, semicalmados y efervescentes.

- Los aceros calmados están bien desoxidados con manganeso, aluminio y silicio en el horno y la cuchara. Estos se solidifican calmadamente en la lingotera, sin desprendimiento de gases, creando en la parte superior de los lingotes un rechupe de contracción.
- Los aceros efervescentes se desoxidan sólo con el manganeso. Son insuficientemente desoxidados. Al contrario del acero calmado, los aceros efervescentes no tienen rechupes de contracción. Prácticamente el acero efervescente no contiene inclusiones no metálicas de productos de desoxidación. Los aceros son relativamente baratos. Las chapas de este metal destinadas para la fabricación de piezas de la carrocería de automóviles por embutición, tienen buenas cualidades de estampado.
- Los aceros semicalmados por el grado de su desoxidación ocupan un lugar intermedio entre los aceros calmados y efervescentes. Parcialmente son desoxidados en el horno y la cuchara y parcialmente en la lingotera a cuenta del carbono que se halla en el metal. La segregación de los lingotes de los aceros semicalmados es menor que en el efervescente y se aproxima a la segregación en los lingotes de acero calmado. (Guliaev, 1978).

1.3 La unión soldada

La unión soldada es la unión permanente de dos o más partes, obtenidas mediante la soldadura en una zona determinada.

Las uniones soldadas se pueden lograr mediante la fusión, con calor y presión, y solo con presión, el material de aportación puede tener la misma o diferente composición que el material base.

Tipos de uniones

Forma geométrica de la unión

Junta a tope: Forma de unión en que los bordes de la pieza a soldar están colocados uno frente al otro en un mismo plano.

Junta en T: Forma de unión en que el borde de una de las piezas se coloca en la superficie de la otra perpendicularmente. Las costuras obtenidas en este tipo de unión se suelen denominar por el término de soldadura de filete.

Junta a Solape: Forma de unión en que los extremos a unir se colocan uno cubriendo al otro.

Junta de Esquina: Forma de la unión en que los bordes a unir están colocados en ángulo,

en forma tal que ninguno de los dos sobresalga por detrás de la cara extrema del otro elemento de unión. Las piezas se encuentran colocadas aproximadamente a un ángulo de 90°.

Junta por los Bordes: Forma de unión en que las superficies laterales de dos piezas están en contacto y que la costura de soldadura se realiza por los bordes. (Rodríguez Pérez, 2013)

1.3.1 Zonas de la unión soldada

La zona de afectación térmica se divide en tres partes fundamentales, de acuerdo con tres isoterma principales, que son puntos de igual temperatura situados sobre una misma línea. En el caso de los aceros estas tres zonas se conocen como:

- Zona de sobrecalentamiento: se encuentra entre la frontera de la zona fundida con el metal base (denominada zona de transición) y la isoterma de 1100 °C. Se caracteriza por un crecimiento de grano apreciable.
- Zona de recocido: definido entre las isoterma de 1100 °C y la de 900 °C.
- Zona de la primera transformación: ubicada entre las isoterma de 900 °C y la de 700 °C. En esta pueden ocurrir fenómenos secundarios como la formación de carburos.

Después de la isoterma de 700 °C, se encuentra el metal base calentado sin sufrir afectaciones térmicas.

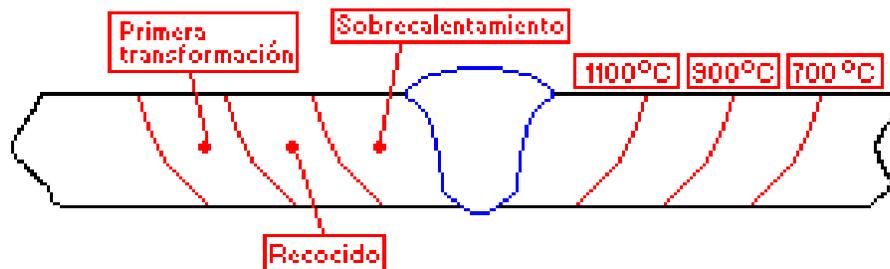


Figura 1.2. Zonas en que se divide la zona de influencia térmica. (Rodríguez Pérez, 1983).

El estudio de la zona de afectación térmica tiene un carácter esencial sobre todo en la soldadura de los aceros sensibles al temple, donde producto de los ciclos térmicos impuestos a las uniones soldadas se desarrollan estructuras de alta dureza y fragilidad. La combinación de estas características, con las tensiones originadas por el calor añadido a la unión y las tensiones estructurales ocasiona muchas veces grietas en dicha zona. (Tamayo Batista, 2012)

1.3. Propiedades mecánicas de los materiales.

Algunas de las propiedades mecánicas de los materiales son:

- Resistencia a la penetración (Dureza).
- Resistencia mecánica (Resistencia a la tracción).
- Resistencia al choque (Resiliencia).
- Resistencia a cargas variables (Fatiga)

El conocimiento de las propiedades mecánicas de los metales es de gran importancia para un especialista. Con ellas se pueden conocer las condiciones en que puede trabajar un metal, de que materiales está compuesto así como tener una idea de la estructura del metal, las diferentes formaciones de los granos, entre otras.

1.3.1. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas.

Ensayo de la dureza.

Por dureza se entiende la propiedad del metal de oponer resistencia a la deformación plástica, y es una de las características más difundidas que permiten apreciar la calidad de los metales y aleaciones sin destruirlos. Existen distintos métodos para medir dureza, en dependencia de la dureza, la exactitud que buscamos, la rapidez y la comodidad de la medición continuación mostraremos algunos de los métodos más utilizados:

Medición de la dureza Brinnell.

Se hace penetrar una bolita de hacer de diámetro D bajo una fuerza P en el metal que se ensaya, esta bolita crea una huella d en la superficie del metal.

El número de dureza Brinnell se determina por la fórmula:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.1)$$

Medición de dureza Rockwell.

Este método consiste en hacer incidir contra la probeta un cono de diamante de ángulo 120° en el vértice o una bola de acero de 1,59 mm de diámetro.

Se llama número de dureza Rockwell HR a la magnitud inversa a la profundidad de penetración h .

Existen tres escalas de dureza Rockwell:

HRB – Para materiales blandos se utiliza una bola de acero como penetrador, aplicándose una carga previa de 100 N y una carga principal de 900 N.

HRC – Para piezas duras (templadas) se utiliza el cono con una carga previa de 100 N y una principal de 1400 N.

HRA – para piezas muy duras o finas, se le aplica una carga previa de 100 N y una carga

principal de 500 N.

Gracias a su sencillez, rapidez, alta precisión y pequeño tamaño de la huella, el método de Rockwell ha adquirido un amplio uso en la industria.

Otros métodos de medición de la dureza.

En muchos casos cuando la pieza a medir es muy voluminosa, de difícil acceso o por otras causas, no puede llevarse al laboratorio para medirle la dureza por los métodos antes estudiados, se utilizan métodos que, aunque no son tan exactos, si son prácticos y rápidos, y de fácil transportación y manejo.

Medición de la dureza por el método Poldy.

Se basa en el siguiente método:

Una bolita de acero templado se coloca entre la pieza a medir y una probeta estandarizada de acero Y8, se golpea ésta última, a la cual se le conoce la dureza, y se miden la huella en la pieza y en la probeta, y según la relación de sus diámetros, mediante una tabla especial se determina la dureza de la pieza.

Se utiliza para piezas grandes como estampas, etc., así como para medir la dureza en piezas complejas donde no se puede utilizar los métodos anteriores.

Medición de la dureza por el método de Shore.

Al medir la dureza, la carga junto a una bola de acero fijada a ella, cae perpendicularmente desde una altura H_c a la superficie de la probeta. La dureza Shore se determina por la altura del rebote de la bola H_o , $H_c - H_o = H_s$.

La escala de la dureza está dividida en 130 unidades y ajustada de tal modo que la dureza del acero eutectoide (Y8) templado sea igual a 100 unidades. Estos aparatos se usan para hacer mediciones rápidas. No existe relación con otros métodos.

Medición de la dureza Vickers. (HV)

La dureza se determina haciendo penetrar una pirámide tetraédrica de diamante con un ángulo de 136° C en el vértice, en la superficie pulida o rectificada del metal que se prueba. La huella obtenida tiene forma de rombo.

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2} \quad (1.2)$$

Donde P: carga aplicada sobre la pirámide (50, 100, 200, 300, 500, 1000 y 1200 N)

d: media aritmética de las dos huellas diagonales, medidas en el mismo equipo con la ayuda de un sistema de lentes y una pantalla graduada.

Este método se utiliza para medir la dureza de las piezas de pequeño grosor y de las capas superficiales delgadas que tienen alta dureza.

Medición de la dureza con limas taradas.

Método poco preciso, pero sencillo y fácil de aplicar, consiste en una serie de limas de diferentes durezas, en la superficie a medir se pasan varias limas, aquella que sea más dura que la superficie arrancará virutas, mientras que las más blandas no.

Microdureza (H)

Para determinar la dureza de los diversos constituyentes estructurales de una aleación, hay que localizarlos rigurosamente, y la deformación debe ser pequeña, al igual que la carga (1 – 10 gf). Esto se logra con dispositivos especiales que se adicionan a algunos microscopios que una pirámide de diamante incide sobre un punto concreto, que se observa en una probeta metalográfica con 100 – 400 aumentos. Luego con el microscopio se mide la diagonal de la huella, esta dureza se llama *microdureza (H)* y caracteriza la dureza de una constituyente estructural determinada.

Ensayo de tracción.

Consiste en el alargamiento de una probeta estandarizada de forma cilíndrica, cuyos extremos son más gruesos para poder ser fijados por la máquina, en estos generalmente existen aparatos diagramadores que registran la curva de deformación mediante las cuales, podemos obtener las siguientes magnitudes:

Resistencia a la rotura: σ_b o σ_r (MPa)

Límite de fluencia: $\sigma_f, \sigma_T, \sigma_{0,2}$ MPa

También podemos determinar la plasticidad mediante:

- elongación - δ (%)
- estricción - ψ (%)

Ensayo a la resiliencia (Ak)

La resiliencia es la resistencia a la rotura por choque de un metal con lo cual se establece el grado de fiabilidad de un metal.

Se determina el trabajo necesario para romper una probeta y se divide por su sección transversal. Para esto se utilizan probetas normalizadas.

NC: 04-12:67 “Ensayos al choque de los aceros”.

Las probetas de una sección estándar (0,8 cm²) con un entalle.

$$A_k = \frac{A}{F_p}, \quad MJ/m^2 \quad (1.3)$$

Donde A: es el trabajo para partes de una probeta

F_p: es la sección transversal (0,8 cm²)

La rotura de la probeta colocada sobre dos apoyos se realiza por el golpe de un péndulo (péndulo de Charpy) provisto de un martillo.

Las probetas estandarizadas para estos ensayos se definen en las normas NC: 04-12-67 “**Recipientes a presión. Fijación** (Oficina Nacional de Normalización, 1967) y GOST 9454-60 para un área de sección de rotura (Reyes Rodríguez, 2008).

