

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA INTERFACE DE USUARIO PARA LA INSTRUMENTACIÓN DEL PÉNDULO DE IMPACTO ZWICK 5102 UTILIZADO EN LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES POLIMÉRICOS

**ANLLY MELISSA GUERRERO CASTILLO
LISETH VIVIANA CAMPO ARCOS**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIA NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN,
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2012**

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA INTERFACE DE USUARIO PARA LA INSTRUMENTACIÓN DEL PÉNDULO DE IMPACTO ZWICK 5102 UTILIZADO EN LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES POLIMÉRICOS

**ANLLY MELISSA GUERRERO CASTILLO
LISETH VIVIANA CAMPO ARCOS**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Físico**

**DIRECTOR:
CARLOS ALBERTO RINCÓN Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIA NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN,
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2012**

Nota de Aceptación

Director Ph.D Carlos Alberto Rincón

Jurado Ing. Mecánico Hugo Martinez

Jurado Ing. Físico Diego A. Bravo

Popayán, 4 de mayo de 2012

DEDICATORIA

A Dios, por ser nuestro creador, fortaleza y consuelo, cuando más lo necesitamos, y por demostrarnos su amor a través de cada persona que nos rodea.

A nuestros padres, amigos, profesores y en especial a nuestro amigo Carlos Javier Guzmán, quienes sin esperar nada a cambio han sido pilares en nuestro camino, formando parte de este logro que hoy es motivo de alegría y satisfacción por haber alcanzado un triunfo profesional en nuestra vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por habernos iluminado, guiado, y fortalecido en todo el camino recorrido para culminar hoy nuestros estudios profesionales.

Al Divino Niño por su intersección, porque siempre lo sentí a mi lado y me dio la fortaleza para no decaer y continuar luchando para lograr este sueño.

A nuestros padres por su apoyo incondicional, por ser motivación, y por enseñarnos que la perseverancia es la clave para alcanzar cualquier meta propuesta por muy difícil que parezca.

A nuestros abuelos por su constancia, serenidad, motivación, amor y entrega incondicional durante el proceso para alcanzar los logros propuestos.

A mi hermano Andrés Felipe Campo por su compañía, y buena energía que me impulsaron en los momentos en los que más lo necesité.

A nuestros tíos, primos y demás familiares quienes con su apoyo y fraternidad lograron ser una base fundamental para hoy culminar nuestra carrera profesional.

Al profesor Carlos Alberto Rincón, por su orientación, su conocimiento y el tiempo dedicado para el desarrollo del presente proyecto.

A nuestros amigos por su paciencia, compañía, alegría y apoyo incondicional.

A la Universidad del Cauca y el ASTIN SENA por proporcionarlos la oportunidad de ampliar, profundizar y aplicar los conocimientos adquiridos durante nuestro ciclo para concluir nuestros estudios.

Al coordinador de Laboratorios y Servicios de Materiales y Manufactura Diego Javier Gómez y a su equipo de trabajo Jimmy, Eduardo, Fabian y Juan de la Universidad de los Andes, por su colaboración y orientación en la etapa de fabricación de los polímeros y su respectiva caracterización mecánica por medio de ensayos de impacto.

Gracias infinitas a todos.....

ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: POLIMEROS.....	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 CONCEPTOS GENERALES.....	3
1.3 ESTRUCTURA QUÍMICA.....	4
1.4 ESTRUCTURA FÍSICA.....	5
1.4.1 CRISTALINIDAD.....	5
1.5 PROPIEDADES MECÁNICAS.....	5
1.5.1 RIGIDEZ Y MODULO DE ELASTICIDAD.....	5
1.5.2 DEFORMACIÓN PLÁSTICA.....	7
1.5.3 PARÁMETROS INCLUYENTES EN LAS	8
PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS.....	
1.5.3.1 TEMPERATURA.....	8
1.5.3.2 PESO MOLECULAR.....	8
1.5.3.3 CRISTALINIDAD.....	8
1.5.3.4 VISCOELASTICIDAD.....	9
1.6 CLASIFICACIÓN TERMO-MECÁNICA.....	10
1.7 PROCESAMIENTO DE POLÍMEROS.....	10
REFERENCIAS.....	12
CAPÍTULO 2: PRUEBAS DE IMPACTO.....	13
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y DESARROLLO DE LAS	13
PRUEBAS DE IMPACTO.....	
2.1.1 INTRODUCCIÓN.....	13
2.1.2 EVOLUCIÓN EN LAS PRUEBAS DE	13
MATERIALES.....	
2.2 INTRODUCCIÓN.....	14
2.3 TENACIDAD A LA FRACTURA.....	14
2.4 FRACTURA DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS.....	16
2.4.1 FRACTURA FRÁGIL.....	17
2.4.2 FRACTURA DÚCTIL.....	18
2.5 TENSIÓN DE FRACTURA DE GRIFFITH.....	19
2.6 PRUEBAS DE IMPACTO EN MATERIALES.....	20
2.6.1 INTRODUCCIÓN.....	20
2.6.2 TEMPERATURA DE TRANSICIÓN DE DÚCTIL A	21
FRÁGIL.....	
2.6.3 RELACIÓN CON EL DIAGRAMA ESFUERZO	22

DEFORMACIÓN.....	23
2.6.4 PRUEBA DE IMPACTO CHARPY.....	23
2.6.4.1 INTRODUCCIÓN.....	23
2.6.4.2 DIMENSIONES DE MUESTRA Y	24
ENTALLA.....	25
2.6.5 PRUEBA DE IMPACTO IZOD.....	25
2.6.5.1 INTRODUCCIÓN.....	25
2.6.5.2 DIMENSIONES DE MUESTRA Y	26
ENTALLA.....	26
2.6.5.3 PRUEBAS DE IMPACTO IZOD.....	26
2.6.6 TRACCIÓN POR IMPACTO.....	27
2.6.7 TIPO DE FALLOS PRESENTES TRAS UNA PRUEBA DE	28
IMPACTO.....	28
REFERENCIAS.....	29
CAPÍTULO 3: PÉNDULO DE IMPACTO ZWICK 5102.....	31
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MÁQUINA.....	31
3.2 PARTES PRINCIPALES DE LA MÁQUINA.....	31
3.2.1 ESTRUCTURA.....	31
3.2.2 PÉNDULO Y MARTILLO.....	32
3.2.3 SOPORTES PARA LAS PROBETAS.....	33
3.2.3.1 SOPORTE PARA PROBETAS TIPO	33
CHARPY.....	33
3.2.3.2 SOPORTE PARA PRUEBAS DE IMPACTO	33
IZOD.....	34
3.2.3.3 SOPORTE PARA PRUEBAS DE TRACCIÓN	34
POR IMPACTO.....	34
3.3 SISTEMA DE MEDICIÓN Y REGISTRO.....	34
3.4 TIPOS DE PRUEBA DE IMPACTO.....	35
3.4.1 INTRODUCCIÓN.....	35
3.4.2 PRUEBA DE IMPACTO CHARPY.....	36
3.4.3 PRUEBA DE IMPACTO IZOD.....	36
3.4.4 PRUEBA DE TRACCIÓN POR IMPACTO.....	36
3.5 CÁLCULO DE LA ENERGÍA Y RESISTENCIA AL	36
IMPACTO.....	36
3.6 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE IMPACTO.....	38
REFERENCIAS.....	39
CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA INTERFACE DE USUARIO PARA EL	40
PENDULO DE IMPACTO ZWICK 5102.....	40
4.1 MICROCONTROLADORES PIC.....	40
4.1.1 INTRODUCCIÓN.....	40
4.1.2 FUNCIONAMIENTO DE LA FAMILIA DE	41

