



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO 1045 BAJO  
LAS NORMAS ASTM E8, E10 Y E23 MEDIANTE CORTE ABRASIVO Y OXIACETILENO**

**Esvin Estuardo Oxlaj Mejía**

Asesorado por el Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera

Guatemala, agosto de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO 1045 BAJO  
LAS NORMAS ASTM E8, E10 Y E23 MEDIANTE CORTE ABRASIVO Y OXIACETILENO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**ESVIN ESTUARDO OXLAJ MEJÍA**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ENRIQUE CHICOL CABRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |  |
|------------|--|
| DECANO     | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco     |
| VOCAL I    | Ing. Angel Roberto Sic García          |
| VOCAL II   | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III  | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa    |
| VOCAL IV   | Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova         |
| VOCAL V    | Br. Henry Fernando Duarte García       |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López      |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|            |   |
|------------|---|
| DECANO     | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco            |
| EXAMINADOR | Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco          |
| EXAMINADOR | Ing. Luis Eduardo Coronado Noj                |
| EXAMINADOR | Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres        |
| SECRETARIO | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez (a.i.) |

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO 1045 BAJO LAS NORMAS ASTM E8, E10 Y E23 MEDIANTE CORTE ABRASIVO Y OXIACETILENO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 2 de septiembre de 2015.

**Esvin Estuardo Oxlaj Mejía**

Guatemala, 7 de Junio de 2016

Ing. Roberto Guzmán Ortiz  
Director Escuela Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Por este medio le doy a conocer que la revisión que he realizado del trabajo de graduación del estudiante Esvin Estuardo Oxlaj Mejía, con número de carné universitario 201113768, titulado **"ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO 1045 BAJO LAS NORMAS ASTM E8, E10 Y E23 MEDIANTE CORTE ABRASIVO Y OXIACETILENO"**, se ha concluido satisfactoriamente.

Agradeciendo la atención prestada, atentamente



---

Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera

Asesor

Número de colegiado 6965

*Ma. Ing. Carlos E. Chicol C.*

COL. No. 6965



**USAC**

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.191.2016

El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO 1045 BAJO LAS NORMAS ASTM E8, E10 Y E23 MEDIANTE CORTE ABRASIVO Y OXIACETILENO** desarrollado por el estudiante **Esvin Estuardo Oxlej Mejía, carné 2011-13768** recomienda su aprobación.

***"Id y Enseñad a Todos"***

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Coordinador Área de Materiales  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, julio 2016



**USAC**  
TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

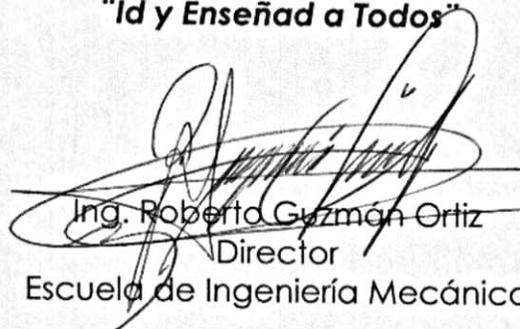
Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.234.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales del trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO 1045 BAJO LAS NORMAS ASTM E8, E10 Y E23 MEDIANTE CORTE ABRASIVO Y OXIACETILENO** desarrollado por el estudiante **Esvin Estuardo Oxlej Mejía, carné 2011-13768** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

**"Id y Enseñad a Todos"**

  
Ing. Roberto Guzmán Ortiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, agosto de 2016

/aej

Universidad de San Carlos  
De Guatemala

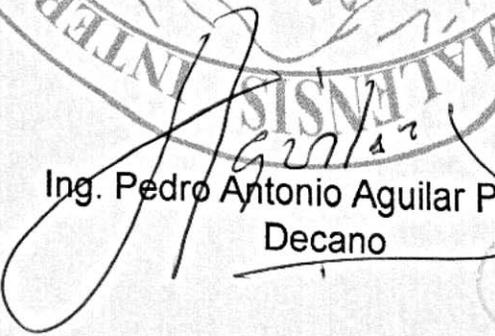


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.384.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO 1045 BAJO LAS NORMAS ASTM E8, E10 Y E23 MEDIANTE CORTE ABRASIVO Y OXIACETILENO**, presentado por el estudiante universitario: **Esvin Estuardo Oxlej Mejía**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, agosto de 2016

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Mis padres**

Noé Oxlaj y Miriam Mejía, por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

**Mis hermanos**

Cristian e Imelda Oxlaj Mejía, por sus consejos y su apoyo durante toda mi vida.

**Toda mi familia**

Por su compañía.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

|  |  |
|--|--|
| <b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>        | Por brindarme una casa de estudio.   |
| <b>Facultad de Ingeniería</b>                        | Por darme los conocimientos.   |
| <b>Mis amigos de la Facultad</b>                     | Abimael Chacón, Luis Camey, Marlon Ramírez, Allan Juárez, David Sagastume, Brayner Navarro, Giancarlo Pérez, Rafael Álvarez, Pablo Aquino y demás compañeros de la Escuela y de la Facultad. |
| <b>Inga. Soraya Martínez e Inga. Tatiana Vallejo</b> | Por abrirme las puertas al Departamento de Idioma Técnico, por sus consejos y paciencia durante mi estancia en el Departamento.  |
| <b>Profesor Alfredo Ardón</b>                        | Por abrirme las puertas de su laboratorio para poder terminar mi trabajo de graduación.  |
| <b>Ing. Carlos Chicol</b>                            | Por su tiempo y dedicación en asesorarme en el trabajo de graduación.  |



|            |  |    |
|------------|--|----|
| 1.3.1.4.   | Antecedentes históricos .....                                    | 13 |
| 1.3.2.     | Proceso de corte abrasivo (WJC = <i>water jet cutting</i> )..... | 13 |
| 1.3.2.1.   | Principios de operación .....                                    | 14 |
| 1.3.2.1.1. | Ventajas y desventajas del uso de WJC.....                       | 16 |
| 1.3.2.1.2. | Análisis del funcionamiento de equipo de corte abrasivo.....     | 18 |
| 1.3.2.1.3. | Sistemas generadores de presión .....                            | 20 |
| 1.3.2.1.4. | Abrasivos utilizados en el corte por chorro de agua .....        | 22 |
| 1.3.2.2.   | Antecedentes históricos .....                                    | 22 |
| 2.         | PROPIEDADES MECÁNICAS .....                                      | 23 |
| 2.1.       | Concepto de las propiedades mecánicas.....                       | 23 |
| 2.1.1.     | Diagrama esfuerzo ( $\sigma$ ) – deformación ( $\epsilon$ )..... | 23 |
| 2.1.2.     | Límite de proporcionalidad .....                                 | 25 |
| 2.1.3.     | Límite de elasticidad.....                                       | 25 |
| 2.1.4.     | Límite de fluencia .....   | 25 |
| 2.1.5.     | Módulo de elasticidad.....                                       | 25 |
| 2.1.6.     | Esfuerzo último.....   | 27 |
| 2.1.7.     | Punto de ruptura.....  | 27 |
| 2.1.8.     | Plasticidad .....  | 27 |
| 2.1.9.     | Ductilidad.....  | 27 |
| 2.1.10.    | Resiliencia .....  | 28 |

|      |         |  |    |
|------|---------|--|----|
|      | 2.1.11. | Tenacidad.....   | 28 |
|      | 2.1.12. | Dureza .....   | 28 |
| 2.2. |         | Tipos de carga.....  | 29 |
|      | 2.2.1.  | Tensión.....   | 29 |
|      | 2.2.2.  | Compresión .....   | 29 |
|      | 2.2.3.  | Flexión .....  | 29 |
|      | 2.2.4.  | Corte.....   | 29 |
|      | 2.2.5.  | Torsión.....   | 30 |
| 2.3. |         | Tipos de dureza.....                                       | 30 |
|      | 2.3.1.  | Dureza Brinell .....                                       | 30 |
|      | 2.3.2.  | Dureza Rockwell.....                                       | 31 |
|      | 2.3.3.  | Dureza Vickers .....                                       | 32 |
| 3.   |         | ENSAYO DE TENSIÓN, IMPACTO Y DUREZA .....                  | 35 |
| 3.1. |         | Ensayo de tensión .....                                    | 35 |
|      | 3.1.1.  | Descripción del equipo para el ensayo de<br>tensión .....  | 36 |
|      | 3.1.2.  | Dimensiones de las probetas.....                           | 37 |
|      | 3.1.3.  | Imágenes del corte CNC de oxiacetileno y<br>abrasivo ..... | 38 |
|      | 3.1.4.  | Imágenes del ensayo de tensión .....                       | 41 |
| 3.2. |         | Ensayo de impacto .....                                    | 42 |
|      | 3.2.1.  | Descripción del ensayo.....                                | 42 |
|      | 3.2.2.  | Dimensiones de las probetas.....                           | 44 |
|      | 3.2.3.  | Imágenes del ensayo de impacto .....                       | 45 |
| 3.3. |         | Ensayo de dureza.....                                      | 47 |
| 4.   |         | ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS.....                               | 51 |
| 4.1. |         | Resultados del ensayo de tensión.....                      | 51 |

|                       |  |    |
|-----------------------|--|----|
| 4.1.1.                | Oxiacetileno.....                      | 51 |
| 4.1.2.                | Hidrocorte.....                        | 55 |
| 4.2.                  | Resultados del ensayo de impacto ..... | 58 |
| 4.3.                  | Resultados del ensayo de dureza .....  | 61 |
| CONCLUSIONES.....     |  | 65 |
| RECOMENDACIONES ..... |  | 69 |
| BIBLIOGRAFÍA.....     |  | 71 |
| APÉNDICES.....        |  | 73 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | Boquilla utilizada para el corte abrasivo .....                 | 14 |
| 2.  | Errores geométricos en el corte con chorro de agua .....        | 17 |
| 3.  | Elementos que constituyen un equipo de corte abrasivo .....     | 19 |
| 4.  | Bomba de émbolos .....  | 20 |
| 5.  | Intensificador de presión doble .....                           | 21 |
| 6.  | Curva esfuerzo – deformación ingenieril .....                   | 24 |
| 7.  | Representación del alargamiento al aplicar la fuerza F .....    | 26 |
| 8.  | Diagrama de la representación de esfuerzos .....                | 26 |
| 9.  | Tipos de carga .....  | 30 |
| 10. | Ilustración del ensayo de Brinell .....                         | 31 |
| 11. | Ilustración del ensayo de Rockwell .....                        | 32 |
| 12. | Ilustración del ensayo de Vickers .....                         | 33 |
| 13. | Ilustración de la máquina para el ensayo de tensión .....       | 35 |
| 14. | Máquina de ensayo de tensión .....                              | 36 |
| 15. | Dimensiones de la probeta rectangular según norma ASTM E8 ..... | 38 |
| 16. | Corte CNC de oxiacetileno .....                                 | 39 |
| 17. | Hidro corte CNC .....   | 39 |
| 18. | Imágenes de las probetas cortadas con oxiacetileno .....        | 40 |
| 19. | Imágenes de las probetas cortadas con corte abrasivo .....      | 40 |
| 20. | Ensayo de tensión .....   | 41 |
| 21. | Esquema de trabajo del péndulo de Charpy .....                  | 42 |
| 22. | Máquina del ensayo de Charpy .....                              | 43 |
| 23. | Dimensiones de la probeta de impacto .....                      | 44 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 24. | Imagen de la probeta después del corte abrasivo .....                    | 45 |
| 25. | Imagen de la probeta después del corte oxiacetileno .....                | 45 |
| 26. | Imagen de la probeta en el agua hirviendo para medir la ductilidad ..... | 46 |
| 27. | Imagen de la probeta en hielo para medir la fragilidad .....             | 46 |
| 28. | Imagen de los resultados del ensayo de impacto .....                     | 47 |
| 29. | Imagen de la probeta y de la punta del diamante .....                    | 48 |
| 30. | Imágenes del equipo calibrado, previo a ensayar la pieza .....           | 49 |
| 31. | Gráfica de carga – deformación para la probeta 1 .....                   | 52 |
| 32. | Gráfica de carga – deformación para la probeta 2.....                    | 53 |
| 33. | Gráfica de carga – deformación para la probeta 3.....                    | 53 |
| 34. | Grafica de carga – deformación para la probeta H1 .....                  | 56 |
| 35. | Gráfica de carga – deformación para la probeta H2 .....                  | 57 |
| 36. | Gráfica de carga – deformación para la probeta H3 .....                  | 57 |

## TABLAS

|       |  |    |
|-------|--|----|
| I.    | Propiedades mecánicas del acero 1045 en estado de suministro ..... | 3  |
| II.   | Resultados del ensayo de tensión para corte oxiacetileno .....     | 51 |
| III.  | Resultados del módulo de Young .....                               | 55 |
| IV.   | Resultados del ensayo de tensión .....                             | 56 |
| V.    | Resultados del módulo de Young .....                               | 58 |
| VI.   | Resultados del ensayo de impacto a diferentes temperaturas .....   | 59 |
| VII.  | Resultados del ensayo de impacto en Nm.....                        | 60 |
| VIII. | Dureza de las probetas del ensayo de impacto de oxiacetileno ..... | 61 |
| IX.   | Dureza de las probetas del ensayo de impacto de hidrocorte .....   | 61 |
| X.    | Dureza de las probetas del ensayo de tensión de oxicorte.....      | 62 |
| XI.   | Dureza de las probetas del ensayo de tensión (hidrocortes) .....   | 62 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b>       | <b>Significado</b>  |
|----------------------|---|
| <b>Cm</b>            | Centímetro  |
| <b>GPa</b>           | Gigapascales  |
| <b>°C</b>            | Grados centígrados  |
| <b>HB</b>            | <i>Hardness Brinell</i> (dureza Brinell)                  |
| <b>Kpm</b>           | <i>Kilopound-meter</i> (kilopondio-metro)                 |
| <b>MPa</b>           | Megapascales  |
| <b>m/s</b>           | Metro sobre segundo                                       |
| <b>mm</b>            | Milímetro   |
| <b>Nm</b>            | Newton-metro  |
| <b>O<sub>2</sub></b> | Oxígeno   |
| <b>ft/s</b>          | Pies sobre segundo  |
| <b>%</b>             | Porcentaje  |
| <b>Psi</b>           | <i>Pound per square inch</i> (libra por pulgada cuadrada) |
| <b>In (pulg)</b>     | Pulgadas  |
| <b>Fe</b>            | Símbolo del elemento químico hierro                       |