Ensayo a la fatiga.

Cuando una pieza sufre una carga de magnitud y sentido variable, la rotura puede producirse a tensiones menores que la de rotura, por ello es importante conocer la resistencia a la fatiga de un metal, sobre todo, mediante ensayos, conocer el límite de fatiga.

Existen otros ensayos que también son utilizados para conocer las propiedades de un metal.

Ensayo al desgaste.

En el país ocurre anualmente una gran pérdida de piezas por el desgaste. Este consiste en el desprendimiento aislado de partículas al rozar dos superficies. (Guliaev, 1978).

En las condiciones de laboratorio, la resistencia al desgaste se determina pesando la probeta antes y después del ensayo.

También es importante el ensayo a la resistencia a la corrosión.

El ensayo a la corrosión consiste en obtener datos sobre la resistencia a la corrosión de materiales y capas en distintos medios, el estudio de la cinética y los mecanismos de los procesos de corrosión. Los experimentos de laboratorios en estos casos no nos dan una valoración real, por lo que se recomienda experimentar mediante la modelación de las condiciones reales de trabajo del material. (Guliaev, 1979)

1.4 Ensayo Charpy

El ensayo se basa en los requerimientos de la ASTM E 23. El péndulo consiste en una barra ligera y rígida, situándose un pesado disco en el extremo. El péndulo está suspendido de una flecha corta que gira en rodamientos de balines y se balancea hasta la

mitad de la distancia entre dos postes verticales, cerca de cuya base están los soportes o yunques de las probetas. El percutor está ligeramente redondeado y debe alinearse de modo tal que establezca contacto con la probeta contra su peralte total en el instante del impacto.

Una probeta estándar para ensayos de flexión es una pieza de 10x10x50 mm ranurada. Otros tamaños se usan en casos especiales. En muchas especificaciones comerciales se requiere una ranura en forma de ojo de cerradura o de U. La probeta, la cual se carga como una viga simple, se coloca horizontalmente entre los dos yunques, de modo que el percutor golpee el lado opuesto de la ranura. El péndulo es elevado hasta su posición más alta y sostenido por un tope ajustado para dar una altura de caída constante para todos los ensayos; luego se le suelta y permite caer y fracturar la probeta. En su movimiento ascendente el péndulo lleva el indicador de fricción sobre una escala semicircular graduada en grados o pie-libras. La energía requerida para fracturar la probeta es una función del ángulo de elevación.

Los ensayos de Charpy para determinar la resistencia al impacto de los metales a bajas temperaturas son comúnmente realizados sumergiendo las probetas en algún líquido fresco en una vasija de boca ancha con una pulgada de líquido arriba y debajo de las probetas. Para temperaturas iguales a la ambiente hasta $-78,3^{\circ}\text{C}$, este líquido es usualmente alcohol o acetona, enfriado a la temperatura deseada mediante la adición de pequeños trozos de hielo seco, aunque para temperaturas más bajas se utiliza el nitrógeno líquido en cuyo caso el líquido para la inmersión sería alcohol, isopentano, o el mismo nitrógeno líquido. Los termómetros adecuados para determinar la temperatura del enfriador son del tipo mercurial o termómetros del tipo de pentano para temperaturas más bajas. Las probetas deben mantenerse a una temperatura por 15 minutos y la temperatura del baño debe mantenerse constante dentro de $-17,6$, $-19,4^{\circ}\text{C}$ durante los últimos cinco minutos antes del ensayo. El ensayo debe completarse dentro de cinco segundos después de retirar la probeta del enfriador

1.5 El método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano.

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada desratización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla.

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para desratización del dominio en elementos finitos. La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso.

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además, el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

El MEF convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número de finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente

sólo una solución aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina conjunto nodos. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras).

El Método de los Elementos Finitos se ha consolidado durante las últimas cuatro décadas como el método numérico más versátil para el análisis de problemas de la mecánica del sólido. Tras el establecimiento de las bases del método, muy pronto surgieron aplicaciones directas a la Mecánica de la Fractura, desde entonces el número de referencias en la literatura acerca de la aplicación del MEF a la Mecánica de la Fractura ha crecido de forma imparable. (Guevara Velázquez, 2018)

De las cargas de impacto se pueden mencionar ejemplos de tales aplicaciones en para golpes y paneles de automóviles, tanques de gasolina, contenedores, aspas de helicópteros, entre otras. En todos los casos el suceso de los materiales en una aplicación requiere el conocimiento del perfil de sus propiedades y en particular, la caracterización de su desempeño frente a impacto.

La simulación numérica del comportamiento mecánico de materiales poliméricos es hoy en día una herramienta que puede ser utilizada para comprender mejor los mecanismos por los cuales este tipo de materiales llega al colapso, y de esta forma aprovechar en forma más adecuada la información obtenida a través de ensayos experimentales. El comportamiento mecánico de polímeros es muy sensible a factores como temperatura, velocidad de deformación y composición química entre otras, siendo alterados fácilmente con la metodología de fabricación. Esta característica introduce considerables complicaciones en la caracterización mecánica de los mismos. Grandes esfuerzos se están realizando actualmente para mejorar las propiedades de plásticos combinando varios materiales, siendo este un campo vastísimo para nuevas investigaciones, donde la simulación numérica puede cumplir un importante papel. Los ensayos de impacto se realizan por varias razones. En principio, resultan útiles para comparar la respuesta dinámica de distintos materiales. También se utilizan con propósitos de investigación y desarrollo en diferentes aplicaciones y, se consideran un parámetro de control de calidad de un proceso de manufactura dado. Por otro lado, los ensayos de impacto se llevan a cabo para simular las condiciones de uso finales de un material o producto, de manera

que éste sea fabricado para sobrevivir al impacto asociado con su uso final. (D'Ambraa, 2009).

R.B. D'AMBRA en el 2009 obtuvo en un ensayo de impacto a una placa delgada sometida a cargas de impacto utilizando el método de los elementos finitos. En la simulación numérica logró capturar los tiempos de inicio de las fisuras radiales y circunferenciales. La aparición de las mismas se pudo detectar tanto por medio de las configuraciones de ruptura, del balance energético como a través de la curva carga tiempo. Existen diferencias en los valores de fuerzas experimentales y numéricos en la zona de inicio de las fisuras radiales, así como en el valor del tiempo para el cual se produce la rotura final de la placa, observándose que la simulación proporciona una configuración final de ruptura donde prevalece la rotura por punzonado de la placa, manifestándose el inicio de una fisura circunferencial en un radio mayor que luego se detiene. La diferencia en la fuerza máxima antes del inicio de las fisuras radiales puede deberse al algoritmo de contacto empleado, además de que en el ensayo la fuerza se mide en el percutor y en la simulación numérica la fuerza se mide en la placa. Otro aspecto importante a tener en cuenta es que el valor de G_f que se introduce en el MED debería incluir otros tipos de mecanismos de disipación de energía, lo que nos habilitaría a utilizar valores de tenacidad más elevados.

(Flores Moreno, 2009) en un estudio térmico realizado a una viga de tren de rodaje de un remolque agrícola obtuvo que como resultado de la aplicación del método propuesto de determinación directa de las tensiones y deformaciones dinámicas, mediante análisis dinámico por elementos finitos, al caso de un eje de carreta agrícola sometido a cargas de impacto, determinó que:

Se obtuvieron valores de los coeficientes de cargas dinámicas del orden de $1/3$ inferior a los obtenidos por métodos tradicionales de cálculo; El método directo de análisis dinámico por elementos finitos, posibilita tener en consideración una mayor aproximación al fenómeno físico presente durante el impacto y a la vez evita la necesidad de efectuar engorrosos cálculos durante la determinación de las deflexiones en estructuras de media y alta complejidad. Asimismo se determinó que durante la solución de este tipo de problema, puede ser aplicado un método en que se combine la determinación de las deflexiones estáticas mediante análisis por elementos finitos, con la determinación de los coeficientes de cargas dinámicas aplicando las expresiones tradicionales de cálculo, con lo cual se

posibilita el cálculo de estructuras de media y alta complejidad sin excesivos requerimientos de hardware, aunque con menos precisión que empleando el método directo. (Flores Moreno, 2009).

Bajo la denominación de Análisis Térmico se engloban un conjunto de técnicas analíticas que estudian el comportamiento térmico de los materiales. Cuando un material se calienta o se enfría, su estructura cristalina y su composición química pueden sufrir cambios más o menos importantes:

Fusión: paso del estado sólido al estado líquido.

Sublimación: paso del estado sólido al estado gaseoso.

Solidificación: paso del estado líquido al estado sólido.

Cristalización: paso al estado sólido ordenado.

Amorfización: paso al estado sólido desordenado.

Transición: cambio en su estructura cristalina.

Reacciones: de oxidación, alteración, descomposición, etc.

Expansión y compresiones en su volumen.

Cambios texturales: sinterización, recristalización, etc.

La mayor parte de estos cambios se pueden estudiar midiendo la variación de distintas propiedades de la materia en función de la temperatura.

Así, bajo la denominación de Análisis Térmico se agrupan una serie de técnicas en las cuales se sigue una propiedad de la muestra, en una determinada atmósfera, en función del tiempo o de la temperatura cuando dicha muestra se somete a un programa de temperatura controlado. Éste puede consistir en calentar o enfriar a una determinada velocidad, o mantener la temperatura constante, o una combinación de ambas.

Entre las técnicas de Análisis Térmico más comunes destacan:

Termogravimetría (TG).

Análisis Térmico Diferencial (ATD).

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC, del inglés Diferencial Scanning Calorimetry).

Análisis Termomecánico (ATM).

Análisis Dinamomecánico (ADM).

Termodiffractometría (TDX).

Análisis mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF).

(Douglas Skoog, 2001). Los tratamientos térmicos son procesos muy importantes a nivel industrial ya que permiten dar unas propiedades a los componentes imposibles de conseguir mediante otros procesos. Las propiedades finales de la pieza sometidas a estos tratamientos dependen de la composición del acero, su estado mecánico y de la historia térmica en cada punto de la pieza. El diseño y optimización de estos procesos requiere pruebas y ensayos cuyo coste se puede reducir de forma significativa si parte de ellos se realizan de forma virtual. Por ejemplo, mediante la simulación por elementos finitos. Una simulación de este tipo requiere acoplar en un mismo cálculo los campos térmico, mecánico y microestructural. Se debe disponer de modelos matemáticos que reproduzcan la realidad con exactitud y, además, de los parámetros correspondientes al material en estudio.

(Soba, A. 2011) en un estudio realizado por elementos finitos a fenómenos térmico, elásticos y plásticos en elementos combustibles obtuvieron que los dos perfiles obtenidos corresponden a la deformación de la vaina de Zry después de una irradiación de un año con potencia lineal de 300 W/cm. En el perfil más saliente se ha sumado la contribución del "creep". Concluye que la inclusión de dependencias temporales y deformaciones no lineales mejora el ajuste entre los valores calculados y los medidos, y que el código, todavía en desarrollo, prevé la introducción de respuestas termoplásticas y "swelling", así como el estudio de posibles rupturas.