MICROCONTROLADORES PIC18F.....	42
4.1.3 FUENTE DE PODER.....	42
4.1.4 PROGRAMA DEL PIC.....	43
4.2 SENSOR DE TEMPERATURA.....	44
4.2.1 INTRODUCCIÓN.....	44
4.2.2 MODO DE OPERACIÓN.....	44
4.3 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DEL ENCODER.....	46
4.3.1 INTRODUCCIÓN.....	46
4.3.2 ENCODER ROTATIVO INCREMENTAL.....	47
4.3.3 PROGRAMACIÓN DEL PIC18F4550.....	48
4.4 COMPARADOR DE VOLTAJE.....	49
4.4.1 INTRODUCCIÓN.....	49
4.4.2 MOTOR CC.....	50
4.4.3 DISEÑO Y MODO DE OPERACIÓN.....	51
4.5 ETAPA DE POTENCIA PARA SISTEMA DE LIBERACIÓN DEL PÉNDULO.....	53
4.5.1 INTRODUCCIÓN.....	53
4.5.2 MODO DE OPERACIÓN.....	53
4.6 COMUNICACIÓN SERIAL.....	54
4.6.1 INTRODUCCIÓN.....	54
4.6.2 RS232 EN EL PC.....	55
4.6.3 MAX 232.....	55
4.7 INTERFAZ.....	56
4.7.1 INTRODUCCIÓN.....	56
4.7.2 GUÍA DE USUARIO DE LA INTERFAZ.....	57
4.8 MOLDEADO.....	59
4.8.1 INTRODUCCIÓN.....	59
4.8.2 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA.....	59
REFERENCIAS.....	62
 CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	 64
 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DEL TRABAJO.....	 71

INTRODUCCIÓN

Los polímeros tienen hoy en día un gran impacto en el campo industrial, las aplicaciones de estos materiales son muchas. Por ejemplo, en la industria automotriz, de alimentos, en instrumentación óptica, en la industria farmacéutica, y en la fabricación de utensilios domésticos, entre otros. Este abanico de aplicaciones, nos presenta el reto de estudiar sus múltiples propiedades: eléctricas, ópticas, químicas y mecánicas, y satisfacer las necesidades del ámbito ingenieril. Estos estudios requieren de técnicas o ensayos que permiten caracterizar un determinado material dependiendo de su campo de acción.

De esta manera en conjunto con las nuevas tecnologías se han construido equipos como el Péndulo Zwick 5102, el cual se enfoca en la determinación de la energía y resistencia al impacto de materiales poliméricos frágiles. Esta es una de las herramientas comúnmente utilizadas para realizar ensayos de impacto estandarizados por las normas ASTM D6110, "Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics" (Ensayo Charpy), ASTM D256, "Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics" (Ensayo Izod) y ASTM D1822, "Standard Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials" (Ensayo Tracción por Impacto). El Péndulo de Impacto Zwick 5102 es una máquina perteneciente al SENA ASTIN de Cali, el cual estuvo fuera de servicio por algunos años, a causa de daños en el sistema de acondicionamiento de la señal. El propósito de esta propuesta fue orientado a la recuperación de las pruebas de impacto, con el objetivo de satisfacer las necesidades de la industria local. Para lograrlo se realizó un diseño electrónico y una interfaz de usuario que permitiera obtener un mejor rango de precisión en los resultados de energía y resistencia al impacto con respecto a equipos análogos, además de un control de las principales variables influyentes en el comportamiento mecánico de los polímeros.

El presente trabajo se encuentra distribuido de la siguiente manera: en el capítulo 1 se da a conocer la importancia de trabajar con materiales poliméricos en este tipo de ensayos de fractura y su estructura física y química, sus propiedades mecánicas y el proceso mediante el cual se lleva a cabo el moldeo o proceso de fabricación de dichos materiales; en el capítulo 2, se realiza un recorrido desde los antecedentes históricos de las diferentes pruebas de impacto en materiales hasta su desarrollo hoy en día, además se especifica y centra en los ensayos tipo Charpy, Izod y Tracción por Impacto, pruebas las cuales es posible realizarlas mediante el péndulo de impacto Zwick 5102 y así mismo se expone el estudio a cerca de mecánica de fractura en este tipo de ensayos; en el capítulo 3 se describe de forma general la máquina, desde su estructura física hasta los diferentes métodos mediante los cuales se realizan los tipos de ensayo en ella, el

sistema de medición de la energía y resistencia de impacto, y por último se deducen las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento físico del péndulo; en el capítulo 4 se especifica el diseño electrónico del sistema, por medio del diseño del prototipo, desarrollo del software de programación y construcción de la interfaz de usuario, mediante la cual se permite la instrumentación del péndulo de impacto en estudio, en el capítulo 5 se expone y analiza los resultados obtenidos mediante las diferentes pruebas tipo Izod y Charpy, en materiales poliméricos. Por último se precisan las conclusiones y perspectivas del proyecto.