## GLOSARIO

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>Acero 1045</b>         | Un acero medio carbono con ,45 % de carbono.   |
| <b>Aleación</b>           | Un compuesto de dos o más elementos metálicos.   |
| <b>ASTM</b>               | American Society for Testing Materials (Sociedad Americana para Ensayos de Materiales)   |
| <b>Cementación</b>        | Es un tratamiento termoquímico por medio del cual se le aplica carbono a la superficie del acero mediante difusión, impregnándose y modificando su composición.                                |
| <b>CNC</b>                | Computer Numerical Control (control numérico computarizado).   |
| <b>Combustión</b>         | Es un proceso químico de oxidación rápida que va acompañado de desprendimiento de energía bajo, en forma de calor o luz.   |
| <b>Corte oxiacetileno</b> | También conocido como oxicorte; utiliza un gas combustible que produce una gran llama para precalentar el material, mientras que el gas carburante produce una oxidación cortando el material. |

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| <b>Corte térmico</b>          | Seccionamiento de los materiales por combustión o fusión local mediante una fuente de calor, tal como una llama, un arco eléctrico o un rayo láser.                         |
| <b>Deformación</b>            | Es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por uno o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o la ocurrencia de dilatación térmica. |
| <b>DNC</b>                    | Direct Numerical Control (control numérico directo)   |
| <b>Fusión</b>                 | Es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia del estado sólido a líquido por la acción de calor.  |
| <b>Gas combustible</b>        | Es un gas que se utiliza como combustible para producir energía térmica mediante un proceso de combustión, tal como propano, gas natural o acetileno.                       |
| <b>Hidrocorde</b>             | También conocido como corte abrasivo; es un potente chorro de agua combinado con un polvo abrasivo para producir un corte sobre el material.                                |
| <b>Length of grip section</b> | Largo de la sección reducida.   |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>Maquinabilidad</b>   | Es una propiedad de los materiales que permite comparar la facilidad con la que pueden ser mecanizados por arranque de viruta.                   |
| <b>Metales ferrosos</b> | Son metales que contienen hierro.  |
| <b>Perpendicular</b>    | Línea que forma un ángulo de noventa grados con otra.  |
| <b>Polvo abrasivo</b>   | Es una sustancia que tiene como finalidad actuar sobre otros materiales con diferentes clases de esfuerzo mecánico.                              |
| <b>Presión</b>          | Fuerza ejercida por unidad de superficie de contacto.  |
| <b>Probeta</b>          | Trozo de material destinado a ser sometido a tracción o torsión hasta llegar a la rotura, a fin de conocer algunas de sus propiedades mecánicas. |
| <b>Ranura</b>           | Hendidura estrecha en la superficie de un cuerpo.  |
| <b>Rigidez</b>          | Es una propiedad mecánica de algunos materiales que impide que el material se doble o tuerza.  |
| <b>Sheet-type</b>       | Término que se refiere a una pieza tipo placa.   |
| <b>Software</b>         | Conjunto de programas, lenguajes de programación y datos que controlan que el ordenador funcione y realice determinadas tareas.                  |

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>Soldadura</b>           | Unión de dos piezas o partes de una cosa, generalmente de un metal, mediante calor y una sustancia igual o semejante a las que se pretende unir.  |
| <b>Temperatura</b>         | Propiedad que establece el equilibrio térmico entre dos cuerpos.  |
| <b>Tobera</b>              | Tubo de salida por el que termina el conducto de descarga de un fluido.   |
| <b>Tratamiento térmico</b> | Conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de permanencia, velocidad, presión de los metales o de las aleaciones en estado sólido, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la elasticidad. |
| <b>WJC</b>                 | Water Jet Cutting (corte abrasivo)  |

## RESUMEN

El acero 1045 es un material con grandes resistencias mecánicas y con buena maquinabilidad; es un material que responde muy bien a los tratamientos térmicos.

El corte abrasivo se presenta como una alternativa al corte oxiacetileno; este trabajo de investigación abarca el cambio de propiedades mecánicas que ocurren cuando el mismo material es cortado con ambos tipos de corte. El hidrocorte es un corte en frío mientras que el corte oxiacetileno es térmico, siendo el material sometido a más de 3 000 °C.

Ensayos de tensión, impacto y dureza fueron realizados para observar el comportamiento mecánico del material. Para el ensayo de tensión e impacto se cortan 3 probetas con oxiacetileno y 3 con el corte abrasivo. Las probetas de los ensayos anteriores fueron utilizadas para realizar el ensayo de dureza.

Los diagramas de carga – deformación fueron graficados para cada ensayo de tensión. Para el ensayo de impacto se tomó una probeta de cada corte y se ensayó a temperatura ambiente, a una temperatura entre 0 y 10 °C y finalmente las últimas 2 se ensayaron a una temperatura mayor a 70 °C. Esto se llevó a cabo con la finalidad de observar cómo la temperatura influye en el comportamiento mecánico del material.



# OBJETIVOS

## General

Realizar un estudio comparativo de las propiedades mecánicas del acero 1045 después de realizarle un corte oxiacetileno y abrasivo, mediante el uso de las normas ASTM.

## Específicos

1. Describir el acero 1045 y los procesos de corte.
2. Describir las propiedades mecánicas de los aceros.
3. Realizar un ensayo de tensión, dureza e impacto al acero 1045.
4. Analizar los resultados obtenidos de los ensayos.



## INTRODUCCIÓN

El corte oxiacetileno es uno de los cortes térmicos más antiguos; sin embargo, con el continuo avance de la tecnología, nuevos cortes han aparecido. El corte abrasivo o como se le conoce en inglés *water jet cutting*, utiliza un sistema a base de un chorro de agua a gran presión junto un polvo abrasivo para dar un corte de gran precisión.

Con el avance de la tecnología, ambos cortes se pueden realizar con un control numérico computarizado (CNC); sin embargo, solo se pueden cortar placas o láminas del material escogido. Un programa como AutoCAD es usado para crear el diseño a cortar; en este caso se diseñaron las probetas de tensión e impacto. El diseño de las probetas aparece en la normas ASTM.

Las propiedades mecánicas del material son parámetros que permiten observar cómo el material responde a diferentes tipos de carga o a factores ambientales, como el cambio de temperatura.

El tercer capítulo es una descripción de los diferentes ensayos que se realizaron con el objeto de observar el comportamiento mecánico del acero después de ser cortado térmicamente y con el sistema de corte abrasivo.

Finalmente, se analizan los resultados obtenidos de los diferentes ensayos. Se observa cómo el cambio de temperatura puede afectar el comportamiento mecánico del acero 1045.



# **1. ACERO 1045, CORTE OXIACETILENO Y CORTE ABRASIVO**

## **1.1. Historia de los aceros**

El acero es un elemento aleado compuesto por hierro y carbón. La proporción del acero contiene usualmente un máximo de 2 % de carbón, en un 98 % de hierro. Los primeros artesanos en trabajar el hierro producían aleaciones que hoy se clasifican como hierro forjado; esto mediante una técnica que implicaba calentar una masa de mineral de hierro y carbón vegetal en un gran horno con tiro forzado; de esta manera se reducía el mineral a una masa esponjosa de hierro metálico llena de una escoria de impurezas metálicas, junto con cenizas de carbón vegetal.

Esta esponja de hierro se retiraba mientras permanecía incandescente, dándole fuertes golpes con pesados martillos para poder expulsar la escoria y soldar el hierro.

A partir del siglo XIV el tamaño de los hornos para la fundición aumentó considerablemente, al igual que el trío para forzar el paso de los gases de combustión para carga o mezcla de materias primas. En estos hornos de mayor tamaño, el mineral de hierro de la parte superior del horno se reducía a hierro metálico y a continuación absorbía más carbono como resultado de los gases que lo atravesaban. El producto de estos hornos era el llamado arrabio, una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero.

La producción moderna de acero emplea altos hornos que son modelos perfeccionados de los usados antiguamente. El proceso de refinado del arrabio mediante chorros de aire se debe al inventor británico Henry Bessemer, que en 1855 desarrolló el horno o convertidor que lleva su nombre. Desde la década de 1960 funcionan varios minihornos que emplean electricidad para producir acero a partir de chatarra. Sin embargo, las grandes instalaciones de altos hornos continúan siendo esenciales para producir acero a partir de mineral de hierro.

## **1.2. Acero 1045**

Es un acero utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarias en condición de suministro. Este acero medio carbono puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Cuando se hacen prácticas de soldadura adecuadas, presenta soldabilidad adecuada. Por su dureza y tenacidad es adecuado para la fabricación de componentes de maquinaria.

### **1.2.1. Composición química del acero 1045**

El hierro es la parte principal del acero 1045. Sin embargo, contiene algunos otros elementos dentro de un rango especificado. El primer elemento es el carbono, con un intervalo de 0,43 % a 0,50 %. El siguiente es la silicona, con un intervalo de 0,10 % a 0,60 %. La última aleación es el manganeso, con un rango permisible de 0,60 % a 0,90 %. El fósforo a veces se puede encontrar en este producto, a un máximo de 0,04 %.

### 1.2.2. Propiedades mecánicas del 1045

La tabla siguiente muestra las propiedades mecánicas del acero 1045 en estado de suministro.

Tabla I. **Propiedades mecánicas del acero 1045 en estado de suministro**

|                       |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| Dureza                | 163 HB                   |
| Esfuerzo de fluencia  | 310 MPa (45 000 psi)     |
| Esfuerzo máximo       | 565 MPa (81 900 psi)     |
| Elongación            | 16 % (en 50 mm)          |
| Reducción de área     | 40 %                     |
| Módulo de elasticidad | 200 GPa                  |
| Maquinabilidad        | 57 % (AISI 1212 = 100 %) |

Fuente: elaboración propia.

### 1.2.3. Aplicaciones del acero 1045

Un acero de medio carbono se usa cuando la dureza y la resistencia obtenidas por un tratamiento térmico o por una deformación en frío, son las adecuadas o suficientes para satisfacer las condiciones de servicio requeridas.

Las aplicaciones de este tipo de acero son amplias en la industria automotriz. Se usa en máquinas que requieren dureza y tenacidad como manivelas, chavetas, pernos, bulones, engranajes de baja velocidad, bielas, cigüeñales, entre otras.

Puede ser mecanizado fácilmente en estado recocido, normalizado o templado. Este acero presenta un buen acabado superficial y su mecanizado se caracteriza por presentar larga vida útil de la herramienta de corte.

El acero 1045 está cerca al límite superior de aceros con porcentaje de carbono que pueden ser soldados satisfactoriamente por todos los métodos comunes. Sin embargo, precalentamiento o postcalentamiento pueden ser necesarios en función del espesor.

### **1.3. Antecedentes generales de los procesos de corte de metal por oxígeno – gas y corte abrasivo**

A continuación se describen los antecedentes generales del corte térmico oxiacetileno y el corte abrasivo.

#### **1.3.1. Proceso de corte oxígeno – gas**

El corte por oxígeno – gas es un proceso térmico que separa metales por medio de la reacción química entre el oxígeno y el metal base a temperaturas elevadas.

El concepto general de corte con gas oxicombustible es similar, indistintamente del gas combustible que se use. Hay un número de gases combustibles que se usan en el proceso de corte de metal como: acetileno, propano, hidrógeno, gas natural, entre otros. Cada gas combustible tiene sus características particulares y puede requerir aparatos ligeramente distintos. Las características de los gases se relacionan con la temperatura de la flama, el contenido de calor, las proporciones de gas combustible – oxígeno y otros aspectos similares.

### **1.3.1.1. Principios de operación**

El proceso de corte oxiacetilénico llamado a veces oxicorte, se utiliza solo para cortar metales ferrosos. La fusión del metal tiene escasa importancia en el corte oxiacetilénico. La parte más importante del proceso es la oxidación del material. Cuando se calienta un metal ferroso hasta ponerlo al rojo vivo y luego se le expone a la acción oxígeno puro, ocurre una reacción química entre el metal caliente y el oxígeno. Esta reacción llamada oxidación produce una gran cantidad de calor.

La herramienta (boquilla o soplete) se sitúa perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo, generalmente chapas u hojas metálicas. El chorro, llama de precalentamiento, se dirige hacia la pieza perpendicularmente, o a bisel, y calienta el material hasta su temperatura de ignición. En ese momento se activa un chorro de oxígeno de alta pureza y se produce el corte de la pieza por la combustión del acero.

#### **1.3.1.1.1. Etapas de oxicorte**

- **Precalentamiento:** el material a cortar se calienta a elevada temperatura (870 °C aproximadamente) con la llama producida por el oxígeno y un gas combustible.
- **Corte:** mediante oxígeno a presión y muy alta pureza se oxida el metal y se expulsan los óxidos resultantes.

En una reacción de combustión son necesarios tres elementos: el combustible, el comburente y un agente iniciador. En oxicorte se tiene el

combustible que es el hierro (Fe), el comburente que es el oxígeno (O<sub>2</sub>) y el agente iniciador es la llama del soplete (precalentamiento).

En condiciones normales, aunque se aplique un agente iniciador a una pieza de acero, esta no arde espontáneamente; el Fe contenido no está a su temperatura de ignición (aproximadamente 870 °C) y el oxígeno atmosférico no es lo suficientemente puro (se necesita un 99,5 % de O<sub>2</sub> para quemar el Fe. Así el soplete tiene tres funciones: precalentar el Fe contenido en el acero a su temperatura de ignición, aportar una atmósfera envolvente con una proporción adecuada de O<sub>2</sub> y generar el agente iniciador.

#### **1.3.1.1.2. Aspectos que se deben de tener en cuenta**

- Es requisito que la temperatura de ignición esté por debajo de la temperatura de fusión.
- Capas de óxido en el metal puede tener temperatura de fusión menor a la del metal a cortar, dificultando el proceso de corte.
- La conductividad térmica del metal no debe ser demasiada elevada.
- La presencia de aleantes se hace crítica, ya que merman la capacidad del acero a ser quemado.
- El corte se produce por el flujo del chorro de O<sub>2</sub> a presión que quema el metal y retira la escoria líquida formada.