(López Guerrero, 2012) en un análisis de la distribución de la temperatura en la herramienta durante el proceso de fresado determinó que la distribución de temperatura de maquinado en la herramienta para las condiciones experimentales dadas puede calcularse por el método de elementos finitos, que la temperatura media de los nodos de simulación es proporcional a las de trabajo. Esta proporcionalidad es constante para las condiciones geométricas de las herramientas con la que se hizo la simulación y que utilizando el método de los elementos finitos es posible encontrar la relación para diferentes tipos de maquinado.

Capítulo 2. Relación entre la tenacidad, temperatura del temple y la forma de la grieta

2.1 Introducción al capítulo

Este capítulo se trata acerca de las características del acero CT-3, así como de su composición química, propiedades mecánicas, sus usos y su soldabilidad. Se efectuaron las pruebas a los diferentes tipos de probetas A y C. Se realizó el proceso de calentamiento de las probetas y los ensayos Charpy. Se muestra una simulación de los ensayos realizados. Se determinó que existe relación entre la temperatura de calentamiento y la forma de la grieta.

2.2 Características del acero CT-3

El acero que se utiliza para fabricar elementos de máquinas, estructuras de construcción y otras instalaciones debe poseer altas propiedades mecánicas. Al mismo tiempo el acero debe tener un gran conjunto de propiedades y no solamente un valor elevado de una propiedad determinada. El material que se destina a fabricar piezas que han de sufrir grandes cargas, a la vez que una alta resistencia, debe poseer tenacidad, para poder soportar los efectos dinámicos y de choque. En otras palabras, el material debe ser resistente y poseer alta resiliencia. Las propiedades mecánicas del acero dependen de su estructura y composición. La acción conjunta del tratamiento térmico y la aleación es un procedimiento eficaz de elevar las características mecánicas del acero. Por lo general los aceros para estructuras son soldables y la soldabilidad es una de sus principales propiedades.

Tabla 2.1. Composición química del acero CT3. (Guliaev, 1979)

Material	Elementos		
Acero AISI 1010	%C	%Mn	%Si
	0,2	0,5	0,2

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas del acero CT3. (SolidWorks, 2016)

Material	Propiedades			
Acero AISI 1010	σ_{f1} (MPa)	%	T_{50} (°C)	
	250	30	0	
	Módulo elástico(GPa)	Coefficiente de Poisson	Módulo cortante	Límite de tracción (MPa)

			(MPa)		
	200	0,29	80	7870	325
	Límite elástico (MPa)	Coefficiente de expansión térmica (1/K)	Conductividad térmica (W/(m·K))	Calor específico (J/(kg·K))	
	180	0,0000122	51,9	448	

Los aceros de construcción son de gran utilidad en la industria de la construcción, pero sobre todo de gran utilidad en la creación de herramientas y partes de piezas que requieren de gran dureza y preparación. Por lo que saber sus usos es de gran vitalidad. Se utilizan en partes de máquinas tratadas no térmicamente, que trabajan bajo cargas ligeras, tales como pines tornillos, tuercas, pernos, bridas, acoples, rodillos, tapas etc. También en máquinas que requieren alta dureza y están sujetas a cementación: engranajes, muñones, ejes, árboles, árboles de transmisión, bloques deslizantes, herramientas de medición galgas de herraduras y plantillas cementadas. Son utilizados para fabricar piezas de forma simple cementadas. (Guliaev, 1979)

2.3 Probetas para el ensayo Charpy

Las probetas de acero CT-3 se fabricaron en el taller de Máquinas Herramientas de la fábrica UEB “Héroes del 26 de Julio” ubicada en la carretera de San Germán. Las cuales cuentan con una longitud de 55 mm, una altura de 10 mm y un espesor de 10 mm. También poseen dos diferentes tipos de grietas, de tipo A y de tipo C, aprobadas por I.S.O. (International Standards Organization) a las que se le realizaron un tratamiento térmico a diferentes temperaturas. Seis se calentaron a una temperatura de 750°C, el otro grupo de seis se colocaron para el temple a 950°C. Las que se colocaron a menor temperatura tomaron una coloración clara y se mantuvieron casi iguales, mientras que las otras que se pusieron a mayor temperatura adquirieron una coloración un poco más oscura. Para lograr esto se mantuvieron seis minutos en un horno de cámara pequeña ambos grupos de probetas

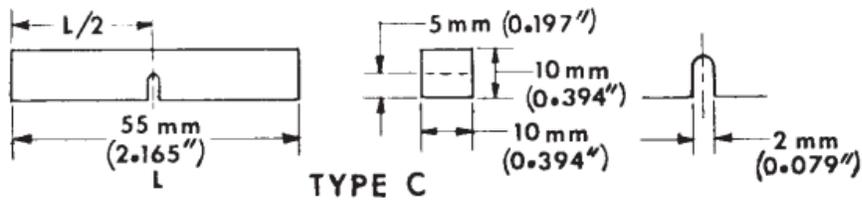


Figura 2.1 Detalles de la probeta tipo C

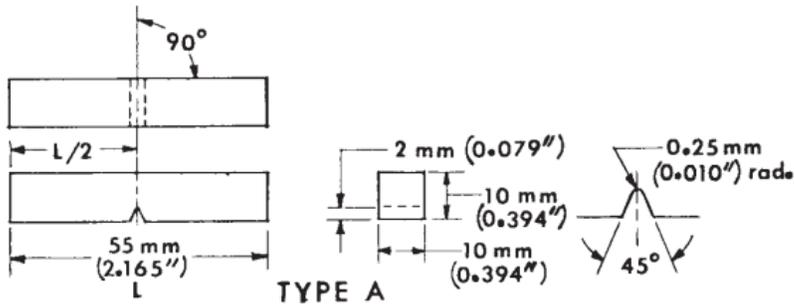


Figura 2.2 Detalles de la probeta tipo A

...

Número	Ancho	Altura	Longitud	Profundidad de la Grieta	Ancho de la Grieta
Temperatura 950°					
Probetas tipo A					
Nº	B (mm)	H (mm)	L (mm)	h (mm)	b (mm)
1	10	9,7	57,4	3,2	4,3
2	10,2	10,3	56	3,2	4,5
3	10,3	10,2	55,8	1,3	5,6
Promedio	10,17	10,07	56,4	1,73	4,7
Probetas tipo C					
Nº	B (mm)	H (mm)	L (mm)	h (mm)	b (mm)
1	9,2	9,9	56,2	1,9	4,9
2	10,2	10,3	56,7	2	4,2
3	10,3	10,3	56,1	2	4,9
Promedio	9,9	10,17	56,33	1,7	5,7

Tabla 2.2. Dimensiones de las probetas 950°C.

Número	Ancho	Altura	Longitud	Profundidad de la Grieta	Ancho de la Grieta
--------	-------	--------	----------	--------------------------	--------------------

Temperatura 750°					
Probetas Tipo A					
Nº	B (mm)	H (mm)	L (mm)	h (mm)	b (mm)
1	9,98	10	56,6	3,5	4,3
2	10,2	10,3	55,9	3,9	3,2
3	10	9,9	57,4	1,8	3,8
Promedio	10,06	10,067	56,63	2	4,7
Probetas Tipo C					
Nº	B (mm)	H (mm)	L (mm)	h (mm)	b (mm)
1	10,3	10,3	56	2,1	4,9
2	9,9	10	56,2	2,5	4,9
3	10,1	10,4	56,9	1,2	6,5
Promedio	10,1	10,23	56,37	1,63	6,1

Tabla 2.3. Dimensiones de las probetas 750°C.

Número	Ancho	Altura	Longitud	Profundidad de la Grieta	Ancho de la Grieta
Normal					
Probetas tipo A					
Nº	B (mm)	H (mm)	L (mm)	h (mm)	b (mm)
1	10	10,3	57,6	3,5	4,3
2	10	10,3	57,2	3,9	4,2
3	9,6	10,1	56,2	2,2	4,3
Promedio	9,87	10,23	57	2,2	4,43
Probetas tipo C					
Nº	B (mm)	H (mm)	L (mm)	h (mm)	b (mm)
1	9,5	10	57,5	2,9	4,5
2	10,3	10	55,9	2,5	4,9
3	10	10	56,6	2,2	4,9
Promedio	9,93	10	56,67	1,5	5,57

Tabla 2.4. Dimensiones de las probetas sin tratamiento.

2.4 Proceso de calentamiento de las probetas

En el diagrama de estado hierro – carbono se analizan los procesos de cristalización de las aleaciones de hierro y carbono (aceros e hierro fundido) y las transformaciones en su estructura cuando el enfriamiento es lento desde la masa fundida líquida hasta una temperatura de 20 °C. El diagrama muestra la composición de fase y la estructura de las aleaciones con una concentración desde el hierro puro hasta la cementita (6,67 % de carbono). Normalmente se nombran aceros las aleaciones de hierro-carbono que contienen hasta un 2,14 %C. aquellas aleaciones de hierro-carbono que contienen más de un 2,14 %C reciben el nombre de fundiciones.

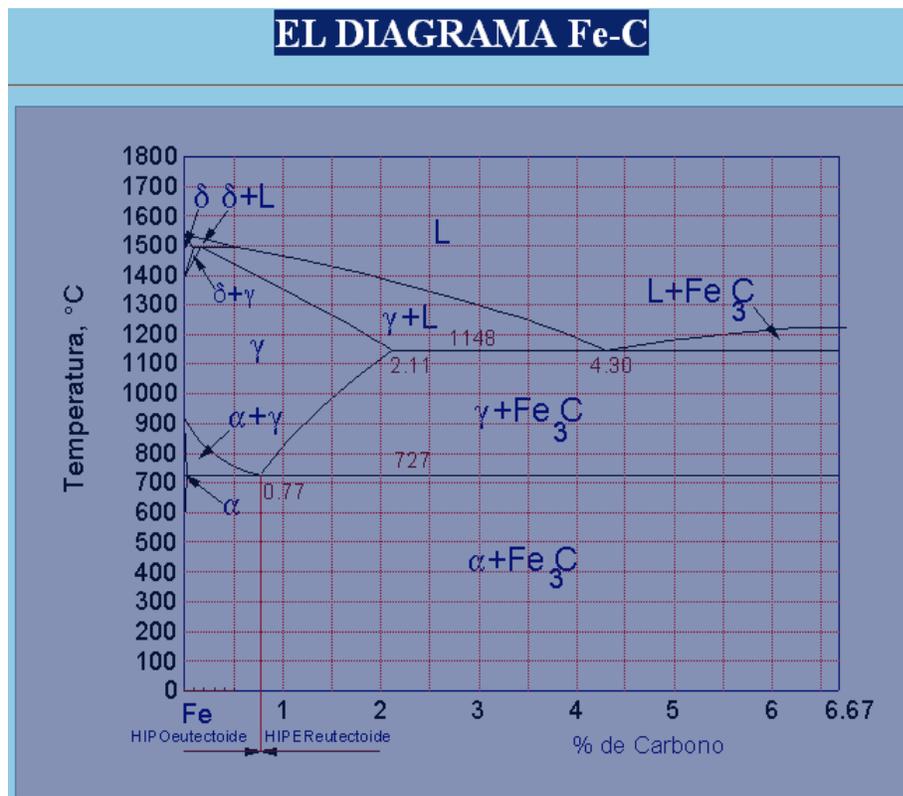


Figura 2.2. Diagrama hierro – carbono.