CAPÍTULO 1: POLÍMEROS

1.1 INTRODUCCIÓN

Los polímeros juegan un papel muy importante en la vida del ser humano. En efecto nuestro cuerpo está hecho de muchos polímeros, ejemplo proteínas, enzimas, etc. Existen otros polímeros naturales como la madera, caucho, cuero y seda los cuales le han servido a la humanidad por muchos siglos. Las herramientas modernas han revolucionado el procesamiento de los polímeros hasta llegar a polímeros sintéticos tan útiles como lo son los plásticos, cauchos y fibras, que en conjunto con otros materiales de ingeniería (metales o cerámicas) mejoran las propiedades de los polímeros. Estos aditivos pueden ser, entre otros, plastificantes, los cuales reduce la rigidez o la fragilidad del material, macillas con las que se incrementa el esfuerzo y el comportamiento bajo una carga, o estabilizadores los cuales protegen al polímero de la radiación ultravioleta [1].

Además ellos cuentan con un amplio rango de propiedades a nivel industrial, algunas de las cuales son inalcanzables por otros materiales y en la mayoría de los casos son relativamente de bajo costo. Entre las propiedades importantes está: el peso liviano, el amplio rango de colores, la baja conductividad térmica y eléctrica, el poco brillo, la buena dureza, la buena resistencia a los ácidos, bases y a la humedad, etc. [2].

Las propiedades de los polímeros son requeridas principalmente para seleccionar un material el cual alcanzará el comportamiento deseado de los componentes plásticos bajo las condiciones de su aplicación. Además estas son esenciales en el diseño físico, dando la posibilidad de predecir el comportamiento bajo diferentes situaciones de tensión. De igual forma las propiedades son el requisito para el diseño y optimización de la maquinaria industrial de los polímeros. Estas características son resultado del comportamiento del polímero bajo un tipo de carga o influencias ambientales tales como el impacto, la fatiga, el comportamiento a bajas y altas temperaturas y la resistencia química [3]. Es tan sobresaliente el estudio de estos materiales que se espera su producción se doble cada año con el objetivo de obtener plásticos de mejores esfuerzos y materiales compuestos que reemplacen los metales en productos tecnológicos y equipos industriales [4].

1.2 CONCEPTOS GENERALES

Los polímeros son un tipo particular de macromolécula, que se caracteriza por tener una unidad que se repite a lo largo de la molécula. Las pequeñas moléculas que se combinan unas con otras mediante un proceso químico, llamado reacción de polimerización, para formar el polímero se denominan *monómeros*. La unión de todas estas pequeñas moléculas da lugar a una estructura de constitución repetitiva en el polímero y la unidad que se repite regularmente a lo largo de toda

la molécula, se conoce con el nombre de *unidad constitucional repetitiva (ucr)* o *unidad monomérica*. La longitud de la cadena del polímero viene determinada por el número de ucr que se repiten en la cadena. Esto se llama *grado de polimerización (X)*, y su peso molecular viene dado por el peso de la unidad constitucional repetitiva multiplicado por el grado de polimerización. En un determinado polímero, si todas las unidades estructurales son idénticas este se llama homopolímero, pero si este procede de dos o más monómeros recibe el nombre de copolímero [5].

La polimerización es el proceso en el cual las unidades monoméricas son unidas por la reacción química para formar cadenas largas. Estas cadenas largas ponen polímeros aparte de otras especies químicas y les dan sus propiedades características únicas. Las reacciones de polimerización están divididas en dos grupos conocidos como reacciones de paso (también llamadas reacciones de condensación) y de cadena (también conocidas como reacciones de adición). Las reacciones de paso requieren monómeros bifuncionales o polifuncionales, mientras las reacciones de cadena requieren la presencia de un iniciador [6].