- Las condiciones de oxicorte solo las cumplen el hierro, el acero al carbono y el acero de baja aleación.

#### **1.3.1.1.3. Procesos que se deben de controlar en el proceso de corte**

- Presión de los gases (oxígeno de precalentamiento, oxígeno de corte y acetileno).
- Volumen de mezcla de gases: la válvula del oxígeno de corte se abre completamente. La apertura de las válvulas del oxígeno de precalentamiento y del acetileno se deben regular para cada tipo de boquilla y según el espesor del material a cortar.
- Distancia entre boquilla y pieza: este parámetro se regula al instalar la máquina y rara vez se modifica.
- Tiempo de precalentamiento – activación del oxígeno de corte: es el tiempo que necesita la llama de precalentamiento para que el material a cortar alcance la temperatura de ignición. Esto depende del tipo de boquilla, o material y del espesor del material. El tipo de boquilla de corte depende del espesor del material a cortar.
- Velocidad de corte, velocidad lineal del soplete durante el corte: depende del tipo de boquilla, material a cortar y de la regulación de los gases.
- Ancho de corte o sangría: antes de realizar el corte de cualquier pieza se debe conocer la ranura que el soplete provoca en el material al cortarlo.

- Esta se debe tener en cuenta para que las dimensiones de la pieza final sean las deseadas. En el panel de control de la máquina se introduce el valor de la sangría de corte. Cuando la máquina funciona en modo automático esta desplazada el soplete hacia el exterior o el interior de la línea de corte.

### **1.3.1.2. Máquinas de oxicorte**

Con el fin de controlar perfectamente todos los factores que intervienen en el proceso de corte, como el volumen correcto de mezcla de gases o la distancia entre boquilla y pieza de trabajo, se han desarrollado distintos equipos industriales que pueden estar controlados por un ordenador.

La máquina de oxicorte consta de un pórtico sobre el que se montan los sopletes. Su velocidad de movimiento se mantiene constante y la altura e inclinación invariables. La mayoría de las máquinas - herramientas de este tipo incorporan la posibilidad de utilizar también sopletes de plasma, los cuales se montan sobre el pórtico de igual forma que los de oxicorte, pero acoplándolos a los distintos gases que requiere el plasma.

Hay muchos modelos de máquinas de oxicorte, desde portátiles, que se apoyan y se desplazan sobre la chapa, hasta máquinas fijas, con una o varias cabezas de corte, capaces de cortar chapas de espesores muy diversos. Son muy comunes las máquinas que utilizan un dispositivo de lectura o copiador óptico que va siguiendo el contorno de las piezas a cortar dibujadas sobre un plano fijo en una mesa de a la máquina. Actualmente se incrementa la incorporación del control numérico (CN) a la máquina de oxicorte, de tal forma que la geometría de los parámetros tecnológicos se introduce en el CN con un programa codificado.

### **1.3.1.3. Control numérico**

El control numérico (CN) es un método que controla los movimientos de los componentes de una máquina, insertando instrucciones codificadas en forma de números y letras directamente en el sistema. Este interpreta en forma automática esos datos y los convierte en señales de salida. A su vez, dichas señales controlan diversos componentes de las máquinas, como la activación de husillos, cambios de herramientas, movimiento de la pieza de trabajo o de las herramientas a lo largo de trayectorias específicas, activación y desactivación de fluidos de corriente.

En las operaciones de control numérico los datos que se relacionan con todos los aspectos de la operación de maquinado (como localizaciones de herramientas, velocidades, avances y fluidos) se almacenan en discos duros. Con base en la información de entrada se pueden activar relevadores y otros dispositivos (controles cableados) para obtener la configuración deseada de la máquina. Se realizan con facilidad operaciones complejas (como el torneado de una parte que tiene diversos contornos o el estampado de dados o matrices en una fresadora). Las máquinas de CN se utilizan mucho en la producción de cantidades pequeñas y medianas de una amplia variedad de partes, tanto en tiendas pequeñas como en grandes instalaciones de manufactura.

El siguiente paso en el desarrollo del control numérico se produjo cuando el equipo de control se convirtió en un control por computadora local mediante software. Se desarrollaron dos tipos de sistemas computarizados: control numérico directo (DNC) y control numérico por computadora (CNC). En el control numérico directo se revisan diversas máquinas directamente (paso a paso) mediante una computadora de unidad de procesamiento central.

En este sistema el operador tiene acceso a la computadora central de una terminal computarizada. Con el DNC, el estatus de todas las máquinas en una instalación de manufactura puede monitorear y determinar desde una computadora central. Sin embargo, tiene una desventaja crucial, si la computadora se apaga, todas las máquinas se vuelven inoperables.

Por otro lado, el control numérico por computadora (CNC) es un sistema en el que una microcomputadora de control es parte integral de una máquina. El operador de la máquina puede programar las computadoras integradas, modificar los programas en forma directa, prepararlos para diferentes partes y almacenarlos. En la actualidad se utilizan ampliamente sistemas CNC debido a la disponibilidad de pequeñas computadoras con gran memoria, controladores programables y microprocesadores de bajo costo y capacidades de edición de programas.

A continuación se describen los elementos funcionales del control numérico y los componentes implicados:

- Entrada de datos: la información numérica se lee y almacena en la memoria de la computadora.
- Procesamiento de datos: los programas son leídos en la unidad de control de la máquina para su procesamiento.
- Salida de datos: esta información se traduce en comando (por lo general, comandos por pulsos) al servomotor. Después este mueve la mesa de trabajo (en la que se monta la pieza de trabajo) a posiciones específicas por medio de movimientos lineales o giratorios usando, motores paso a paso, tornillos de avance y otros elementos mecánicos.

Una máquina CN se puede controlar mediante dos tipos de circuitos: de lazo abierto y cerrado. En el sistema de lazo abierto las señales se envían al servomotor mediante el controlador, pero en los movimientos y las posiciones finales de la mesa de trabajo no se verifica la precisión. El sistema de lazo cerrado está equipado con diversos transductores, sensores y contadores que miden de manera precisa la posición de la mesa de trabajo. Mediante el control de retroalimentación, la posición de dicha mesa se compara con la señal, y los movimientos de la tabla terminan cuando se alcanzan las coordenadas adecuadas.

La medición de la posición en las máquinas CN se realiza por medio de métodos indirectos o directos. En los sistemas de medición indirecta, los codificadores rotatorios o reductores convierten el movimiento rotatorio en traslación. Sin embargo existe una zona muerta (el juego entre dos dientes de acoplamiento adyacente) puede afectar la precisión de la medición de manera significativa. En los sistemas de medición directa, un dispositivo de detección lee una regla graduada en la mesa de la máquina o en la corredera para producir un movimiento lineal. Este sistema es el más preciso.

En el control numérico existen dos tipos básicos de sistemas de control: punto a punto y contorneado. En un sistema punto a punto cada uno de los ejes de la máquina se acciona por separado mediante tornillos de avance y a diferentes velocidades, dependiendo del tipo de operación. La máquina se mueve al principio a máxima velocidad para reducir el tiempo no productivo, pero se desacelera cuando la herramienta se aproxima a su posición definida numéricamente. La trayectoria continua de una posición a otra es importante solo en un aspecto: debe seleccionarse para minimizar el tiempo recorrido a fin de tener un mejor rendimiento. El sistema punto a punto se utiliza principalmente en las operaciones de taladrado, punzonado y fresado.

Por otro lado, en un sistema de contorneado, tanto el posicionamiento como las operaciones se realizan a lo largo de trayectorias controladas, pero a diferentes velocidades. Debido a que la herramienta actúa conforme avanza a lo largo de una trayectoria prescrita, es importante el control preciso y sincronización de velocidades y movimiento. Por lo general, el sistema de contorneado se utiliza en tornos, fresadores, rectificadoras, soldadoras y centros de maquinado.

Las principales ventajas que presenta el control numérico frente a los métodos convencionales de control de máquinas son:

- Se mejora la flexibilidad de la operación, así como la capacidad de producir formas complejas con buena precisión dimensional, buena repetibilidad, productividad y calidad de los productos.
- Se reducen los costos de herramienta, debido a que no se requieren plantillas ni sopletes.
- Se facilita el ajuste de las máquinas.
- Se puede realizar más operaciones con cada configuración; el tiempo requerido para el inicio y maquinado es menor en comparación con los métodos convencionales.
- Se puede elaborar programas con rapidez y es posible reutilizarlos en cualquier momento mediante microprocesadores.
- Es posible reducir prototipos con rapidez.
- La experiencia requerida del operador es menor que la de un maquinista califica y aquel tiene más tiempo para atender a otras tareas en el área de trabajo.

Las limitaciones principales del control numérico son el costo inicial relativamente alto del equipo, la necesidad y el costo del tiempo de

programación y la computadora y el mantenimiento especial requerido. Debido a que estas máquinas son sistemas complejos, las descomposturas pueden ser costosas, así que el mantenimiento preventivo es fundamental.

#### **1.3.1.4. Antecedentes históricos**

La soldadura puede remontarse hasta tiempos muy lejanos, pero fue hasta el siglo XIX que se descubrió la soldadura moderna. Se atribuye al inglés Sir Humphry Davy el haber proporcionado las bases para soldadura moderna gracias a dos descubrimientos: del acetileno y la proporción de un arco entre dos electrodos de carbono, sirviéndose de una batería. En el periodo de 1877 a 1903 se hizo un gran número de descubrimientos e inventos relacionados con la soldadura. Durante dicho periodo se desarrollaron la soldadura y el corte con gas.

La producción de oxígeno y posteriormente la licuefacción del aire junto con la introducción de un conducto o soplete de chorro de aire, ayudaron al desarrollo de la soldadura y del corte, en 1867.

Antes de 1900, el hidrógeno y el gas de carbón se utilizaban junto con el oxígeno. Sin embargo, aproximadamente en 1900 se desarrolló un soplete adecuado para usarse con acetileno a baja presión y se introdujeron los procesos de soldadura y corte con oxiacetileno.

#### **1.3.2. Proceso de corte abrasivo (WJC = *water jet cutting*)**

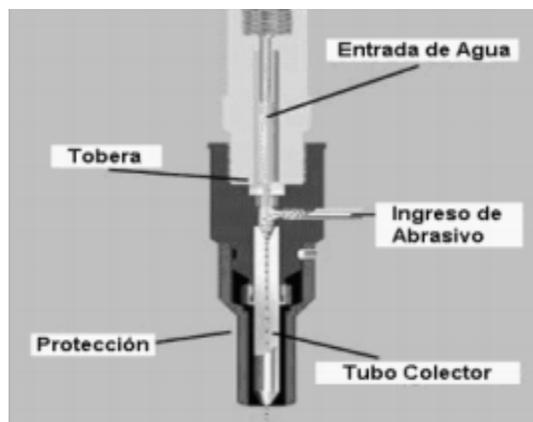
El proceso *waterjet* o hidrocorte es una tecnología que a base de una alta presión de agua en combinación con un polvo abrasivo y ambos canalizados por una boquilla, se logra erosionar y cortar cualquier tipo de material.

El hidrocorte es un sistema avanzado de corte en el que un controlador CNC envía los datos del diseño a una máquina que corta por medio de la presión del agua, de manera precisa y sin desperdicio de material. Con esta tecnología se puede llegar tan lejos como se requiera, ya que permite trabajar con calidad, precisión y rapidez sobre los materiales.

### 1.3.2.1. Principios de operación

En general, este método trabaja forzando a un cierto caudal de agua altamente a través de un orificio de un diámetro muy pequeño (tobera), formando de esta forma un delgado chorro de altísima velocidad. Este chorro impacta el material con una gran fuerza en un área muy reducida, lo que provoca pequeñas grietas que con la persistencia del impacto del chorro erosiona el material, por lo que se habla de microerosión.

Figura 1. **Boquilla utilizada para el corte abrasivo**



Fuente: Google. [http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro\\_ma/23.pdf](http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/23.pdf).

Consulta: 1 de junio de 2016.

Lo principal es alcanzar una presión muy elevada del agua, una de las máximas que se alcanzan actualmente es de 414 MPa. La forma de conseguir esta presión es mediante una bomba que se denomina intensificador, que fue introducida por Ingersoll Rand y que permite alcanzar estas presiones de agua.

El agua a presión se hace pasar por una boquilla muy reducida y se consigue una velocidad muy alta, del orden de 3 veces la del sonido. Esta velocidad tiene como finalidad arrancar el corte. Luego se pasa a la cámara donde se le añade el abrasivo y así sale por un extremo para cortar el material.

Para obtener una corriente fina de agua, se usa una pequeña abertura de boquilla de un diámetro de 0,004 a 0,016 pulgadas (0,1 a 0,4 mm). A fin de que la corriente tenga la energía suficiente para cortar se usan presiones hasta de 90 000 lb/pulg<sup>2</sup> (400 MPa), y el chorro alcanza velocidades hasta de 3000 ft/s (900 m/s).

Una bomba hidráulica presuriza el fluido al nivel deseado. La unidad de boquilla consiste en un soporte y una boquilla de joya. El soporte está hecho de acero inoxidable y la boquilla de zafiro, rubí o diamante. El diamante dura más, pero es el más costoso.

Los parámetros de proceso importantes en el corte abrasivo incluyen la distancia de separación, el diámetro de abertura de la boquilla, la presión del agua y la velocidad de avance del corte. La distancia de separación es la abertura entre la boquilla y la superficie de trabajo.

En general, se prefiere que esta distancia sea mínima para reducir la dispersión de la corriente del fluido antes de que golpee la superficie.

Una distancia de separación normal es de 1/8 de pulgada (3,2 mm). El tamaño de orificio de la boquilla afecta la precisión del corte; las aberturas más pequeñas se usan para cortes más finos sobre materiales más delgados.

Para cortar materia prima más gruesa se requieren corrientes de chorro más densas y mayores presiones. La velocidad de avance del corte se refiere a la velocidad a la que se mueve la boquilla a lo largo de la trayectoria de corte. La velocidad de avance típica varía desde 12 pulg/min (5 mm/s) hasta 1 200 pulg/min (500 mm/s), dependiendo del material de trabajo y su grosor. Por lo general, el WJC se hace en forma automática usando un control computarizado o robots industriales para manipulación de la unidad de boquilla a lo largo de la trayectoria deseada.