El régimen de tratamiento térmico de los aceros de construcción se determina principalmente por su contenido de carbono.

Los aceros de construcción se someten a tratamiento térmico doble de endurecimiento, es decir, temple más revenido, siendo el de los aceros de contenido medio de carbono un

revenido a alta temperatura (mejorado), y en de los de bajo contenido, un revenido a baja temperatura.

El régimen de temple se determina por la posición de los puntos críticos y por la aptitud de la austenita para subenfriarse.

El calentamiento para el temple se efectúa, por regla general, hasta una temperatura un poco superior (en 30 – 50 °C) al punto A_{c3} . En la mayoría de las marcas de acero de construcción con bajo contenido de carbono esta temperatura se encuentra cerca de los 900 °C y en los de contenido medio cerca de los 850 °C.

Se calculó el tiempo de calentamiento de las probetas Charpy para su posterior calentamiento en el horno.

El tiempo que dura un calentamiento térmico es posible descomponerlo en tres tiempos:

- 1) t_c : Tiempo de calentamiento hasta la temperatura a la que se desea tratar la pieza.
- 2) t_p : Tiempo de permanencia de la pieza a la temperatura que se desea tratar.

La suma de ambos es el tiempo total de calentamiento.

- 3) t_e : Tiempo de enfriamiento; que no se calcula.

El tiempo de calentamiento depende de la aptitud del medio para calentar, las dimensiones y configuración geométrica de la pieza y de su colocación en el horno, de esta forma es posible determinarlo a partir de la siguiente fórmula empírica: (Guliaev, A.P, 1978)

$$t_c = 0.1DK_1K_2K_3 \quad (2.1)$$

Donde:

D : es la característica dimensional de la pieza, dada en milímetros. La probeta seleccionada para el estudio tiene forma de lámina, en este caso la característica dimensional es el espesor, o sea $D = 10mm$.

K_1 : es el coeficiente del medio, como la pieza se templará en un medio acuoso (H_2O) $K_1=2$.

K_2 : es el coeficiente de forma, para una lámina $K_2=2.5$.

K_3 : es el coeficiente de uniformidad del calentamiento, este se realizará por todas partes por lo que $K_3=1$.

El resultado se obtiene en minutos.

El tiempo de permanencia t_p depende de la velocidad de los cambios de fase, la que está determinada por el grado de recalentamiento por encima del punto crítico y por la dispersión de la estructura inicial. Para el acero AISI 1010, en la práctica t_p puede tomarse igual a 1, en minutos.

El enfriamiento de las probetas será el agua; con el propósito de simular lo más posible las estructuras que se forman en la zona de afectación térmica de las uniones. De acuerdo a la temperatura que alcance un área determinada de la zona de afectación térmica, así será la estructura interna y las propiedades mecánicas de dicha área. Como el enfriamiento se efectuará en agua, el tiempo t_e no se considera en el cálculo del tiempo total de calentamiento térmico.

Luego:

$$\begin{aligned}T_t &= T_c + T_p \\T_t &= 5\text{min} + 1\text{min}\end{aligned}\tag{2.2}$$

Para realizar los distintos calentamientos se debe seguir la siguiente secuencia:

1. Calentar el horno hasta 50 °C por encima de la temperatura de calentamiento respectiva.
2. Después de alcanzada la temperatura tecnológica, se introduce la pieza en el horno.
3. Al cumplirse los seis minutos se extrae la pieza.
4. Se deja enfriar en agua, hasta que alcance la temperatura ambiente.

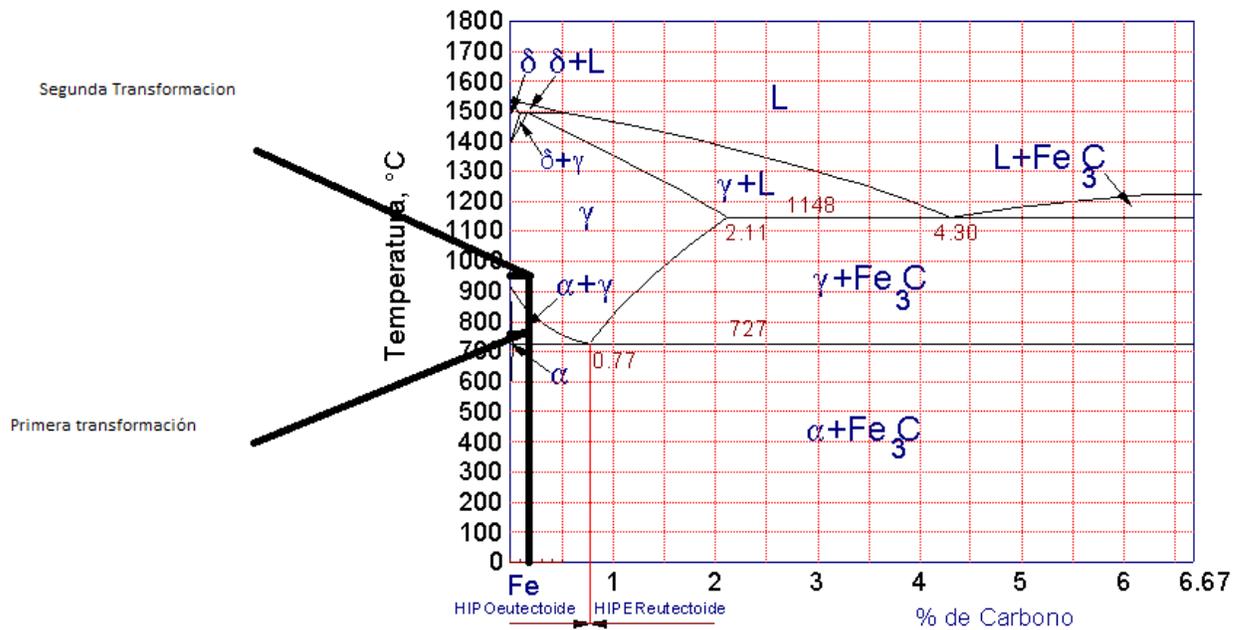
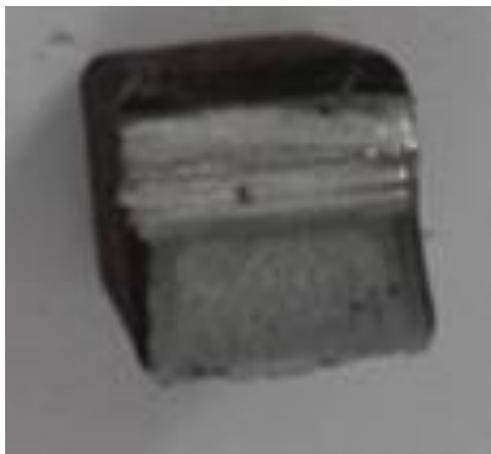


Figura 2.3. Transformaciones del acero CT3.

2.5 Ensayo Charpy

Los ensayos dinámicos de choque se realizan generalmente en máquinas denominadas péndulos o martillos pendulares, en las que se verifica el comportamiento de los materiales al ser golpeados por una masa conocida a la que se deja caer desde una altura determinada, realizándose la experiencia en la mayoría de los casos, de dos maneras distintas según que la probeta rompa por flexionamiento (flexión por choque) o que su rotura se alcance por deformación longitudinal (tracción por choque). Los valores obtenidos en estos ensayos son únicamente comparables, en materiales con propiedades similares ya sean siempre dúctiles o frágiles, cuando se realizan sobre el mismo tipo de probeta y en idénticas condiciones de ensayo.

La máquina de ensayo determina el trabajo absorbido por el material cuando este es roto de un solo golpe por la masa pendular y su valor en kgf o Joule, o relacionándolo con la sección o volumen de la probeta, según el método nos indicará la resistencia al choque o capacidad del material para absorber cargas dinámicas de impacto (resiliencia). (Reyes Lores, 2011).



2.4. Muestra de probeta tipo C después del experimento de impacto.



2.5. Muestra probeta tipo A después de experimento de impacto.

Tabla 2.6. Resultados del ensayo Charpy

Tipo de probetas A					
Temperatura de calentamiento 750					
N°	Energía T (J)	b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)	Tenacidad *(J/mm ²)
1	133	3	3,9	11,7	11,37
2	134,9	2,5	4,2	10,5	12,87
Promedio					5,68
Tipo de probetas C					
Temperatura de calentamiento 750					
N°	Energía T (J)	b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)	Tenacidad *(J/mm ²)
1	76	3,9	3	11,7	6,49
2	27	4,2	2,5	10,5	2,57
Promedio					4,53

Tabla 2.5. Resultados del experimento.

	Tipo de probetas A
	Sin tratamiento

N°	Energía T (J)	b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)	Tenacidad *(J/mm ²)
1	133	4,3	3,5	15,05	8,84
2	141	3,2	3,9	12,48	11,30
Promedio					10,07
Temperatura de calentamiento 30					
N°	Energía T (J)	b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)	Tenacidad *(J/mm ²)
1	119	4,5	1,9	8,55	13,92
2	75	4,9	1,5	7,35	10,20
3	74	4,9	1,2	5,88	12,59
Promedio					12,24

Tabla 2.6. Resultados del experimento.

Tipo de probetas A					
Temperatura de calentamiento 950					
N°	Energía T (J)	b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)	Tenacidad *(J/mm ²)
1	71	4,3	3,2	13,76	5,159884
2	142	4,5	3,2	14,4	9,861111
Promedio					7,510497
Tipo de probetas C					
Temperatura de calentamiento 950					
N°	Energía T (J)	b (mm)	h (mm)	Área (mm ²)	Tenacidad *(J/mm ²)
1	57	1,9	4,9	9,31	6,122449
2	54,5	2	2	7,35	7,414966
3	55	2	2	5,88	9,353742
Promedio					7,630385

Tabla 2.7. Resultados del experimento.