1.3 ESTRUCTURA QUÍMICA

En los polímeros la unión entre monómeros se realiza siempre mediante enlaces covalentes, un ejemplo de esto se muestra en la figura 1.1 con un trozo de la cadena de polietileno. Los átomos de carbono que constituye la cadena principal presenta una configuración sp^3 , por tanto sus orbitales se dispondrán formando un tetraedro en torno al átomo de carbono y el ángulo de enlace de dos carbonos consecutivos será de aproximadamente 109° [7].

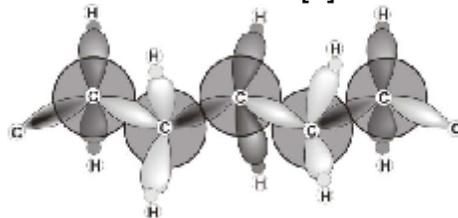


Figura 1.1 Átomos de carbono en el Polietileno, [7].

Sin embargo, las fuerzas responsables de la cohesión entre cadenas diferentes pueden ser de naturaleza muy diversa, y están fuertemente condicionadas por las características de los átomos y de los sustituyentes de la cadena principal. La polaridad y el volumen de estos átomos afectaran especialmente a las fuerzas de cohesión entre cadenas, que a su vez determinaran la flexibilidad del material, temperatura de transición vítrea, temperatura de fusión y capacidad de cristalización entre otras propiedades [7].

1.4 ESTRUCTURA FÍSICA

1.4.1 Cristalinidad

Los términos cristalino y amorfo se utilizan normalmente para indicar las regiones ordenadas y desordenadas de los polímeros, respectivamente. La figura 1.2 muestra el esquema de un sistema amorfo, uno semicristalino y otro cristalino. Con frecuencia se utiliza el término cristalino en lugar de semicristalino, aunque ningún polímero es completamente cristalino [7].

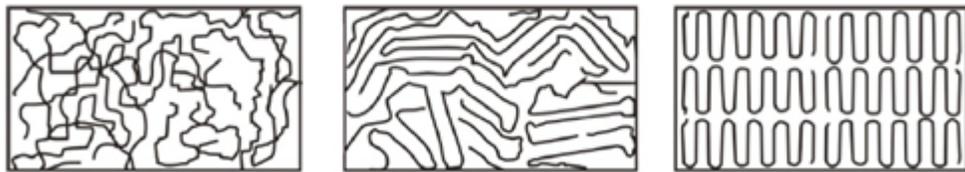


Figura 1.2 Cristalinidad en polímeros, (a) amorfo, (b) semicristalino, (c) cristalino, [7].

Los polímeros con capacidad de cristalizar son aquellos cuyas moléculas son química y geoméricamente regulares en su estructura. Las irregularidades ocasionales, tales como las ramificaciones de la cadena, o la copolimerización de una pequeña cantidad de otro monómero limitan el alcance de la cristalización, pero no evitan que ocurra. Por el contrario los polímeros no cristalinos típicos son aquellos en los que existe una clara irregularidad en la estructura: polímeros ramificados, polímeros atácticos y copolímeros con cantidades significativas de dos o más constituyentes monoméricos bastantes diferentes [7].

1.5 PROPIEDADES MECÁNICAS

1.5.1 Rigidez y Modulo de Elasticidad

El estudio de las propiedades mecánicas se refiere a la respuesta de un cuerpo cuando se le somete a una fuerza externa, la cual genera relaciones de tipo tensorial con la deformación que sufre este material (en general validas para la zona elástica). De los diferentes ensayos existentes, el más empleado es el ensayo de tracción en una dimensión, el cual entrega la mayoría de los datos relevantes para un primer estudio mecánico de materiales. Este ensayo consiste en someter al material (moldeado en una forma estandarizada llamada probeta) a una velocidad de deformación constante, y medir la fuerza necesaria para cada deformación, esto se realiza generalmente hasta que el material se fractura. Finalmente, se entrega una curva donde en el eje de las abscisas se muestra la deformación del material y en el eje de las ordenadas la tensión requerida. La

tensión o carga σ , la cual se define como la fuerza aplicada dividido por el área transversal a la deformación $A(t)$, se describe en la ecuación 1.1 [8]:

$$\sigma = \frac{F}{A(t)} \quad (1.1)$$

Se utiliza el término $A(t)$ para mostrar explícitamente la dependencia del área con la deformación que sufre el material, o lo que es lo mismo en este tipo de ensayo, con el tiempo de estiramiento. Generalmente la deformación nominal o de ingeniería está dada por la ecuación 1.2 [8]:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.2)$$

Donde l_0 se refiere al largo inicial de la muestra.