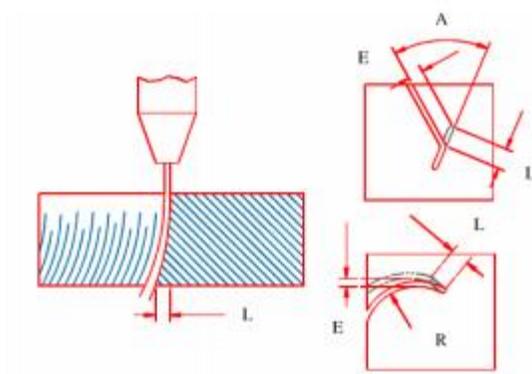
#### **1.3.2.1.1. Ventajas y desventajas del uso de WJC**

En estas aplicaciones, la ventaja del WJC es que la superficie de trabajo no tritura ni quema como en otros procesos mecánicos o térmicos; en consecuencia, la pérdida de material es mínima porque la ranura de corte es estrecha; esto reduce la contaminación ambiental y existe la facilidad de automatizar el proceso usando controles numéricos o robots industriales. Se puede mencionar que uno de los posibles problemas con los procesos de corte por agua es que a medida que avanza el chorro, este se flexiona hacia atrás y hace que la parte superior de la pieza se corte antes que la inferior (ver figura 2).

Si se hace un corte recto no hay problema, pero si es necesario cortar esquinas interiores se tendría que avanzar el corte en la parte inferior y

superior, lo que al final puede dar un mal acabado y en algunas aplicaciones se tendría que rechazar el producto.

Figura 2. **Errores geométricos en el corte con chorro de agua**



Fuente: [http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-025X2004000100006&script=sci\\_arttext&lng=es](http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-025X2004000100006&script=sci_arttext&lng=es). Consulta: 1 de junio de 2016.

Otro problema es el de la inclinación de los bordes; normalmente la zona superior que está enfrentada al chorro tiene una abertura mayor que en la parte inferior. El sistema de corte dinámico controla para reducir estos problemas; en este caso, reduciendo la velocidad; antes de llegar a las esquinas se evitan estas entradas en la parte superior de la pieza y en el caso de los bordes inclinados se corrige la inclinación de la boquilla.

Algunas ventajas que se obtienen en este proceso:

- No se origina una zona afectada térmicamente
- Puede cortar cualquier material con amplio rango de espesores (de 1/16 pulg a 6 pulg de grueso)
- No se requieren operaciones secundarias
- Fuerza de corte pequeñas (1,4 a 2,3 kg)
- Proceso limpio, sin gases

- Puede realizar agujeros para iniciar corte
- Proceso seguro (baja compresibilidad del agua)
- Corta formas y geometrías de gran detalle

Otras desventajas del proceso son:

- Más lento que oxicorte o plasma
- Coste elevado de abrasivo
- Ruidoso
- Inversión inicial elevada, mayor que oxicorte o plasma

#### **1.3.2.1.2. Análisis del funcionamiento de equipo de corte abrasivo**

Los investigadores de esta materia se han basado en las leyes fundamentales de la física y la mecánica de los fluidos para interpretar los fenómenos que aquí ocurren. Se puede explicar cómo el chorro impacta el material con una cierta energía cinética  $E_a$  y abandona el material con una energía  $E_{ex}$ , la cual debe ser menor que la inicial para que se produzca el corte. La diferencia de estas dos energías es la energía disipada  $E_{dis}$ , producto del impacto, la fricción, entre otras, en el corte.

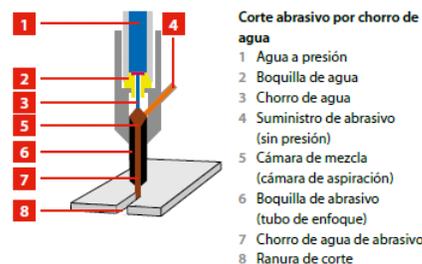
$$E_{dis} = E_a - E_{ex}$$

La energía cinética depende directamente de los flujos máscicos de agua y abrasivo, así como también la velocidad del chorro agua – abrasivo que depende de la presión de agua generada por la bomba y de la eficiencia del inyector.

Para que se logre el corte, los investigadores han podido comprobar que existe una presión límite entre el éxito del corte y el fracaso de este, que se puede denominar “presión crítica”, la que varía para los diferentes materiales y espesores. También influyen otros parámetros en el éxito del corte como la cantidad de abrasivo, tipo de este, cantidad de agua, diámetros de tobera, entre otros.

La elección de una correcta presión de trabajo y de los parámetros de operación, influye de manera importante en el corte, tanto en su capacidad y calidad como en los costos. Por lo cual existen Softwares de simulación que permiten tener una idea de cómo resultaría el corte, principalmente a través de la velocidad de corte posible de obtener.

Figura 3. **Elementos que constituyen un equipo de corte abrasivo**



Fuente: Google. <http://www.bystronic.com/es/productos/sistemas-de-corte-por-chorro-de-agua/>.

Consulta: 1 de junio de 2016.

El sistema se puede integrar también en un portal transversal que mueve el material debajo del chorro de agua. Los ejes guiados por control numérico hacen posible el proceso de corte en tres dimensiones.

El material a tratar se encuentra de forma segura encima de la parrilla de corte y los contornos son cortados con el cabezal de corte. Esto también permite cortar materiales inestables, especialmente blandos, sin contaminación.

### 1.3.2.1.3. Sistemas generadores de presión

Existen dos sistemas principales para generar la presión necesaria, las bombas de émbolos y el llamado intensificador de presión. Las primeras poseen generalmente tres émbolos conectados a un cigüeñal e impulsado por un motor eléctrico (figura 4). Pueden llegar a generar presiones bajas y medias (hasta 344 MPa) sin problemas. La principal ventaja de estas bombas es que es muy eficiente en las presiones mencionadas y su principal desventaja es que sobre estas presiones se torna insegura y produce importante variabilidad en el caudal de entrega.

Figura 4. **Bomba de émbolos**



Fuente: Google. [http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-025X2004000100006&script=sci\\_arttext&lng=es](http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-025X2004000100006&script=sci_arttext&lng=es). Consulta: 1 de junio de 2016.

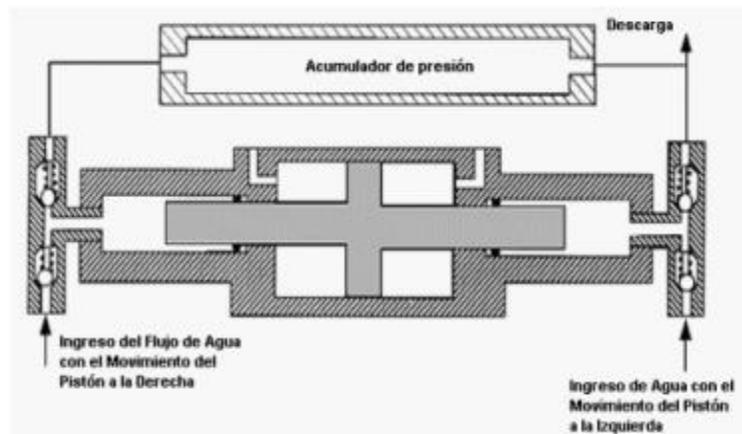
El intensificador de presión consiste principalmente en un cilindro con diferencia de diámetros y un pistón con igual diferencia (figura 5). La sección del

pistón con mayor diámetro es impulsado por un fluido hidráulico, produciendo una presión mucho mayor sobre el agua debido a la diferencia de diámetros (en una relación sección pistón – aumento de presión de 1:10 a 1:25).

Las presiones normales que pueden generar son por sobre los 400 MPa y se ha llegado a los 690 MPa en algunos equipos modernos.

Su principal ventaja radica en la alta presión que puede generar y que puede alimentar a varios inyectores simultáneamente y en contra, su baja eficiencia se debe al sistema hidráulico que posee, ya que pierde potencia por el calor que necesita disipar mediante un sistema intercambiador, además de necesitar un acumulador de presión debido a su gran variabilidad de entrega.

Figura 5. **Intensificador de presión doble**



Fuente: Google. [http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-025X2004000100006&script=sci\\_arttext&tlng=es](http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-025X2004000100006&script=sci_arttext&tlng=es). Consulta: 1 de junio de 2016.

#### **1.3.2.1.4. Abrasivos utilizados en el corte por chorro de agua**

En general los abrasivos que se emplean o que dan buenos resultados deben poseer ciertas características como buena estructura, dureza apropiada, un buen comportamiento mecánico, forma y distribución adecuadas. Para cortar materiales, como acero por ejemplo, son adecuados abrasivos con granos duros y de formas afiladas y materiales como aluminio preferibles los de granos más blandos y no de gran calidad, lo que lo hace más económico.

Los abrasivos más utilizados son granate, óxido de aluminio, olivino, arena sílica, entre otros. Siendo el granate tipo “almandino” el que presenta características más estables y que permite ser empleado sobre gran cantidad de materiales, por lo que es el más popular a nivel mundial.

#### **1.3.2.2. Antecedentes históricos**

Es un proceso por erosión de tipo mecánico. Se desarrolló en los años sesenta para utilizar exclusivamente agua, ya que había industrias como el electro – espacial que tenía problemas para cortar algunos materiales como los recién aparecidos materiales tipo fibra.

Sin embargo, el origen es un poco anterior a eso, ya que la primera persona que se encargó de desarrollar el tema del agua como herramienta de corte fue Norman Franz, un ingeniero forestal que trabajaba en el desarrollo de nuevas tecnologías para el corte de madera, llegando a hacer unas máquinas prototipo con las que experimentó, intentando alcanzar grandes presiones de agua, bastante mayores de las que se utilizan hoy industrialmente. El problema era que no se podía mantener esa presión de forma continua.

## **2. PROPIEDADES MECÁNICAS**

### **2.1. Concepto de las propiedades mecánicas**

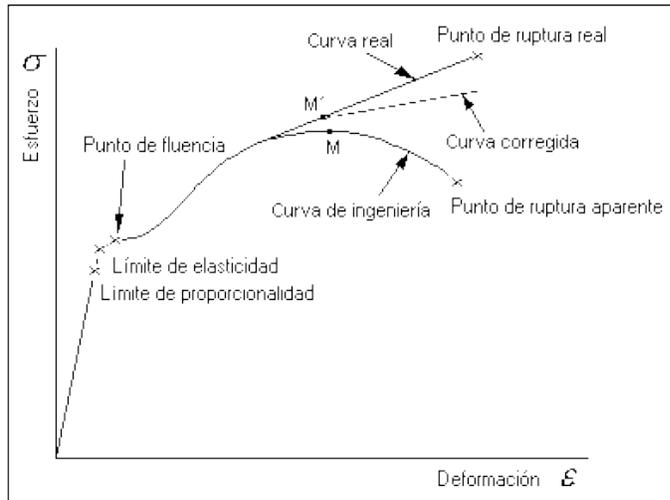
Las propiedades mecánicas guardan una relación principalmente con la respuesta de los materiales a los esfuerzos o cargas que se les imponen. La resistencia mecánica de un material determina la cantidad de fuerza o carga que puede soportar antes de ceder.

El criterio de falla que se utiliza en el diseño puede ser diferente para distintos materiales y por consiguiente existen múltiples criterios de resistencia.

#### **2.1.1. Diagrama esfuerzo ( $\sigma$ ) – deformación ( $\epsilon$ )**

La relación entre el estado de esfuerzos ( $\sigma$ ) inducidos en un material por la aplicación de una fuerza y la deformación ( $\epsilon$ ) que produce se puede representar gráficamente. Una curva típica de la relación entre  $\sigma$  y  $\epsilon$  es la siguiente figura:

Figura 6. **Curva esfuerzo – deformación ingenieril**



Fuente: Google. <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/>. Consulta: 1 de junio de 2016.

La curva esfuerzo deformación se obtiene a partir de los datos de carga - elongación,  $P-\Delta L$ , de la manera siguiente. El esfuerzo ingenieril se obtiene dividiendo la carga,  $P$ , en cada momento, entre el área original del espécimen,  $A_0$ . La deformación ingenieril se obtiene dividiendo la elongación,  $\Delta L$ , en cada instante, entre la longitud de calibre original,  $L$ . Por tanto, cada punto de la curva de  $P-\Delta L$  se convierte en  $s$  y  $e$  mediante las fórmulas:

$$s = P/A_0$$

y

$$e = \Delta L/L_0$$

### **2.1.2. Límite de proporcionalidad**

El mayor esfuerzo en el que este es directamente proporcional a la deformación. Es el mayor esfuerzo en el cual la curva en un diagrama esfuerzo – deformación es una línea recta. El límite proporcional es igual al límite elástico para muchos metales.

### **2.1.3. Límite de elasticidad**

El límite elástico, también denominado límite de elasticidad, es la tensión máxima que un material elastoplástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.

### **2.1.4. Límite de fluencia**

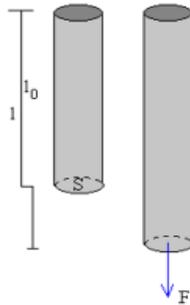
El límite de fluencia es el punto a partir del cual se deforma plásticamente. Hasta esa tensión el material se comporta elásticamente, siguiendo la Ley de Hooke, y por tanto se puede definir el módulo de Young. Es donde el elemento ya presenta deformación visual, pues ya no regresa a su forma original.

### **2.1.5. Módulo de elasticidad**

Se denomina módulo de elasticidad a la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria.

Se aplica una fuerza  $F$  a una barra de longitud  $l_0$  el material se deforma longitudinalmente y se alarga  $l - l_0$ . (ver figura 7).

Figura 7. **Representación del alargamiento al aplicar la fuerza F**



Fuente: Google. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/barra/barra.htm>.

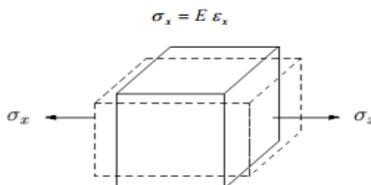
Consulta: 2 de junio de 2016.