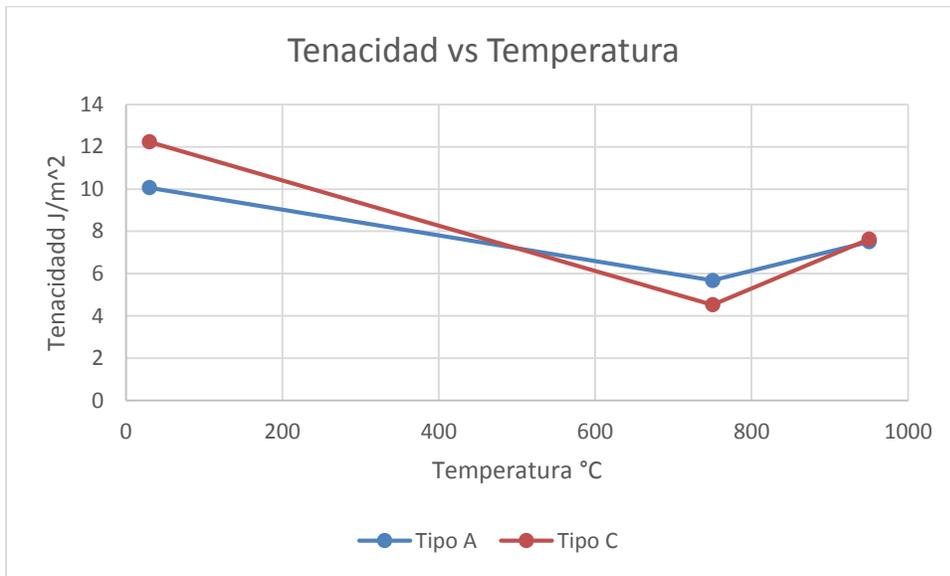


Figura 2.6. Variación de la tenacidad con la temperatura y la forma de la grieta.

2.6 Simulación del ensayo Charpy.

Para la simulación del ensayo primero fue necesario el cálculo del coeficiente individual de transferencia de calor h mediante las siguientes fórmulas:

$$\Delta t = T_p - T_{H_2O} \quad 2.3$$

$$h = \frac{N_{ufi} \times L}{\lambda} \quad 2.4$$

$$N_{ufi} = 0,54(Ra_{fi})^{0,25} \quad 2.5$$

$$Ra_{fi} = G_r P_r \quad 2.6$$

Donde:

N_{ufi} : Nussel del fluido.

Ra : Ra del fluido.

G_r : Número de Grachof.

P_r : Número de Prandal

g : Gravedad

B : Espesor de la probeta

Δt :Variación de la temperatura

L : Longitud

ν : Viscosidad cinemática

h : Coeficiente individual de transferencia de calor

λ : Conductividad térmica del agua

ν : volumen específico

Como el enfriamiento de las probetas se realizó con agua, es necesario conocer las propiedades del fluido.

Propiedades del agua

$P_r : 6,62$	2.5
$\nu^2 : 8,807 \times 10^{-7}$	2.6
$\lambda : 606 \times 10^{-6}$	2.7
$B : 276,1 \times 10^{-3}$	2.8
$\nu : 1,03 \times 10^{-3}$	2.9
$\mu : 8,55 \times 10^{-6}$	2.10

Con las propiedades determinadas y con las ecuaciones de la (2.11) a la (2.20) se determinó el coeficiente de transferencia de calor.

$$Gr = \frac{g \times B \times \Delta t \times L}{\nu^2} \quad 2.11$$

$$Gr = \frac{9.81 \times 276,1 \times 10^{-6} \times 920 \times 0,55}{(855 \times 10^{-6} \times 1,03 \times 10^{-3})^2} \quad 2.12$$

$$Gr = 3,076 \times 10^6 \quad 2.13$$

$$Ra_l = Gr \times P_r \quad 2.14$$

$$Ra = 2,0 \times 10^6 \quad 2.15$$

$$Nu_{fl} = 0,54(Ra_{fl})^{0,25} \quad 2.16$$

$$Nu_{fl} = 36 \quad 2.17$$

$$h = \frac{Nu_{fl} \times \lambda}{L} \quad 2.18$$

$$h = \frac{36 \times 0,55}{6,06 \times 10^{-3}} \quad 2.19$$

$$h = 326 \text{ W/M}^2\text{K} \quad 2.20$$

Cálculo de las fuerzas dinámicas

Para este cálculo es necesario tener en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$T = Ud \quad 2.21$$

$$T = \frac{1}{2} \times P_{\text{din}} \times \delta_{\text{din}} \quad 2.22$$

$$T = \frac{\frac{1}{2} P_{\text{din}} \times P_{\text{din}} L^3}{EI_x} \quad 2.23$$

$$P_{\text{din}} = \sqrt{\frac{3T \times EI_x}{L^3}} \quad 2.24$$

$$\delta_{\text{din}} = \frac{\frac{2}{3} P_{\text{din}} L^3}{EI_x} \quad 2.25$$

$$I_x = \frac{BH^3}{12} \quad 2.26$$

Don de:

T: Energía que se consume en el impacto

E: Módulo de elasticidad

L: Longitud

I_x: Momento de inercia

B: Ancho de la probeta

H: Altura de la probeta

P_{din}: Carga dinámica en el instante del impacto.

δ_{din}: Desplazamiento dinámico en el instante del impacto.

Se calcularon seis fuerzas dinámicas para realizar las diferentes simulaciones estáticas y térmicas a las probetas tratadas a las diferentes temperaturas.

Cálculo de la fuerza dinámica para la probeta tratada a 950°C:

Figura (2.5.5)

Temperatura de calentamiento 950°C

Tipo A

$$P_{\text{din}_1} = \sqrt{\frac{3 \times 55,5 \times 10^3 \times 2 \times 10^{11} \times 0,083 \times 10^{-8}}{0,0553}} \quad 2.27$$

$$P_{\text{din}} = 407,58 \times 10^3 \text{ N} \quad 2.28$$

Tipo C

$$P_{din 1} = \sqrt{\frac{3 \times 10^6 \cdot 75 \times 10^3 \times 2 \times 10^{11} \times 0,083 \times 10^{-8}}{0,0553}} \quad 2.29$$

$$P_{din} = 565 \times 10^3 \text{ N} \quad 2.30$$

Temperatura de calentamiento 750°C

Tipo A 750°C

$$P_{din 1} = \sqrt{\frac{3 \times 133,95 \times 10^3 \times 2 \times 10^{11} \times 0,083 \times 10^{-8}}{0,0553}} \quad 2.31$$

$$P_{din} = 633,20 \times 10^3 \text{ N} \quad 2.32$$

Tipo C

Sin tratamiento

Tipo A

$$P_{din 1} = \sqrt{\frac{3 \times 51,5 \times 10^3 \times 2 \times 10^{11} \times 0,083 \times 10^{-8}}{0,0553}} \quad 2.33$$

$$P_{din} = 392,62 \times 10^3 \text{ N} \quad 2.34$$

Tipo C

$$P_{din 1} = \sqrt{\frac{3 \times 137 \times 10^3 \times 2 \times 10^{11} \times 0,083 \times 10^{-8}}{0,0553}} \quad 2.35$$

$$P_{din} = 640,37 \times 10^3 \text{ N} \quad 2.36$$

$$P_{din 1} = \sqrt{\frac{3 \times 83,9 \times 10^3 \times 2 \times 10^{11} \times 0,083 \times 10^{-8}}{0,0553}} \quad 2.37$$

$$P_{din} = 501,13 \times 10^3 \text{ N} \quad 2.38$$

Mallado del modelo.

Para simular el ensayo de impacto mediante el Método de los Elementos Finitos es necesario realizar el mallado del modelo. En la figura 2.6 se muestra el mallado obtenido para la probeta Tipo A.

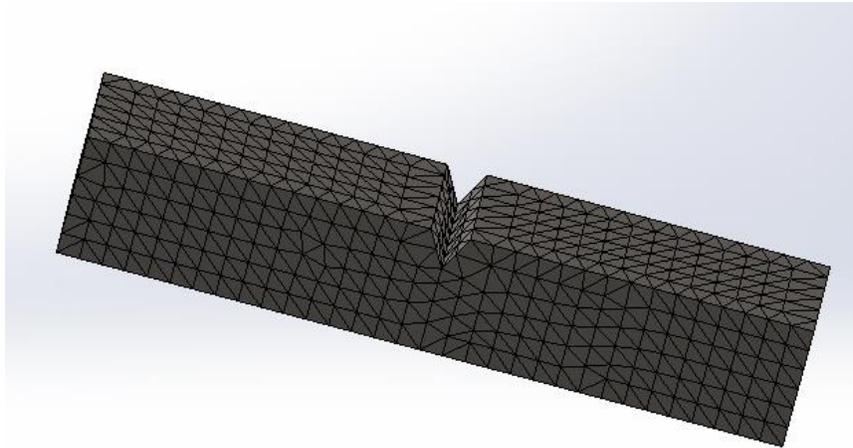


Figura 2.7. Detalles de la malla en la probeta Tipo A.

La tabla 2.8 expone los valores de los diferentes parámetros de la malla.

Tabla 2.9. Parámetros del mallado para la probeta Tipo A.

Nombre de estudio	Probeta tipo A
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Tamaño de elemento	1,76 mm
Tolerancia	0,088 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Cociente de aspecto máximo	3,0689

La figura 2.8 muestra las cargas mecánicas y las restricciones aplicadas a la probeta tipo C para simular el ensayo. Las otras cargas aplicadas son las tensiones de origen térmico debidas a los procesos térmicos aplicados.

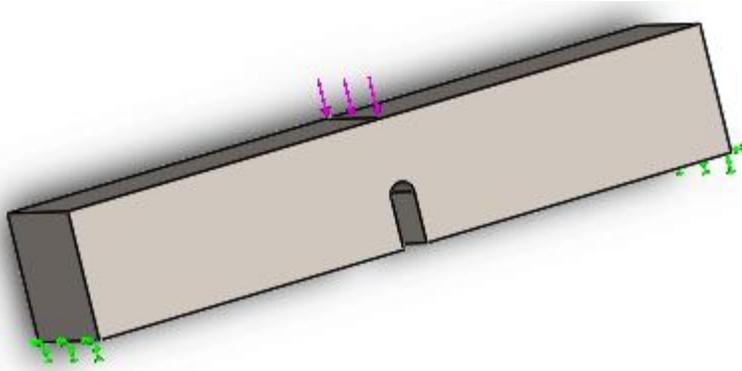


Figura 2.8. Probeta tipo C con las cargas expuestas.