Una de las grandes dificultades que presentan los polímeros desde el punto de vista mecánico, es la gran dependencia que tienen sus propiedades con la temperatura y la velocidad de deformación, lo anterior debido a su comportamiento viscoelástico, que en primera aproximación es producto de los altos tiempos de relajación de los procesos microscópicos, debido al alto peso molecular de ellos. Para tener una idea la figura 1.3 muestra los diferentes tipos de comportamiento de materiales poliméricos que se pueden encontrar, los cuales además se pueden tener para un mismo material sólo modificando la temperatura del ensayo [9].

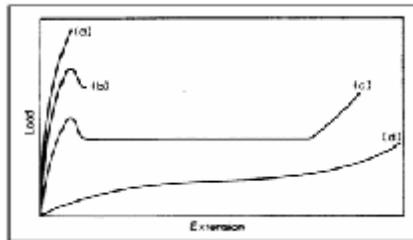


Figura 1.3 Comportamiento bajo tensión de los polímeros, [9].

Con pequeñas deformaciones se dice que el material sufre una deformación elástica (curvas a, b y c en figura 1.3), término que manifiesta un proceso reversible, o sea el material almacena energía, por lo que cuando se cesa la fuerza externa, el material en esa zona es capaz de volver a su estado (o longitud) inicial, “expulsando” la energía acumulada. En general esta zona elástica coincide con la zona lineal de la curva de tracción- deformación (ver figura 1.4), por lo que se emplea la ecuación 1.3, válida sólo para la zona elástica-lineal [9]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.3)$$

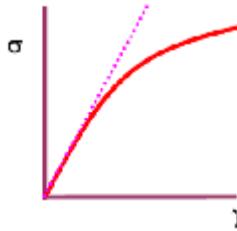


Figura 1.4 Grafica esfuerzo vs. Tensión, [9].

Donde los sub-índices indican la dirección del ensayo. La constante E se denomina Módulo de Elasticidad o de Young [9]. Un término muy utilizado en ingeniería es el de rigidez, el cual se relaciona con la “dificultad” que se tiene para deformar una muestra; es decir un material con alto Módulo de Elasticidad [9].

Observemos ahora la curva d de la Figura 1.3. Es la típica curva para un material elastomérico (comportamiento tipo caucho), es decir el material sufre altas deformaciones del tipo elásticas. Si decimos que el material sufre una deformación elástica en casi toda la curva y vemos la forma de la curva d podemos concluir que el material sufre una deformación del tipo elástico-no lineal, y si quisiésemos emplear una relación como la anterior tendríamos que definir un módulo que fuese dependiente de la deformación [9].

1.5.2 Deformación plástica

La deformación plástica se puede definir como aquel proceso donde debido a la deformación el sistema pierde energía, es decir parte de la energía que se le entrega al material para ser deformado no se recupera, por lo que el material sufre una deformación permanente. Es importante señalar que cuando se llega a esta zona de deformación plástica y al material se le cesa la fuerza externa, existirá una recuperación, que no será total, la cual está asociada a la parte elástica de la deformación. Desde el punto de vista molecular, todo lo anterior quiere decir que los átomos que han sido sometidos a esa fuerza han sido perturbados a una nueva configuración que se establece en ausencia de la tensión. Este tipo de deformación en el caso de un ensayo de tracción-deformación ocasionará un direccionamiento de las cadenas, lo que trae como consecuencia la anisotropía progresiva del material. Sin embargo en la parte líquida viscoelástica es posible que los movimientos brownianos vuelvan a relajar las cadenas, o vuelva a su estado inicial, por lo que la deformación se producirá por movimientos de las cadenas como un todo, en forma análoga a los metales [8].

El punto de transición, es decir el límite entre los procesos elásticos y los plásticos, se denomina punto de fluencia (se profundizará en el siguiente capítulo) y queda caracterizado por una tensión y deformación particular denominados de fluencia.