La razón de proporcionalidad entre el esfuerzo (fuerza por unidad de área) y deformación unitaria (deformación por unidad de longitud) está dada por la constante  $E$ , denominada módulo de Young (módulo de elasticidad), que es característico de cada material:

$$\frac{F}{S} = E \frac{l - l_0}{l}$$

La ley de Hooke relaciona la deformación  $\epsilon_x$  de una barra sometida a esfuerzo axial, con la tensión normal generada por dicho esfuerzo  $\sigma_x$ , mediante la constante  $E$  que se denomina módulo de elasticidad lineal o módulo de Young.

Figura 8. **Diagrama de la representación de esfuerzos**



Fuente: Google. <http://www.ual.es/~mnavarro/Tema%206%20%20Elasticidad.pdf>.

Consulta: 2 de junio de 2016.

La rigidez de un material queda caracterizada por la relación entre el esfuerzo  $\sigma_x$  y deformación  $\varepsilon_x$ , es decir por el módulo de Young.

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{F_x / A}{\Delta x / x}$$

El módulo de Young tiene las mismas unidades que el esfuerzo.

#### **2.1.6. Esfuerzo último**

Es el punto aparente como lo dice el nombre que se delimita para determinar cuánto es el esfuerzo que se le puede aplicar al elemento antes de llegar a la ruptura.

#### **2.1.7. Punto de ruptura**

Es el punto real donde el elemento se estira hasta un punto donde se separa y a diferencia del punto del punto de ruptura aparente al llegar hasta este límite, aquí sí se rompe.

#### **2.1.8. Plasticidad**

La plasticidad es la propiedad mecánica que tiene un material para deformarse permanente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su límite elástico.

#### **2.1.9. Ductilidad**

La ductilidad es la medida de la cantidad de deformación plástica que puede darse en el material antes de que este se rompa.

La ductilidad puede medirse de dos formas:

- El porcentaje de elongación. Se define de la siguiente manera:

$$\% \text{ de elongación} = (\% EL) = \frac{L_f - L_0}{L_0} * 100$$

- El porcentaje de reducción de reducción de área, el cual se define de la siguiente manera:

$$\% \text{ de reducción de área} = (\% AR) = \frac{A_0 - A_f}{A_0} * 100$$

#### **2.1.10. Resiliencia**

Es el valor numérico del área bajo la curva en la zona elástica. Representa la energía por unidad de volumen que el material absorbe cuando se deforma elásticamente.

#### **2.1.11. Tenacidad**

Es la energía por unidad de volumen que al material puede absorber antes de romperse. La tenacidad es numéricamente igual al área bajo la curva esfuerzo – deformación.

#### **2.1.12. Dureza**

La dureza es la propiedad que tienen los materiales de resistir al rayado y al corte de su superficie.

## **2.2. Tipos de carga**

Para propósitos de análisis, las fuerzas externas que se aplican sobre un material se clasifican así:

### **2.2.1. Tensión**

También conocida como fuerza de tracción; esta fuerza se aplica para intentar estirar el material de su línea de acción.

### **2.2.2. Compresión**

La fuerza aplicada intenta comprimir o acortar al material a lo largo de su línea de acción.

### **2.2.3. Flexión**

Las fuerzas que actúan son paralelas a las superficies que sostienen el objeto. Siempre que existe flexión también hay esfuerzo de tracción y compresión.

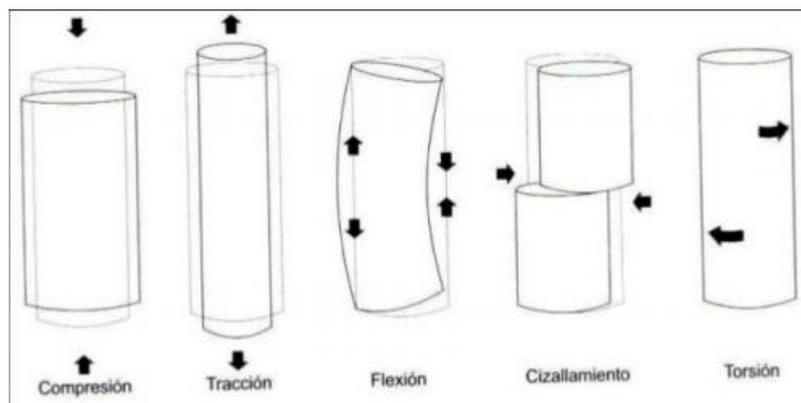
### **2.2.4. Corte**

Las fuerzas se aplican de tal forma que intentan cortar o seccionar al material.

### 2.2.5. Torsión

La fuerza externa aplicada intenta torcer al material. La fuerza externa recibe el nombre de torque o momento de torsión.

Figura 9. Tipos de carga



Fuente: *Resistencia de materiales*. <http://es.slideshare.net/alexpatrinos/3-resistencia-de-materiales>. Consulta: 2 de junio de 2016.

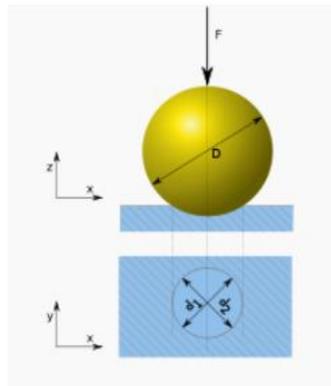
### 2.3. Tipos de dureza

En esta sección se describirán las diferentes formas de obtener la dureza de un material.

#### 2.3.1. Dureza Brinell

Se denomina dureza Brinell a una escala de medición de la dureza de un material mediante el método de indentación, midiendo la penetración de un objeto en el material a estudiar.

Figura 10. **Ilustración del ensayo de Brinell**



Fuente: *Ensayo Brinell* [wikimedia.org/wiki/File:BrinellHardness.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BrinellHardness.svg).

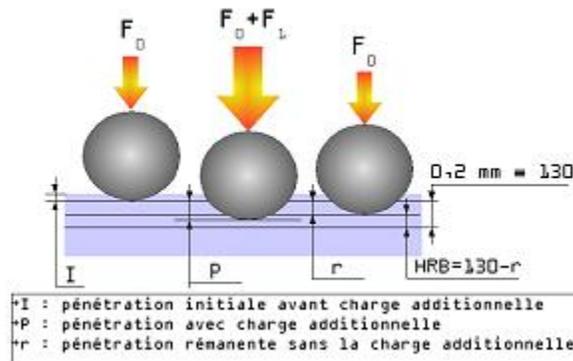
Consulta: 2 de junio de 2016.

### **2.3.2. Dureza Rockwell**

La dureza Rockwell o ensayo de dureza Rockwell es un método para determinar la dureza, es decir, la resistencia de un material a ser penetrado. El ensayo de dureza Rockwell constituye el método más usado para medir la dureza debido a que es muy simple de llevar a cabo y no requiere conocimientos especiales. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar prácticamente cualquier metal o aleación.

Hay dos tipos de penetradores: unas bolas esféricas de acero endurecido (templado o pulido) de  $1/16$ ,  $1/8$ ,  $1/4$ , y  $1/2$  pulg y un penetrador cónico de diamante con un ángulo de  $120^\circ \pm 30'$  y vértice redondeado, formando un casquete esférico de radio 0,2 mm, el cual se utiliza para los materiales más duros.

Figura 11. Ilustración del ensayo de Rockwell



Fuente: *Ensayo de Rockwell*. [wiki/Dureza\\_Rockwell#/media/File:Dureza\\_rockwell.png](http://wiki/Dureza_Rockwell#/media/File:Dureza_rockwell.png).

Consulta: 2 de junio 2016.

### 2.3.3. Dureza Vickers

El ensayo de dureza de Vickers, llamado el ensayo universal, es un método para medir la dureza de los materiales. Sus cargos van de 5 a 125 kilopondios (de cinco en cinco). Su penetrador es una pirámide de diamante con un ángulo de base de 136°. Se emplea para láminas delgadas hasta 0,15 mm (0,006 milésimas de pulgada) y no se lee directamente en la máquina. Para determinar el número de dureza se aplica la siguiente fórmula:

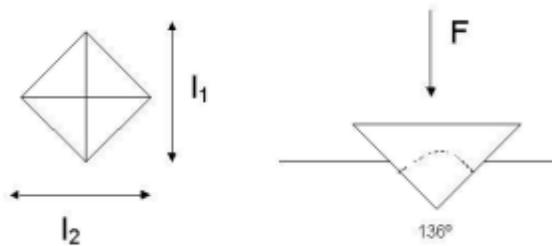
$$HV = \frac{1,8544F}{p^2}$$

Este ensayo constituye una mejora al ensayo de dureza Brinell. Se presiona el indentador contra una probeta, bajo cargas más ligeras que las utilizadas en el ensayo Brinell.

Se miden las diagonales de la impresión cuadrada y se halla el promedio para aplicar la fórmula antes mencionada.

Este tipo de ensayo es recomendado para durezas superiores a 500 HB (en caso de ser inferior, se suele usar el ensayo de dureza Brinell). Este ensayo, además, puede usarse en superficies no planas. Sirve para medir todo tipo de dureza y espesores pequeños.

Figura 12. **Ilustración del ensayo de Vickers**



Fuente: *Ensayo de Vickers*. [wikipedia.org/wiki/Dureza\\_Vickers#/media/File:Vickerhard.JPG](http://wikipedia.org/wiki/Dureza_Vickers#/media/File:Vickerhard.JPG).

Consulta: 2 de junio de 2016.

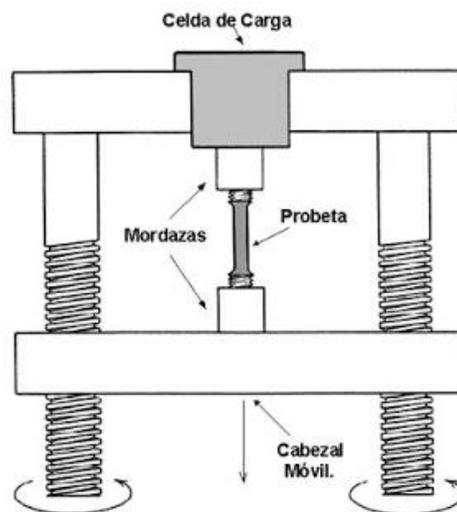


### 3. ENSAYO DE TENSIÓN, IMPACTO Y DUREZA

#### 3.1. Ensayo de tensión

El ensayo de tensión es utilizado para medir la resistencia a una fuerza estática o aplicada lentamente. En este ensayo una probeta es alargada por una fuerza de tensión ejercida gradualmente con el fin de obtener ciertas propiedades mecánicas de materiales, en general, su resistencia, rigidez y ductilidad. Sabiendo que los resultados de muestra, se han establecido una prueba en la cual se aplica una fuerza de tensión sobre una probeta en forma rectangular y tamaño normalizado (ASTM E8). Este ensayo se lleva a cabo a temperatura ambiente entre 10 °C y 35 °C.

Figura 13. Ilustración de la máquina para el ensayo de tensión



Fuente: Google. <http://marcelodelima.blogspot.com/2008/06/recepcin-de-muestras.html>.

Consulta: 4 de junio de 2016.

### 3.1.1. Descripción del equipo para el ensayo de tensión

La máquina utilizada en el laboratorio para la realización de esta práctica es la universal. Esta máquina se utiliza para evaluar la ductilidad de ciertos materiales metálicos sometidos a grandes cargas, que en conjunto con un programa va simulando la gráfica de esfuerzo – deformación mientras las cargas van aumentando gradualmente sobre la probeta.

Figura 14. Máquina de ensayo de tensión



Fuente: Laboratorio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

La probeta se coloca dentro de las mordazas tensoras, de manera que se adapten bien y tengan efecto de cuña con accionamiento neumático, hidráulico o manual.

La fuerza inicial no debe ser demasiado alta, porque de lo contrario podría falsear el resultado del ensayo. Asimismo se debe cuidar que no se produzca deslizamiento de la probeta. La máquina de ensayos está diseñada para alargar la probeta a una velocidad constante y para medir continua y simultáneamente la carga instantánea aplicada y el alargamiento resultante. El ensayo dura unos minutos y es destructivo, es decir, la probeta del ensayo es deformada permanentemente y a menudo rota. La velocidad de estiramiento será siguiendo la norma ASTM.

Procedimiento experimental:

- Medir el ancho y espesor de la probeta para obtener el área de sección transversal. Esta servirá para obtener los diferentes esfuerzos.
- Identificar las probetas que fueron cortadas con oxiacetileno y las de corte abrasivo.
- Colocar la probeta en la máquina universal y sujetarla con las mordazas.
- Seleccionar la velocidad de ensayo de acuerdo con la norma ASTM E8. Ha de ser siempre aquella que provoque rotura de la probeta en un tiempo comprendido entre 0,5 y 5 minutos.
- Calcular los esfuerzos y graficar el diagrama esfuerzo – deformación.

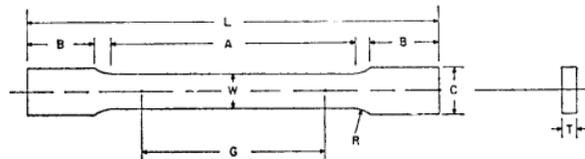
### **3.1.2. Dimensiones de las probetas**

Las probetas pueden ser de gran tamaño o maquinadas; esto depende de la existencia en la que se encuentra el material a utilizar. Probetas que no han sido maquinadas correctamente son la razón de resultados insatisfactorios o incorrectos; debido a eso se debe tener cuidado al maquinar las probetas para maximizar precisión y minimizar errores en los resultados.

Las secciones reducidas de las probetas deben de estar libres de trabajo en frío, grietas, marcas de fatiga, rebabas, gubias, surcos, superficies o esquinas ásperas, sobrecalentamiento, o cualquier condición que puede afectar las propiedades a medir.

Las dimensiones de las probetas a utilizar deben cumplir con la norma ASTM E8.