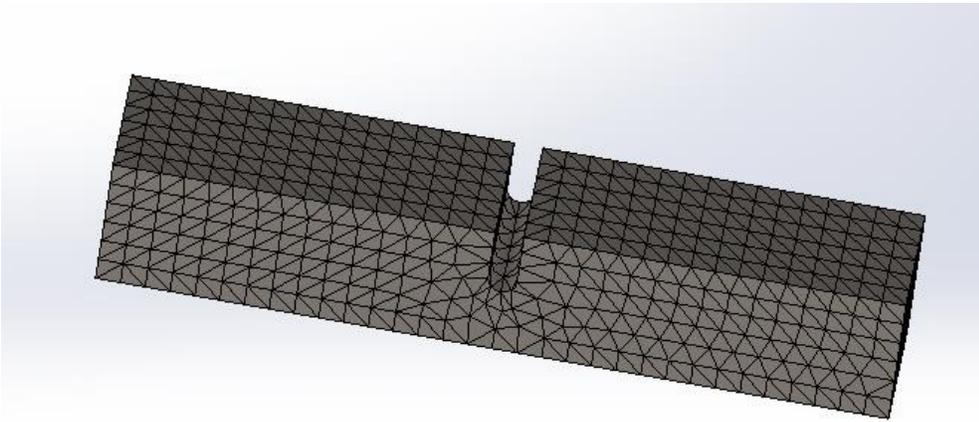


Figura (2.9) Representación del mallado de la probeta Tipo C

Nombre de estudio	Probeta tipo C
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Tamaño de elemento	1,76 mm
Tolerancia	0,088 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Cociente de aspecto máximo	3,5012

Tabla 2.10. Parámetros de la malla para la probeta Tipo C.

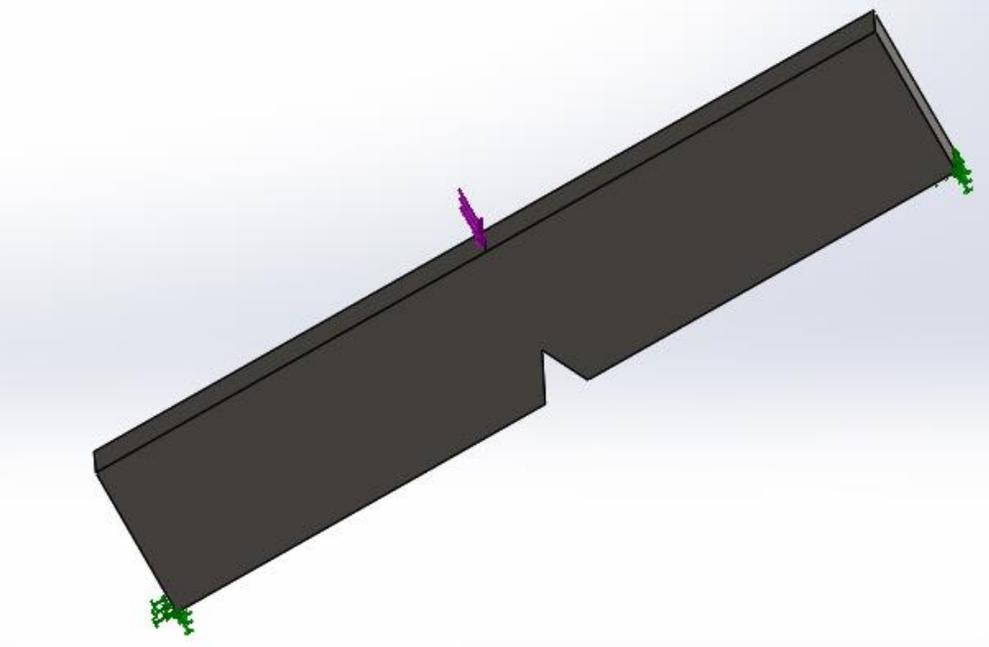
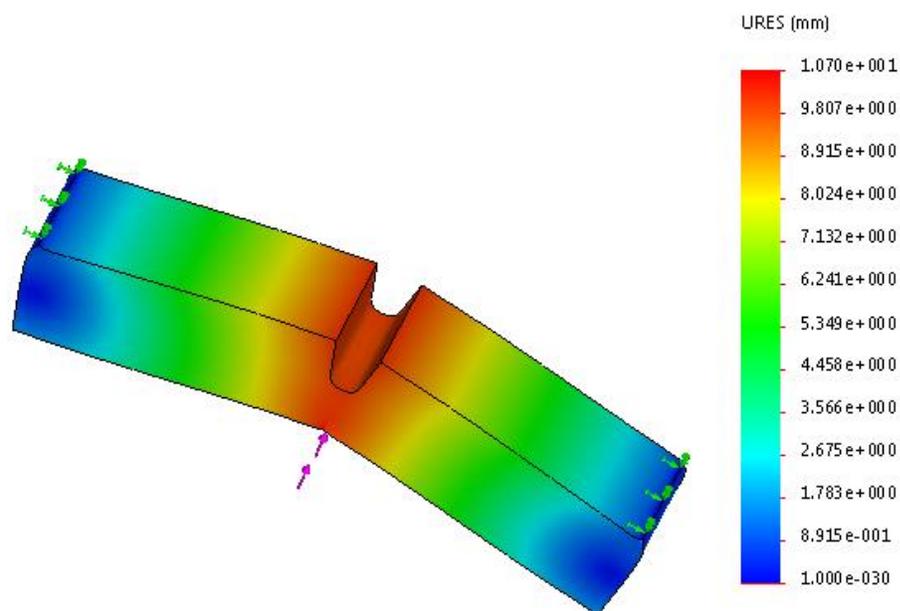
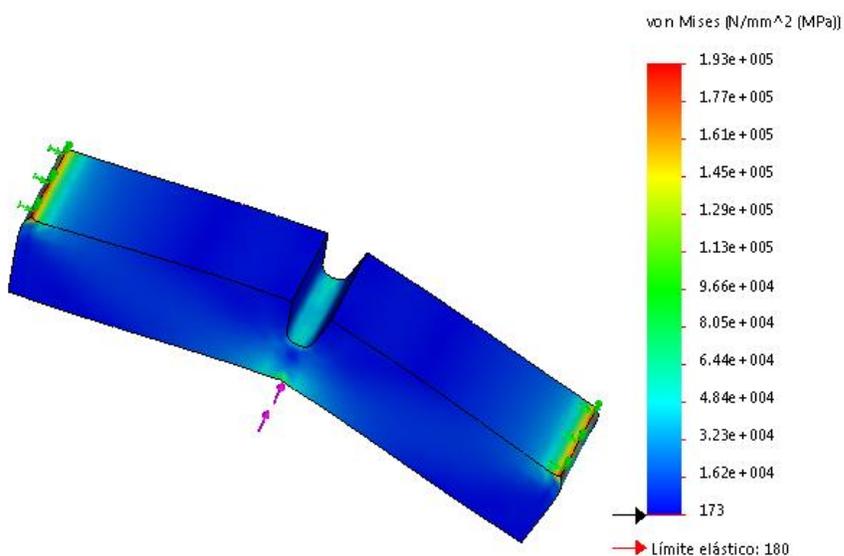


Figura (2.10) probeta tipo A con las cargas expuestas



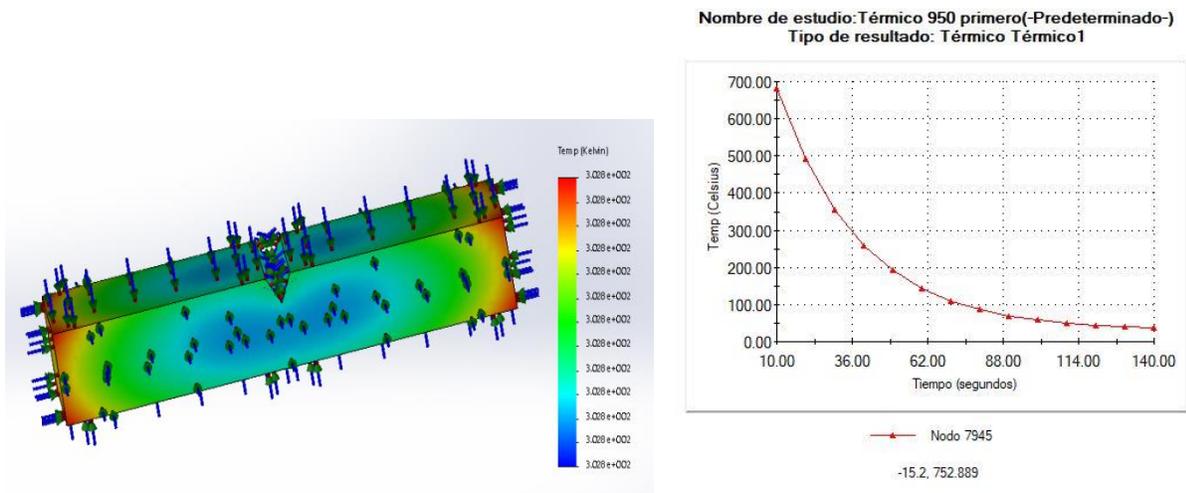
Desplazamiento de probeta tipo “C” a 950°C. Figura (2.11)

Para el caso de este estudio se llegó a la conclusión de que presenta valores de desplazamientos elevados (de acuerdo a las dimensiones globales de la probeta) producto de la carga dinámica durante el impacto. El valor máximo es de 10 mm, como se aprecia en la figura 2.12 este ocurre en el centro de la probeta donde ocurre la fractura.

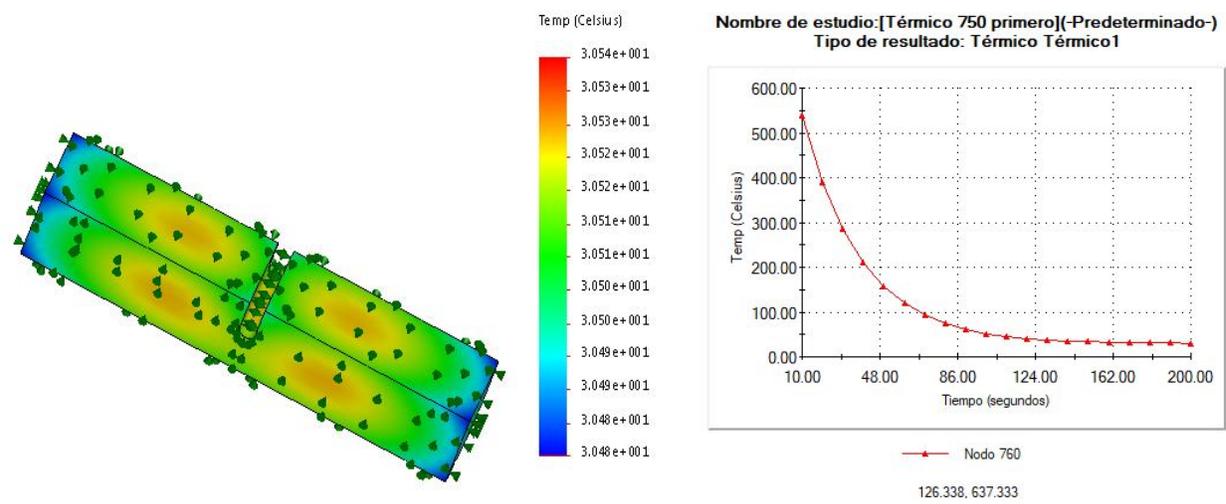


Tensiones de probeta tipo “C” a 950°C. Figura (2.12)

Como se observa en la figura 2.12 el valor de las tensiones en el lugar del impacto es de $6,4 \times 10^4$ MPa. Estas son mucho mayores que el límite de rotura del material (325 MPa). La probeta se fractura en esa zona.