Figura 15. **Dimensiones de la probeta rectangular según Norma ASTM E8**



|  | Dimensions              |                        |                  |
|--|-------------------------|------------------------|------------------|
|  | Standard Specimens      |                        | Subsize Specimen |
|  | Plate-Type, 1½-in. Wide | Sheet-Type, ½-in. Wide | ¼-in. Wide       |
|  | in.                     | in.                    | in.              |
| G—Gage length (Note 1 and Note 2)                        | 8.00 ± 0.01             | 2.000 ± 0.005          | 1.000 ± 0.003    |
| W—Width (Note 3 and Note 4)                              | 1½ + ⅛, - ¼             | 0.500 ± 0.010          | 0.250 ± 0.005    |
| T—Thickness (Note 5)                                     |                         | thickness of material  |                  |
| R—Radius of fillet, min (Note 6)                         | 1                       | ½                      | ¼                |
| L—Over-all length, (Note 2, Note 7 and Note 8)           | 18                      | 8                      | 4                |
| A—Length of reduced section, min                         | 9                       | 2¼                     | 1¼               |
| B—Length of grip section, (Note 8)                       | 3                       | 2                      | 1¼               |
| C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9) | 2                       | ¾                      | ¾                |

\*\*Nota las dimensiones que se utilizaron fueron de la columna 2, *Sheet – Type, ½-in.*

Fuente: Norma ASTM, sección 6. Probetas de Ensayo. p.2.

### 3.1.3. Imágenes del corte CNC de oxiacetileno y abrasivo

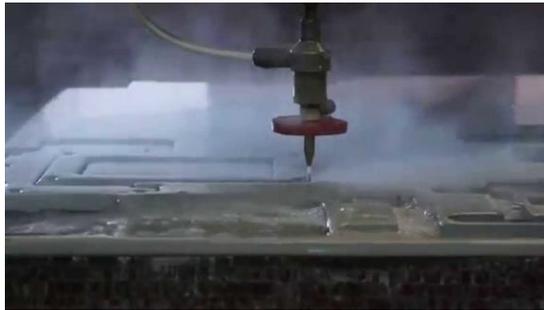
A continuación se presenta imágenes de los proceso de corte abrasivo y oxiacetileno.

Figura 16. **Corte CNC de oxiacetileno**



Fuente: *Oxicorte*. [http://servicio.mercadolibre.com.mx/MLM-532035788-pantografo-cnc-para-corte-con-plasma-oxicorte-\\_JM](http://servicio.mercadolibre.com.mx/MLM-532035788-pantografo-cnc-para-corte-con-plasma-oxicorte-_JM). Consulta: 4 de junio de 2016.

Figura 17. **Hidro corte CNC**



Fuente: Hidrocortes de Guatemala.

Figura 18. **Imágenes de las probetas cortadas con oxiacetileno**



Fuente: taller de cortes térmicos.

Figura 19. **Imágenes de las probetas cortadas con corte abrasivo**

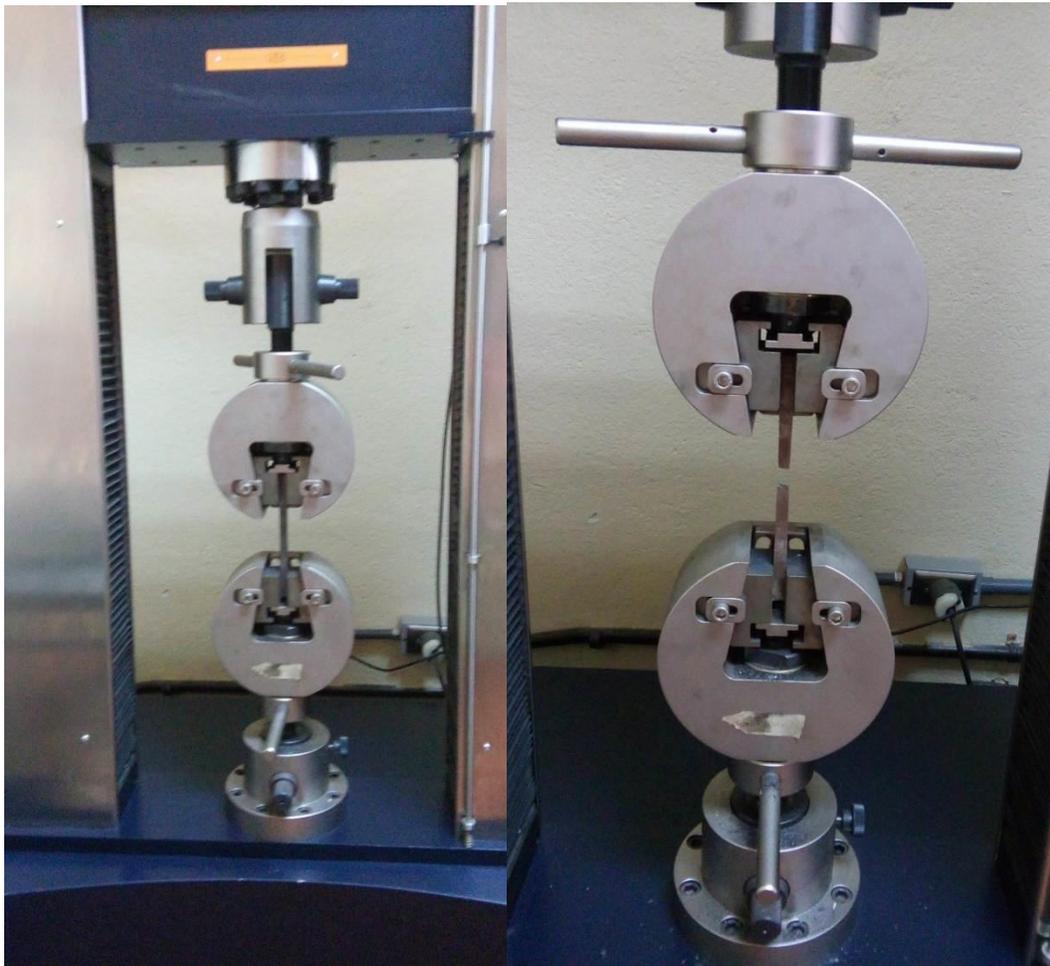


Fuente: taller de cortes térmicos

### 3.1.4. Imágenes del ensayo de tensión

A continuación se muestra una imagen de la máquina universal para el ensayo de tensión.

Figura 20. Ensayo de tensión



Fuente: Laboratorio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

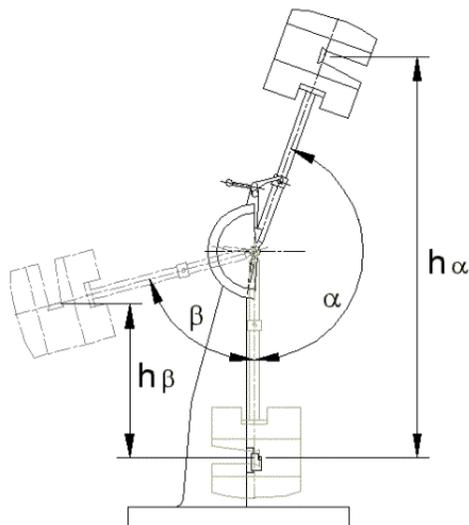
## 3.2. Ensayo de impacto

En esta sección se describirá el ensayo de impacto, su procedimiento experimental, imágenes del ensayo y de las probetas utilizadas.

### 3.2.1. Descripción del ensayo

Los ensayos dinámicos son realizados para valorar la capacidad de resistencia de los materiales metálicos a las cargas de impacto (tenacidad) y determinar su tendencia a la destrucción frágil. El objetivo de este ensayo es someter las probetas a diferentes temperaturas y determinar la energía al momento de impacto. A través del experimento se pueden identificar los comportamientos de fragilidad y ductilidad de los metales.

Figura 21. Esquema de trabajo del péndulo de Charpy



Fuente: *Péndulo de Charpy*. <http://www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/Impacto.htm>.

Consulta: 4 de junio de 2016.

El equipo que se utiliza para este ensayo es la máquina de Charpy. Consiste de un péndulo y 3 escalas (una mide el esfuerzo que se requiere para quebrar la probeta en  $\text{kpm}/\text{cm}^2$ ; otra mide el ángulo de impacto en grados y la última mide la energía consumida en el proceso en  $\text{kpm}$ ). La muestra se coloca de forma horizontal alineando la ranura (se toma la ranura como el centro de la probeta) con el péndulo, por ello es indispensable que tenga las medidas que indica la Norma ASTM E23. El impacto es aplicado de forma perpendicular al eje longitudinal de la muestra. En otras palabras, la ranura le da la espalda al péndulo para poder alinear la ranura con el eje longitudinal del péndulo. El péndulo tiene una altura inicial ( $h_0 = 1.6 \text{ m}$ ) y la velocidad de impacto es  $5,6 \text{ m/s}$ .

Figura 22. **Máquina del ensayo de Charpy**



Fuente: Laboratorio de Resistencia de Materiales, Intecap.

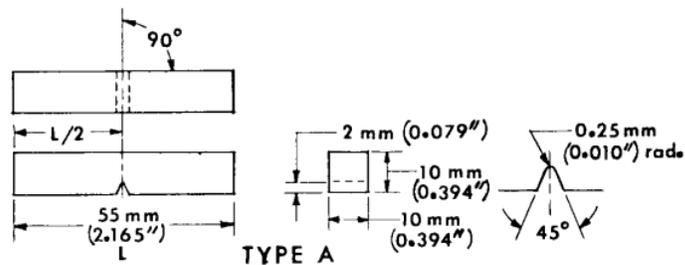
Procedimiento experimental:

- Se mide la masa de las probetas.
- Se toma una probeta cortada con corte abrasivo y otra con oxiacetileno y se pone en una olla que contiene agua y se pone en una estufa para elevar la temperatura hasta 70 °C o más.
- Se toma una probeta cortada con corte abrasivo y otra con oxiacetileno y se pone en un termo con hielo, se usan dos capas de hielo dejando las probetas en medio de ambas capas para bajarle la temperatura a un rango de 0 a 10 °C.
- Se toma una probeta cortada con corte abrasivo y otra con oxiacetileno y se ensaya a temperatura ambiente.
- Se anotan el esfuerzo de rotura, ángulo de impacto y energía de impacto para cada ensayo.

### 3.2.2. Dimensiones de las probetas

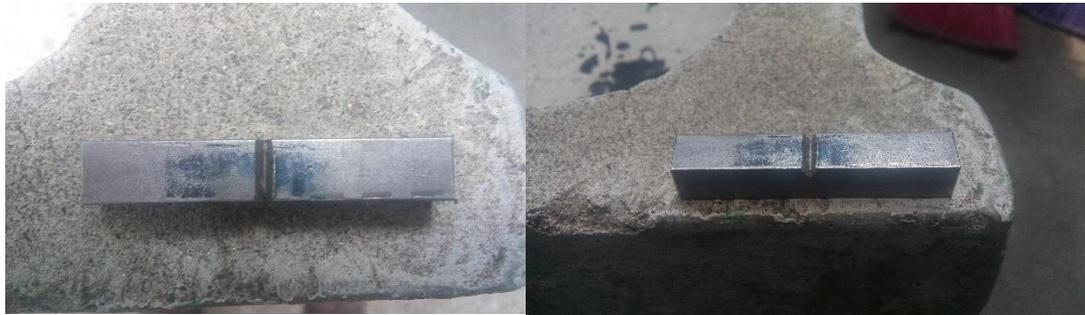
Las dimensiones de la probeta para el ensayo de Charpy fueron tomadas de la Norma ASTM E23.

Figura 23. Dimensiones de la probeta de impacto



Fuente: Norma ASTM E23, sección 7. p.2.

Figura 24. **Imagen de la probeta después del corte abrasivo**



Fuente: Hidrocortes de Guatemala.

Figura 25. **Imagen de la probeta después del corte oxiacetileno**



Fuente: taller de cortes térmicos.

### **3.2.3. Imágenes del ensayo de impacto**

A continuación se presentan imágenes tomadas en el laboratorio de resistencia de materiales del Intecap durante el ensayo experimental.

Figura 26. **Imagen de la probeta en el agua hirviendo para medir la ductilidad**



Fuente: Laboratorio de Resistencia de Materiales, Intecap.

Figura 27. **Imagen de la probeta en hielo para medir la fragilidad**



Fuente: imagen tomada en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de Intecap.

Figura 28. **Imagen de los resultados del ensayo de impacto**



Fuente: Laboratorio de Resistencia de Materiales, Intecap.

### **3.3. Ensayo de dureza**

La dureza es una propiedad mecánica que no está relacionada con propiedades elásticas o plásticas; sin embargo puede referirse a la solidez o firmeza del material, es un valor que se puede determinar a través de diferentes ensayos. Para esta investigación se utilizó el ensayo de Vickers, empleando el equipo del laboratorio de resistencia de materiales del Intecap. En la sección anterior se describió este ensayo, sin embargo, el equipo que se utilizó es más moderno y preciso; a través un sistema digital indica la dureza después de haber penetrado la probeta, dando así la dureza del material, sin tener que recurrir a algún cálculo.

### Procedimiento del ensayo experimental

- Se verifica que la probeta esté plana en la superficie donde se apoya y la superficie de contacto, para evitar que el diamante en la punta del equipo no se quiebre.
- Se calibra el equipo y se coloca la pieza a ensayar.
- Con unas palancas se presiona la pieza hasta llegar a un poco más de 360 y se presiona *start*.
- Se espera hasta que la presión se haya normalizado, se lee y se anota la dureza que haya indicado el equipo.

Figura 29. **Imagen de la probeta y de la punta del diamante**



Fuente: Laboratorio de Resistencia de Materiales, Intecap.

Figura 30. **Imágenes del equipo calibrado, previo a ensayar la pieza**



Fuente: Laboratorio de Resistencia de Materiales, Intecap.



## 4. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS

### 4.1. Resultados del ensayo de tensión

A continuación se muestran los resultados del ensayo de tensión.

#### 4.1.1. Oxiacetileno

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo de tensión para las probetas cortadas con oxiacetileno.

Tabla II. Resultados del ensayo de tensión para corte oxiacetileno

| Numero de Probeta | Ancho (cm) | Espesor (cm) | Área (cm <sup>2</sup> ) | Cedente (kg) |        | Esfuerzos (kg/cm <sup>2</sup> ) |         | Elongación (mm) |
|-------------------|------------|--------------|-------------------------|--------------|--------|---------------------------------|---------|-----------------|
|                   |            |              |                         | Cedente      | Máxima | Cedente                         | Máxima  |                 |
| 1                 | 1,096      | 1,195        | 1,30972                 | ---          | 9 760  | ---                             | 7451.97 | 37              |
| 2                 | 1,58       | 1,197        | 1,89126                 | ---          | 14 200 | ---                             | 7508.22 | 24,5            |
| 3                 | 1,57       | 1,198        | 1,88086                 | ---          | 13 720 | ---                             | 7294.5  | 20,3            |

Fuente: elaboración propia.