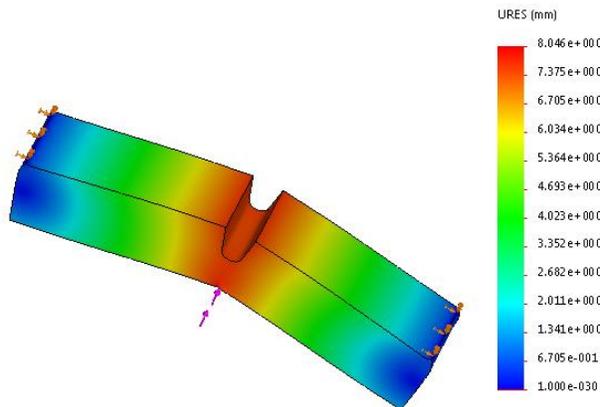


Análisis térmico de probeta tipo “C” tratada a 950°C en el instante de tiempo. Figura (2.13)
 Las mayores zonas de influencia térmica son en las esquinas de la probeta con valor de $3,8 \times 10^2$ Kelvin. El tratamiento térmico es un componente importante en la influencia sobre la ruptura de la probeta debido a la presencia de tensiones térmicas.



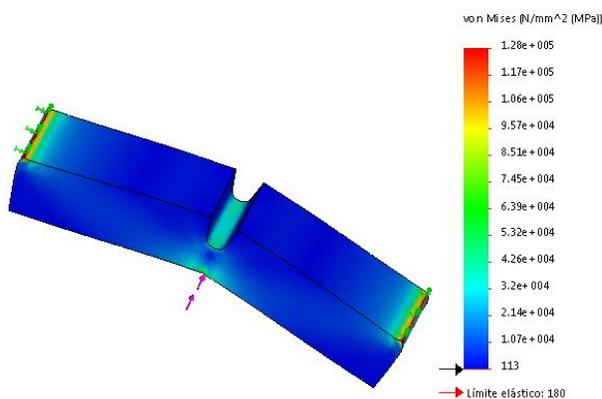
Análisis térmico de probeta tipo “C” a 750°C. Figura (2.14)

Las mayores zonas de influencia térmica son en las esquinas de la probeta con valor de 30 °C. El tratamiento térmico es un componente importante en la influencia sobre la ruptura de la probeta debido a la presencia de tensiones térmicas.



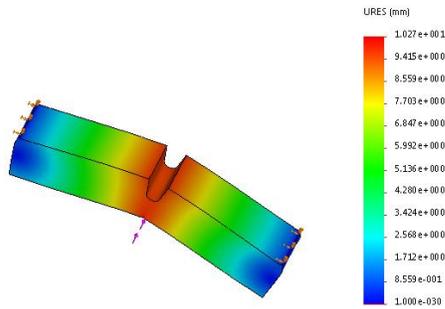
Desplazamiento de probeta tipo “C” a 750°C. Figura (2.15)

Para el caso de este estudio se llegó a la conclusión de que presenta valores de desplazamientos elevados (de acuerdo a las dimensiones globales de la probeta) producto de la carga dinámica durante el impacto. El valor máximo es de 8 mm, como se aprecia en la figura 2.15 este ocurre en el centro de la probeta donde ocurre la fractura.



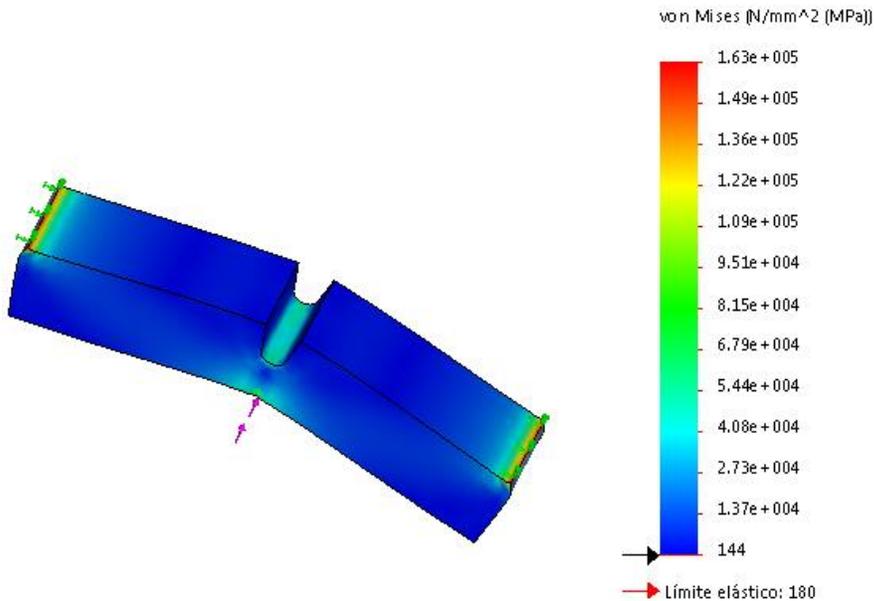
Tensiones de probeta tipo “C” a 750°C. Figura (2.16)

Como se observa en la figura 2.12 el valor de las tensiones en el lugar del impacto es de $2,14 \times 10^4$ MPa. Estas son mucho mayores que el límite de rotura del material (325 MPa). La probeta se fractura en esa zona.



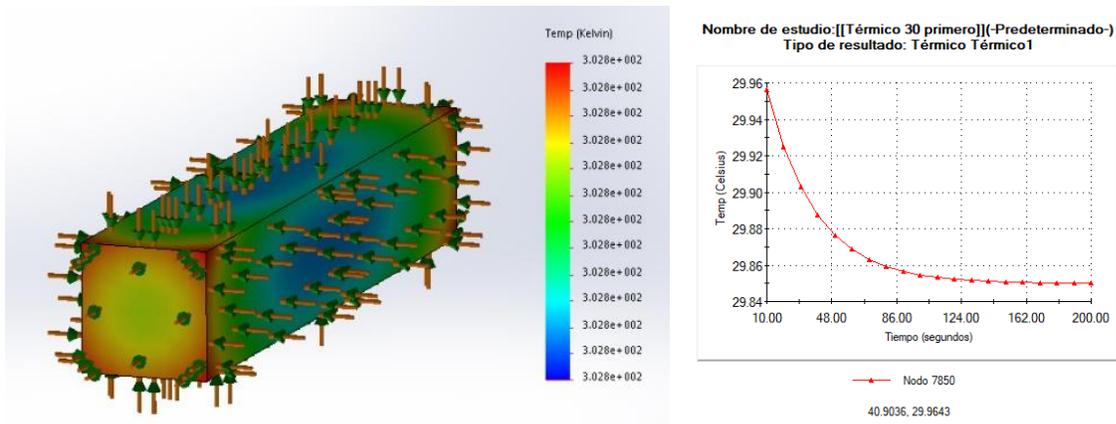
Desplazamiento de probeta tipo “C” sin tratamiento Figura (2.17)

Para el caso de este estudio se llegó a la conclusión de que presenta valores de desplazamientos elevados (de acuerdo a las dimensiones globales de la probeta) producto de la carga dinámica durante el impacto. El valor máximo es de 10 mm, como se aprecia en la figura 2.15 este ocurre en el centro de la probeta donde ocurre la fractura.



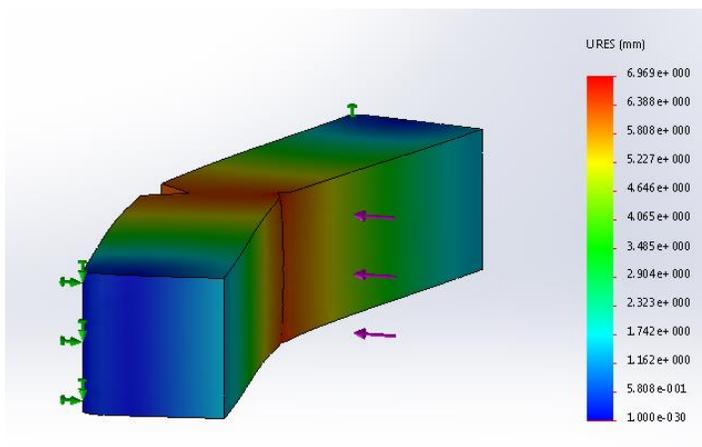
Tensiones de probeta tipo “C” a 30°C. Figura (2.18)

Como se observa en la figura 2.12 el valor de las tensiones en el lugar del impacto es de $4,08 \times 10^4$ MPa. Estas son mucho mayores que el límite de rotura del material (325 MPa). La probeta se fractura en esa zona.



Análisis térmico de probeta tipo “A” a 950°C. Figura (2.19)

Las mayores zonas de influencia térmica son en las esquinas de la probeta con valor de 302 kelvin El tratamiento térmico es un componente importante en la influencia sobre la ruptura de la probeta debido a la presencia de tensiones térmicas.



Desplazamiento de probeta tipo “A” a 950°C. Figura (2.20)

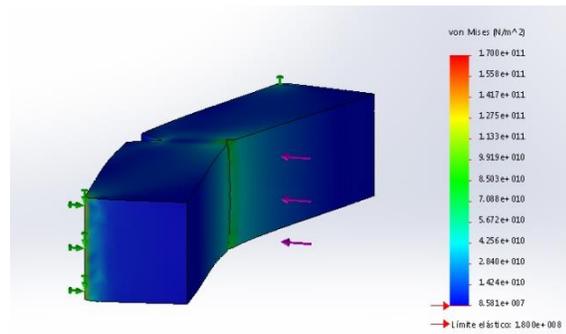
Para el caso de este estudio se llegó a la conclusión de que presenta valores de desplazamientos elevados (de acuerdo a las dimensiones globales de la probeta) producto de la carga dinámica durante el impacto. El valor máximo es de 10 mm, como se aprecia en la figura 2.20 este ocurre en el centro de la probeta donde ocurre la fractura.

Desplazamiento de probeta tipo "A" a 950°C. Figura 2.23

Para el caso de este estudio se llegó a la conclusión de que presenta valores de desplazamientos elevados (de acuerdo a las dimensiones globales de la probeta) producto de la carga dinámica durante el impacto. El valor máximo es de 10 mm, como se aprecia en la figura 2.23 este ocurre en el centro de la probeta donde ocurre la fractura.

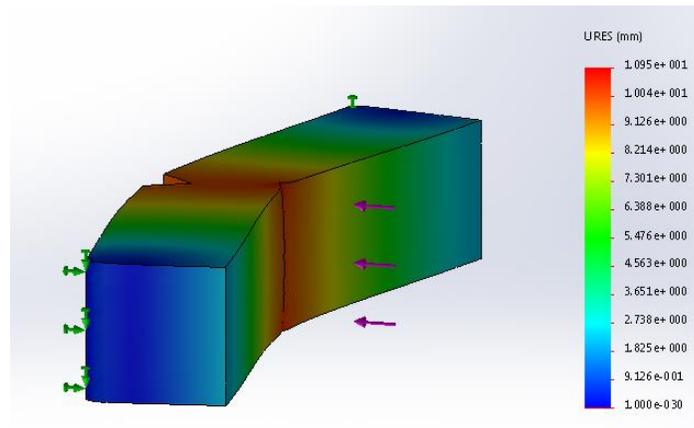
).