Se midió el espesor y ancho tanto de la parte superior como inferior de la sección reducida de la probeta (ver figura 15, *Gage Length*) para poder

promediarlo y así sacar una sección de área promedio para cada probeta a ensayar.

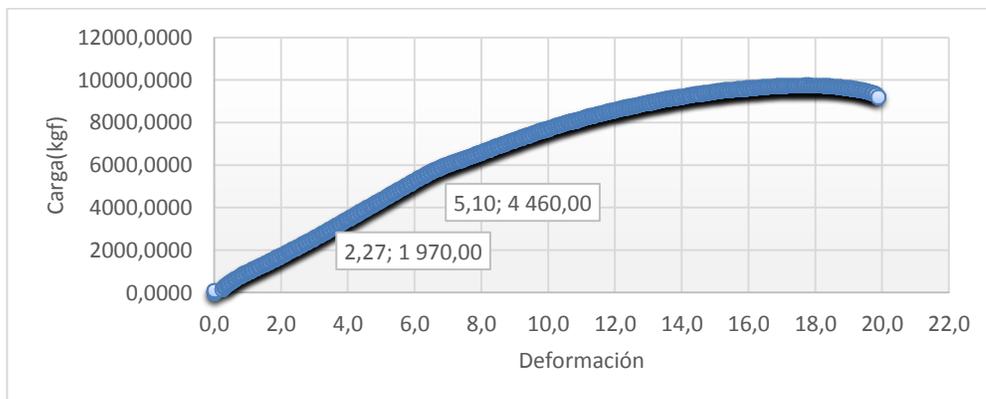
Debido a que en la gráfica carga - deformación (ver figuras 31,32 y 33) para este ensayo no muestra un cambio una zona elástica a plástica, la carga cedente no es visible. Al no haber una carga cedente no se puede calcular el esfuerzo cedente. La carga máxima es la más grande que soportó la probeta antes de fallar, esto se puede observar en la tabla II. A partir de la carga máxima y el área se puede obtener el esfuerzo máximo utilizando la ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

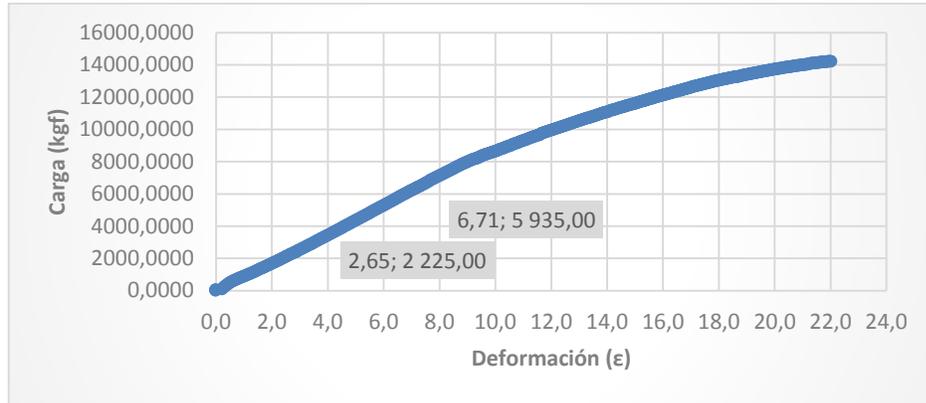
- $\sigma$ , el esfuerzo máximo
- P, la carga máxima
- A, el área de la sección transversal de la probeta

Figura 31. **Gráfica de carga – deformación para la probeta 1**



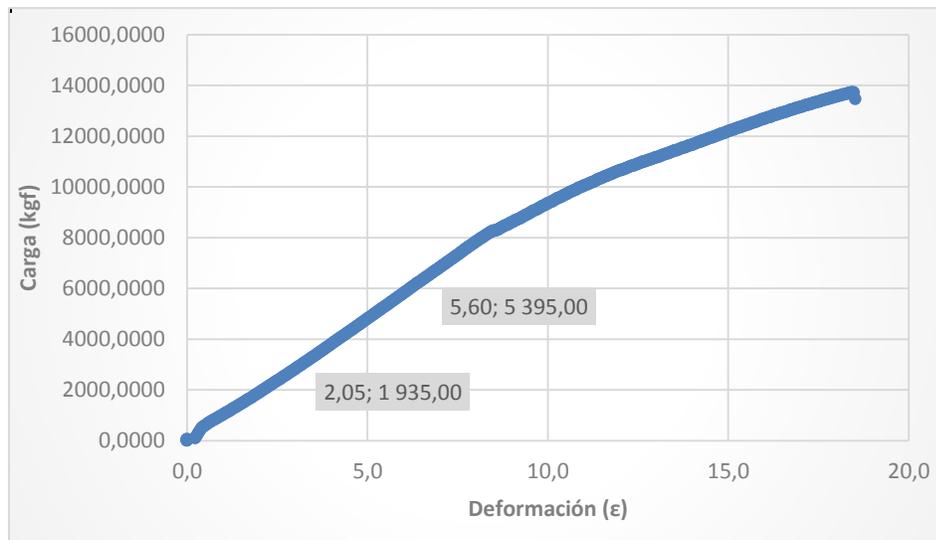
Fuente: elaboración propia, empleando el programa Excel.

Figura 32. **Gráfica de carga – deformación para la probeta 2**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa Excel.

Figura 33. **Gráfica de carga – deformación para la probeta 3**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa Excel.

En las gráficas resultantes del ensayo de tensión para probetas que fueron cortadas con oxiacetileno se puede observar que no hay un cambio de zonas,

es decir que no es visible con claridad cuando el material deja la zona elástica y pasa a la zona plástica cuando es sometido a cargas constantes de tensión. Por esta razón se puede inducir que no existe una carga cedente, por ende no existe un esfuerzo cedente. Se le conoce como zona elástica al rango de proporcionalidad entre las cargas aplicadas y las deformaciones que ocurren durante las aplicaciones de dichas cargas; al dejar de aplicarlas, el material regresa a su forma y tamaño original.

Una vez la carga es mayor a la última del rango de cargas de la zona elástica del material, empieza la zona plástica. Cuando el material es sometido a las cargas entra a la zona plástica, este pierde toda posibilidad de regresar a su tamaño y forma original. Otro factor importante a notar es que debido a que fueron sometidas a altas temperaturas, más de 3 000 °C, su ductilidad aumentó. Por ello se puede apreciar que se requiere de mayores cargas para lograr la rotura del material. Aunque no es observable el cambio de zona, sí se puede calcular el módulo de elasticidad del material, utilizando los puntos marcados en la gráficas de carga – deformación.

Módulo de Young/elasticidad:

$$m = \frac{P_2 - P_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Luego de haber encontrado la pendiente se divide dentro del área de la sección transversal:

$$E = \frac{m}{A}$$

Donde:

- $m$ , la pendiente de la recta
- $P_2$  y  $P_1$  los valores de las cargas en la gráfica carga - deformación
- $\varepsilon_2$  y  $\varepsilon_1$  son valores de la gráfica carga – deformación
- $E$ , es el módulo de elasticidad o módulo de Young
- $A$ , el área de la sección transversal de la probeta

Tabla III. **Resultados del módulo de Young**

| Probeta | Carga (kgf) | Deformación ( $\varepsilon$ ) | $m$ (kgf) | Área ( $\text{cm}^2$ ) | Módulo de Young ( $\text{kgf/cm}^2$ ) |
|---------|-------------|-------------------------------|-----------|------------------------|---------------------------------------|
| 1       | 2 490       | 2,8                           | 889,29    | 1,31                   | 678,84                                |
| 2       | 3 710       | 4                             | 927,5     | 1,89                   | 490                                   |
| 3       | 3 460       | 3,55                          | 974,75    | 1,88                   | 518,43                                |

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.2. Hidrocorte

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo de tensión de las probetas cortadas con el sistema abrasivo.

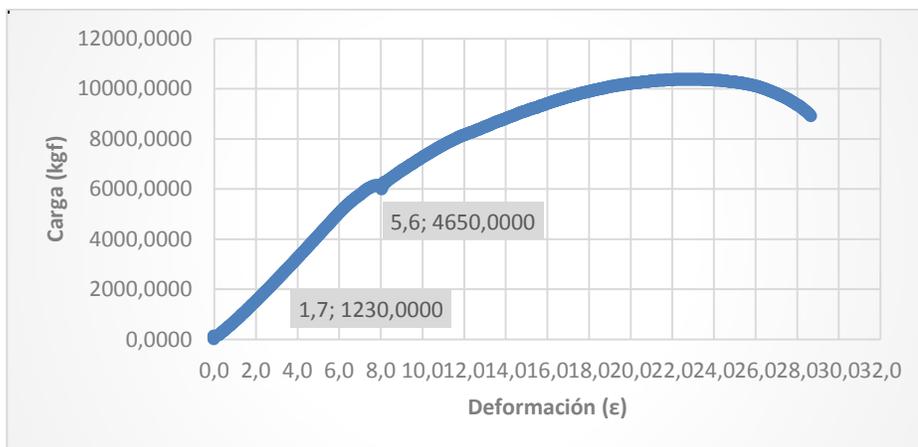
Tabla IV. **Resultados del ensayo de tensión**

| Número de probeta | Ancho (cm) | Espesor (cm) | Área (cm <sup>2</sup> ) | Cedente (kg) |        | Esfuerzos (kg/cm <sup>2</sup> ) |           | Elongación (mm) |
|-------------------|------------|--------------|-------------------------|--------------|--------|---------------------------------|-----------|-----------------|
|                   |            |              |                         | Cedente      | Máxima | Cedente                         | Máxima    |                 |
| 1                 | 1,274      | 1,196        | 1,523704                | 6280         | 10360  | 4 121,535                       | 6 799,221 | 28,7            |
| 2                 | 1,27       | 1,197        | 1,52019                 | 6640         | 10700  | 4 367,875                       | 7 038,594 | 27,2            |
| 3                 | 1,267      | 1,197        | 1,516599                | 6440         | 10740  | 4 246,343                       | 7 081,635 | 27,7            |

Fuente: elaboración propia.

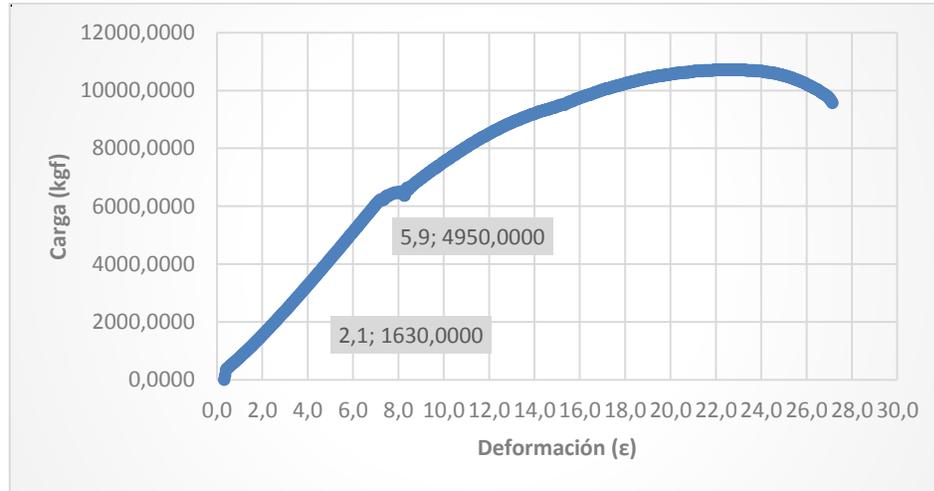
Como se puede observar en las figuras 34 a 36, en esta ocasión sí se puede observar el cambio de zonas, de elástica a plástica, por eso se ha logrado encontrar las cargas y los esfuerzos cedentes para cada ensayo. La fórmula que se utilizó fue la misma para encontrar el esfuerzo máximo para las probetas de oxicorte.

Figura 34. **Gráfica de carga – deformación para la probeta H1**



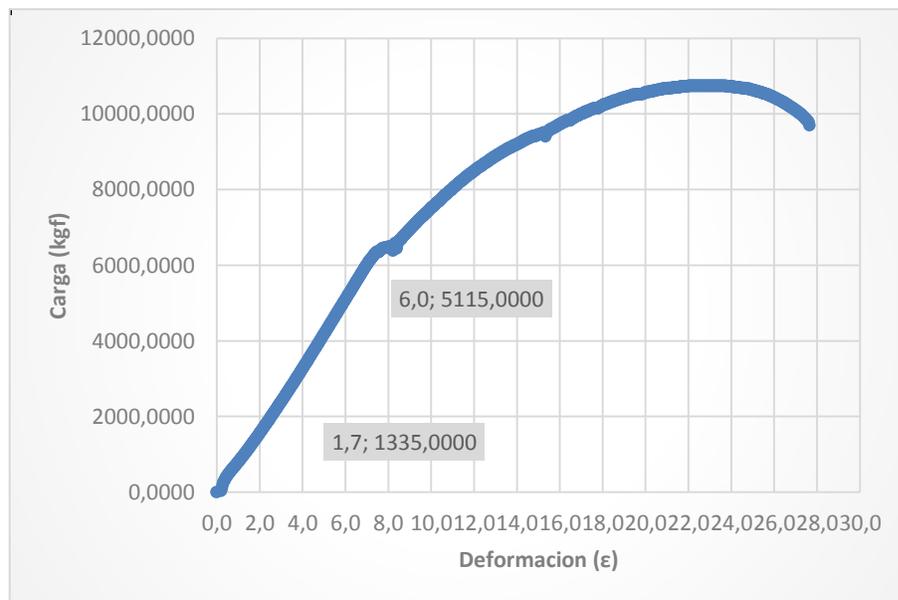
Fuente: elaboración propia, empleando el programa Excel.

Figura 35. **Gráfica de carga – deformación para la probeta H2**



Fuente: elaboración propia, empleado el programa Excel.

Figura 36. **Gráfica de carga – deformación para la probeta H3**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa Excel.

En las gráficas anteriores se muestra un comportamiento normal para materiales dúctiles. A diferencia de las probetas cortadas con oxiacetileno, en estas si se puede apreciar la transición de zona elástica a plástica. El módulo Young se encontró de la misma forma que para las probetas anteriores.

Tabla V. **Resultados del módulo de Young**

| <b>Probeta</b> | <b>Carga (kgf)</b> | <b>Deformación (<math>\epsilon</math>)</b> | <b><math>m</math>(kgf)</b> | <b>Área (<math>\text{cm}^2</math>)</b> | <b>Módulo de Young (<math>\text{kgf/cm}^2</math>)</b> |
|----------------|--------------------|--|----------------------------|--|---|
| 1              | 3 420              | 3,9  | 876,92                     | 1,52                                   | 576,92  |
| 2              | 3 320              | 3,8  | 873,68                     | 1,52                                   | 574,79  |
| 3              | 3 780              | 4,3  | 879,07                     | 1,52                                   | 578,34  |

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2. Resultados del ensayo de impacto**

En esta sección se muestran los resultados del ensayo de impacto, en dos sistemas de unidades diferentes.

Tabla VI. **Resultados del ensayo de impacto a diferentes temperaturas**

| Aspecto                          | Esfuerzo<br>(kpm/cm <sup>2</sup> ) | Ángulo de<br>impacto (°) | Energía de<br>impacto<br>(kpm) |
|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Sin probeta                      | 18,5                               | 58                       | 13,2                           |
| Ambiente                         |                                    |                          |                                |
| Oxicorte                         | 31,5                               | 91                       | 22,2                           |
| Hidrocorte                       | 26,5                               | 78                       | 18,8                           |
| Caliente (aproximadamente 90 °C) |                                    |                          |                                |
| Oxicorte                         | 34                                 | 92,5                     | 22,4                           |
| Hidrocorte                       | 29,5                               | 84                       | 20,2                           |
| Frío (entre 0 y 10 °C)           |                                    |                          |                                |
| Oxicorte                         | 31                                 | 84                       | 21,4                           |
| Hidrocorte                       | 23,5                               | 70                       | 16,9                           |

Fuente: elaboración propia.

Donde:

1 kilopondio – metro (kpm) igual a 1 kilogramo fuerza – metro (kg\*m)

1 kilogramo fuerza es igual a 9,8 Newton-metro (Nm)

1 kpm es igual a 9,8 Newton-metro (Nm)

Teniendo en cuenta la información anterior, la siguiente tabla muestra los resultados en el sistema internacional:

Tabla VII. **Resultados del ensayo de impacto en Nm**

| Aspecto                          | Tenacidad<br>(Nm/cm <sup>2</sup> ) | Ángulo de<br>impacto (°) | Energía de<br>impacto (Nm) |
|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Sin probeta                      | 181,3                              | 58                       | 129,36                     |
| Ambiente                         |                                    |                          |                            |
| Oxicorte                         | 308,7                              | 91                       | 217,56                     |
| Hidrocorte                       | 259,7                              | 78                       | 184,24                     |
| Caliente (aproximadamente 90 °C) |                                    |                          |                            |
| Oxicorte                         | 333,2                              | 92,5                     | 219,52                     |
| Hidrocorte                       | 289,1                              | 84                       | 197,96                     |
| Frío (entre 0 y 10 °C)           |                                    |                          |                            |
| Oxicorte                         | 303,8                              | 84                       | 209,72                     |
| Hidrocorte                       | 230,3                              | 70                       | 165,62                     |

Fuente: elaboración propia.

La temperatura es uno de los grandes factores que condicionan el modo de fractura de los materiales. La tenacidad es la energía que absorbe el material antes de fracturarse; esta propiedad, al igual que la ductilidad y la fragilidad, son propensas a ser afectadas por un cambio de temperatura. Las probetas que se ensayaron a temperatura ambiente muestran la tenacidad del material. En las probetas que se ensayaron a una temperatura de 90 °C, se observó el aumento de tenacidad del material. En las probetas que fueron sometidas a bajas temperaturas (casi llegando a 0 °C) el material se vuelve frágil, absorbiendo menos energía para su rotura.

La transición dúctil - frágil pudo ser observada con la realización de este ensayo. Como las probetas de oxiacetileno fueron sometidas a altas temperaturas (más de 3000 °C) antes de realizarse este ensayo es usual ver

que estas eran más dúctiles que las que fueron cortadas con el corte abrasivo. A mayor ángulo de impacto mayor es el momento que se requiere para fracturar el material; como ya se había mencionado antes, materiales sometidos a altas temperaturas requieren mayores energías, por ello se requiere un ángulo mayor para fracturar el material.

### 4.3. Resultados del ensayo de dureza

Las tablas siguientes muestran los resultados del ensayo de dureza para las probetas de impacto.

Tabla VIII. **Dureza de las probetas del ensayo de impacto de oxiacetileno**

| Probeta | Dureza Vickers (HV) | Dureza Vickers (HV) | Dureza Vickers (HV) | Promedio (HV) |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| 1       | 19,4                | 19                  | 19,3                | 19,2          |
| 2       | 17,4                | 18,8                | 19                  | 18,4          |
| 3       | 18,9                | 18,2                | 17,3                | 18,1          |

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Dureza de las probetas del ensayo de impacto de hidrocorte**

| Probeta | Dureza Vickers (HV) | Dureza Vickers (HV) | Dureza Vickers (HV) | Promedio (HV) |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| 1       | 16,7                | 16,1                | 17                  | 16,6          |
| 2       | 15,1                | 16                  | 17                  | 16,03         |
| 3       | 15,9                | 15,5                | 16,7                | 16,03         |

Fuente: elaboración propia.

Las tablas siguientes muestran los resultados del ensayo de tensión para las probetas de tensión.

Tabla X. **Dureza de las probetas del ensayo de tensión de oxicorte**

| Probeta | Dureza Vickers (HV) | Dureza Vickers (HV) | Dureza Vickers (HV) | Promedio (HV) |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| 1       | 16,7                | 16,7                | 17,9                | 17,1          |
| 2       | 16,5                | 16                  | 15,6                | 16,03         |
| 3       | 15,4                | 17,8                | 18,4                | 17,2          |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Dureza de las probetas del ensayo de tensión (hidrocortes)**

| Probeta | Dureza Vickers (HV) | Dureza Vickers (HV) | Dureza Vickers (HV) | Promedio (HV) |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| 1       | 16                  | 16,2                | 16,6                | 16,27         |
| 2       | 15                  | 16                  | 15,4                | 15,47         |
| 3       | 16,1                | 17                  | 15,4                | 16,17         |

Fuente: elaboración propia.

El ensayo de dureza proporciona un parámetro para poder ver la resistencia del material a ciertos factores como penetración, rayado, entre otros. Por ello es una de las propiedades más importantes a encontrar. En esta ocasión hay probetas que fueron cortadas con oxiacetileno y en corte en frío (hidrocorte). Como se puede observar en las tablas anteriores, las probetas que fueron cortadas con oxiacetileno tienen un ligero incremento en la dureza, comparada esta con la proporcionada en estado de suministro.

Las probetas cortadas en hidrocorte tienden a estar cerca del rango de estado suministro y esto es porque cuando los materiales son cortados en frío no tienden a perder la dureza de suministro.



## CONCLUSIONES

1. El acero 1045 también conocido como acero medio carbono, es un acero con grandes resistencias mecánicas y con buenas propiedades para ser maquinado; responde fácilmente al tratamiento térmico.
2. El corte oxiacetileno por CNC consiste en una serie de procesos que usan la reacción química entre el oxígeno con un metal base. La temperatura necesaria para el corte se mantiene debido a la llama; esta se obtiene a través de una combustión entre un gas combustible y oxígeno puro.
3. El hidrocorte es un sistema de corte abrasivo; utiliza un controlador CNC que envía los datos del diseño a cortar y con una combinación de un chorro a alta presión y un polvo abrasivo, logra cortar el material de manera precisa y sin desperdicio de material.
4. Las propiedades mecánicas de los aceros son características que dependen de la forma de obtención del material. Esas propiedades pueden variar dependiendo del tipo de corte, el maquinado, tipo de tratamiento térmico, entre otros, que se le aplique al material.
5. El ensayo de tensión es el más usado para caracterizar mecánicamente un material. Este ensayo consiste en alargar o estirar la pieza hasta que fracture, aplicando y registrando cargas de tensión continuas, así como el alargamiento de la pieza. Con estas dos variables se grafica el diagrama esfuerzo – deformación y se observa el comportamiento mecánico del

material. Los parámetros importantes a determinar son el módulo de Young, alargamiento de la pieza, punto de fluencia y esfuerzo de rotura.

6. El ensayo de impacto es utilizado para determinar cuánta energía absorbe el material antes de fracturarse. A través de este ensayo también es posible determinar cómo la temperatura es un factor importante que afecta las propiedades del material.
7. La dureza es un parámetro que se utiliza para determinar qué tan resistente es el material a ser penetrado; por ello se utilizó el ensayo de Vickers para determinar la dureza. El valor depende del módulo de elasticidad y de las propiedades viscoelásticas del material.
8. El ensayo de tensión determinó que en las probetas cortadas con oxiacetileno, su ductilidad aumentó; sin embargo, en la gráfica carga – deformación no es posible observar el cambio de zona elástica a plástica, por lo que es muy difícil determinar la carga y el esfuerzo cedente. Las probetas cortadas con agua no tienen cambio alguno; estas presentan las propiedades esperadas o las propiedades de suministro.
9. El ensayo de impacto confirma el aumento de ductilidad de probetas cortadas con oxiacetileno, ya que estas absorbieron más energía, previo a fracturarse; sin embargo, cabe mencionar que la temperatura es un factor influyente en el cambio de ductilidad de la pieza, ya que a menor temperatura el material se vuelve más frágil, absorbiendo menos energía antes de fallar.

10. La temperatura también afecta la dureza del material; como se pudo observar a través del ensayo de dureza, las probetas sometidas a altas temperaturas tuvieron un incremento de dureza.



## RECOMENDACIONES

1. El corte oxiacetileno deja escoria sobre la pieza; esto requiere de un proceso de maquinado para ser removido, lo cual si no se hace de manera correcta puede fatigar el material, provocando su rotura antes de lo deseado. Para evitar eso se puede usar el corte abrasivo, el cual es un proceso de corte alternativo, si no se desea un cambio de propiedades en la pieza a cortar.
2. El corte oxiacetileno solo corta sobre placas de acero de 1 pulgada o de mayor espesor; si se desea cortar un material de menor espesor es recomendable utilizar el hidrocorte. Se puede utilizar el corte oxiacetileno, pero podría pandear la pieza debido a las altas temperaturas.
3. Si el espesor de la pieza es menor a 1 pulgada y se desea cortar con un corte térmico, puede utilizarse el corte por plasma. El corte por láser es una opción si la lámina de acero es entre 0,5 y 6 mm de espesor.
4. Si se desea que la pieza, después de cortarla con oxiacetileno recupere sus propiedades mecánicas, se puede utilizar el tratamiento térmico de normalizado; esto ayudará a aliviar las tensiones internas del material causadas por el corte y el maquinado.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM E8. *Standards test methods for tension testing of metallic materials*. Sección 3. Volumen 1. 8a ed. USA: ASTM Committee E28, 2000. 21 p.
2. HARMER, Davis George; TROXELL, Earl; WISKOCIL, Clement. *The testing and Inspection of engineering materials*. 2a ed. Nueva York: McGraw-Hill Book Company Inc, 1995. 64 p.
3. KEYSER, Carl. *Técnicas para pruebas de materiales.*, Ohio: Charles E. Merrill Publishing Company. 1975. 88 p.
4. LÓPEZ MARTÍNEZ, Alejandro. *Manual oxicorte, teórico – práctico*. España: Universidad de Almería. 2012. 10 p.
5. MOMBER, Andreas; KOVACEVIC, Radovic. *Principles of water jet machining*. Berlín: Springer – Verlag, 1998. 204 p.
6. SMITH, William; HASHEMI, Javad. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4a ed. Nueva York: McGraw-Hill Company. 2006. 8 p. ISBN: 979-0-07-352924-0.



## APÉNDICES

### Apéndice 1. Cálculo del módulo de Young para la probeta de tensión 1P

Coordenadas de la gráfica 1P: punto 1 (2,3, 1970) y punto 2 (5,1, 4460)

$$m = \frac{P_2 - P_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{4\,460 - 1\,970}{5,1 - 2,3} = 889,29 \text{ kgf}$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{m}{A} = \frac{889,29}{1,31} = 678,85 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 2. Cálculo del módulo de Young para la probeta de tensión 2P

Coordenadas de la gráfica 2P: punto 1(2.7, 2225) y Punto 2(6.7, 5935)

$$m = \frac{P_2 - P_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{5\,935 - 2\,225}{6,7 - 2,7} = 927,5 \text{ kgf}$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{m}{A} = \frac{927,5}{1,89} = 490,74 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Cálculo del módulo de Young para la probeta de tensión 3P**

Coordenadas de la gráfica 3P: punto 1(2.05, 1935) y punto 2 (5.6, 5395)

$$m = \frac{P_2 - P_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{5\,395 - 1\,935}{5,6 - 2,05} = 974,75 \text{ kgf}$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{m}{A} = \frac{974,27}{1,88} = 518,23 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Cálculo del módulo de Young para la probeta 1H**

Coordenadas de la gráfica 1H: punto 1 (1.7, 1230) y punto 2 (5.6, 4650)

$$m = \frac{P_2 - P_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{4\,650 - 1\,230}{5,6 - 1,7} = 876,92 \text{ kgf}$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{m}{A} = \frac{876,92}{1,52} = 576,92 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 5. **Cálculo del módulo de Young para la probeta 2H**

Coordenadas de la gráfica 2H: Punto 1 (2.1, 1630) y Punto 2 (5.9, 4950)

$$m = \frac{P_2 - P_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{4\,950 - 1\,630}{5,9 - 2,1} = 873,68 \text{ kgf}$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{m}{A} = \frac{873,68}{1,52} = 574,79 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 6. **Cálculo del módulo de Young para la probeta 3H**

Coordenadas de la gráfica 3H: punto 1 (1.7, 1335) y punto 2 (6, 5115)

$$m = \frac{P_2 - P_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{5\,115 - 1\,335}{6 - 1,7} = 879,07 \text{ kgf}$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{m}{A} = \frac{873,68}{1,52} = 574,39 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Fuente: elaboración propia.