.



Tensiones de probeta tipo "A" a 950°C. Figura 2.24

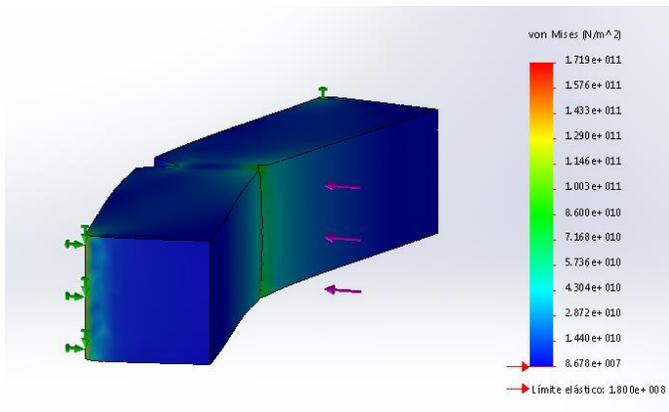
Las tensiones tienen valores significativos como $8,50 \times 10^{10}$ por lo que es un factor por el que este tipo de probeta se rompa con mayor facilidad



Desplazamiento de probeta tipo "A" a 30°C. Figura (2.25)

Para el caso de este estudio se llegó a la conclusión de que presenta valores de desplazamientos elevados (de acuerdo a las dimensiones globales de la probeta) producto de la carga dinámica durante el impacto. El valor máximo es de 8 mm, como se aprecia en la figura 2.25 este ocurre en el centro de la probeta donde ocurre la fractura.

.



Tensiones de probeta tipo “A” a 30°C. Figura (2.26)

Las tensiones tienen valores significativos como 1.03×10^{11} por lo que es un factor por el que este tipo de probeta se rompa con mayor facilidad

2.7 Resultados

La tenacidad del acero CT-3 disminuye a medida que aumentó la temperatura de calentamiento. El enfriamiento brusco en agua permitió fijar la estructura que se forma durante los diferentes procesos de calentamiento. Esto se pudo comprobar en los experimentos realizados cuando a la temperatura de calentamiento a las probetas fue 950°C el valor de la tenacidad varió entre 2,57 a 6,49 J/mm². Para las probetas calentadas a la temperatura de 750°C, la tenacidad aumentó el intervalo entre 10,5 a 11,36 J/mm². Luego se realizó el ensayo a probetas no tratadas térmicamente, en las que la tenacidad aumentó hasta 15,05 J/mm².

Conclusiones

Con este trabajo de diploma se obtuvieron las conclusiones siguientes>

1. La tenacidad del acero CT-3 disminuye con el aumento de la temperatura de tratamiento térmico.
2. Las probetas tipo A (con grieta en forma de V) tenían menor tenacidad que las tipo C. Esto obedece a la concentración de tensiones en la punta de la grieta.
3. Con el Método de los Elementos Finitos, realizando estudios térmicos y estáticos concatenados fue posible simular el ensayo Charpy.

Recomendaciones

1 →Aplicar el procedimiento descrito en este trabajo en la investigación de otros tipos de aceros.

Bibliografía

- 1→ GULIÁEV, A. P. (1978). Metalografía. Editorial Mir. Moscú. 2 Tomos.
- 2 → Norma Cubana NC 04-12-67 para “Recipientes a presión Fijación.
- 3 → Norma GOST 9454-60 para un área de sección de rotura.
- 4 → Metalurgia de la soldadura, Rodríguez Pérez, La Habana: Editorial Universitaria, 2013. – ISBN 978-959-16-2101-6. -. 2013.
- 5 → STIOPIN, P. A. (1976). Resistencia de Materiales. Editorial Mir. 6ta Edición. Moscú.
- 6 → Osmundo Héctor Rodríguez Pérez, (1983). Metalurgia de la soldadura. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. Cuba.
- 7→ Temas para La educación, Revista digital para profesionales de La Enseñanza, Federación de Enseñanza CC: OO Andalucía 2010.
- 8→ Milnor W. Hemodynamics, 2nd ed., Williams & Wilkins, Baltimor, Williams & Wilkins, 1989.
- 9→ Fernández Levy, Gilda. Resistencia de Materiales. /Gilda Fernández Levy. -- Ciudad de La Habana; Editorial Pueblo y Educación, 1981. -- 2 tomos.
- 10→ Reyes Lores, (2011). “Preparación metodológica de las prácticas de laboratorio de cargas de impacto”. Tesis de Grado. Centro de Estudios CAD/CAM, Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya".
- 11→ Tamayo Batista (2012) Obtención de la velocidad de enfriamiento mediante el método de los elementos finitos en la Zona de Afectación Térmica en uniones soldadas a tope simulada mediante calentamientos.” Tesis de Grado. Centro de Estudios CAD/CAM, Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya".
- 12→ Norma Cubana NC 04-72 Probeta para ensayos de tracción transversal en uniones soldadas a tope.

13→ Ecu red Portable versión 1.5 2012 UCI.

14→<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=81a26031d1b44cbb911f70ab863281f5>. Abril2011

15→ <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=MS0001>. Abril2011

16 → (Guevara Velázquez, 2108) Evaluación numérica del estado tensional en probetas prefisuradas de acero CT3 sometidas a torsión cíclica." Tesis de Grado. Centro de Estudios CAD/CAM, Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya".

17 → Ricardo B. D'Ambraa, Luis Kostaschia, Juan M. Podestáa, Bruno Ubertia, Ignacio Iturrioz Estudio Del comportamiento de placas delgadas sometidas a cargas de impacto utilizando El Método de los elementos finitos (Asociación Argentina de Mecánica computacional, 2009)

18→ Douglas A. Skoog, F. James Holler, Timothy A. Nieman. "Principios de análisis instrumental", 5ª edición. McGraw-Hill/Interamericana de España, 2001.

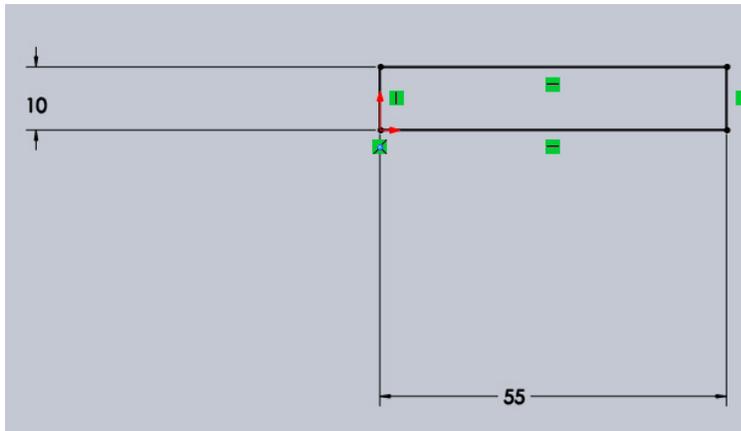
19 Flores Moreno; Martínez Rodríguez , Samá Montes Análisis por elementos finitos de cargas de impacto. Estudio de caso de viga de tren de rodaje de remolque agrícola(2009)

20 → Lopez Guerrero, Lionel.S.Méndez, P.Francisco Ramirez .Simulación Por elemento finite de la distribucion de la temperature en la herramienta durante el proceso de fresado.(2012)

Anexos

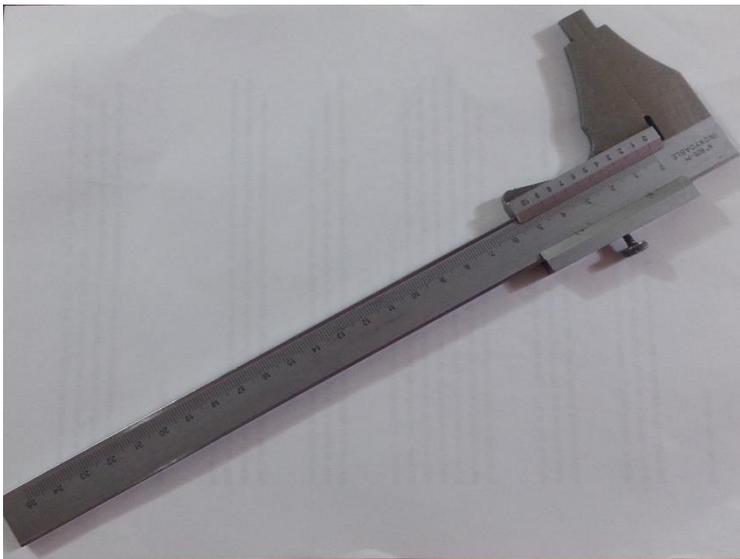
Anexo 1

Croquis utilizado para analizar los modelos geométricos



Anexo 2

Instrumento de medición



Pie de rey

Anexo 3



Probetas en proceso de Temple

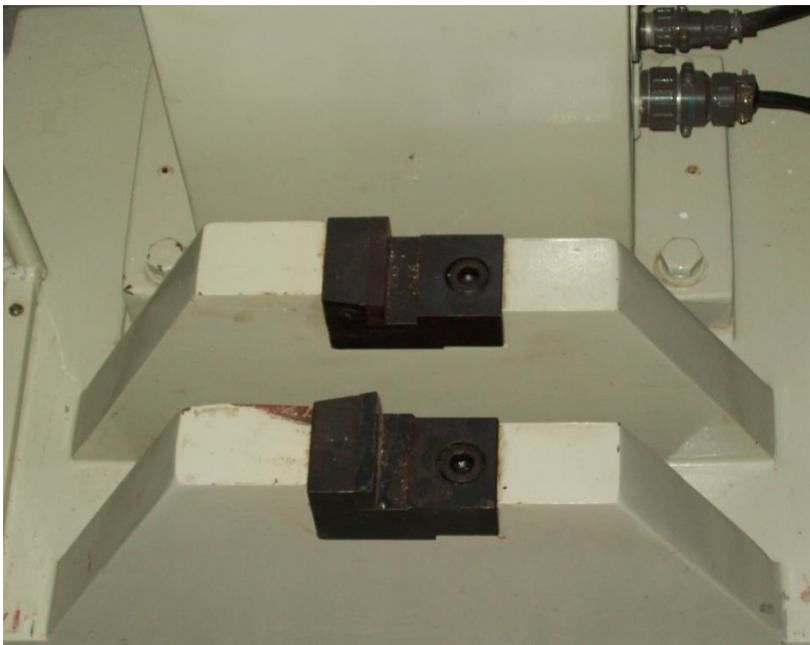
Anexo 4



Horno circular



Péndulo Charpy



Soporte para la colocación de probetas



Péndulo Charpy 150 J



Probeta puesta en soporte.