En la Figura 1.4 este punto está caracterizado por el máximo que aparece en esa curva antes de caer el valor de la tensión, en todo caso cuando no aparece este máximo es recurrente tomar la intersección de la recta asociada con la zona elástica y con la recta de la zona plástica. La curva d de la figura 1.3 no presenta un punto de fluencia definido pues se supone que no tiene deformación del tipo plástica [8]. Es importante señalar que materiales por debajo de la Temperatura vítrea sufrirán una fractura frágil, esto quiere decir sin mucha deformación plástica. En este caso las propiedades en tensión serán largamente determinadas por las pequeñas grietas presentes en la probeta [8].

1.5.3 Parámetros incluyentes en las propiedades de los Polímeros [10]

1.5.3.1 Temperatura

La elongación o deformación a la ruptura es muy pequeña a bajas temperaturas (por debajo de la temperatura vítrea), e incluso el material no presenta fluencia, por lo que es muy frágil. A medida que se va incrementando la temperatura, la deformación de ruptura aumenta y aparece la fluencia. Luego, la resistencia a la ruptura incrementa enormemente, aunque vuelve a descender cuando el material es blando sobre la temperatura vítrea.

1.5.3.2 Peso Molecular

Polímeros de muy bajo peso molecular son líquidos viscosos si la temperatura vítrea está por debajo de la temperatura ambiente, por lo que a medida que aumenta el peso molecular, este se va comportar como un caucho. Polímeros de muy bajo peso molecular pero que tienen la temperatura vítrea por encima de la temperatura ambiente, son extremadamente frágiles, hasta que logran alcanzar un peso molecular específico de tal manera que logran soportar mayor carga.

1.5.3.3 Cristalinidad

Los polímeros cristalinos a temperaturas por debajo de la temperatura de transición tienden a hacer polímeros frágiles, con baja resistencia. Esta fragilidad puede venir por deformación impuesta sobre la fase amorfa de parte de los cristales, o por la presencia de huecos producidos durante el proceso de cristalización, o desde la concentración de tensión producida por los mismos cristales. Un aumento en la cristalinidad implicara un aumento en el módulo y en la tensión de fluencia, pero traerá consigo una disminución en la elongación de fluencia y de la deformación de ruptura. En general, la fractura sucederá donde existan muy pocas moléculas enlazantes y una alta concentración de imperfecciones. Pese a lo anterior hay que notar que polímeros con igual Cristalinidad pero cristalizados en diferentes condiciones llevan cambios

importantes en sus propiedades mecánicas, dando probablemente cambios en la morfología.

1.5.3.4 Viscoelasticidad

Si se aplica un esfuerzo sobre un sólido elástico éste se deforma hasta que la fuerza cesa y la deformación vuelve a su valor inicial. Por otra parte, si un esfuerzo es aplicado sobre un fluido viscoso éste se deforma, pero no recupera nada de lo que se deforma. Un comportamiento intermedio es el comportamiento viscoelástico, en el que el cuerpo sobre el que se aplica el esfuerzo recupera parte de la deformación aplicada [11].

Un parámetro utilizado para caracterizar o clasificar las sustancias de acuerdo a su comportamiento elástico/viscoso/viscoelástico es el número de Deborah. Éste número define en la ecuación 1.4 [11]:

$$De = \frac{\tau}{t} \quad (1.4)$$

Donde t es un tiempo característico del proceso de deformación al que se ve sometido una determinada sustancia y τ es un tiempo de relajación característico de dicha sustancia. De acuerdo al valor del número de Débora todas las sustancias pueden ser clasificadas [12]:

- $De < 1$ Comportamiento viscoso.
- $De > 1$ Comportamiento elástico.
- $De \approx 1$ Comportamiento viscoelástico.

En cuanto a los materiales viscoelásticos, para deformaciones muy bajas, casi cerca al equilibrio existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación, encontrándose en la zona denominada como de "viscoelasticidad lineal". Para deformaciones mayores se alcanza la denominada zona de "viscoelasticidad no lineal" (ver figura 1.5) [12].

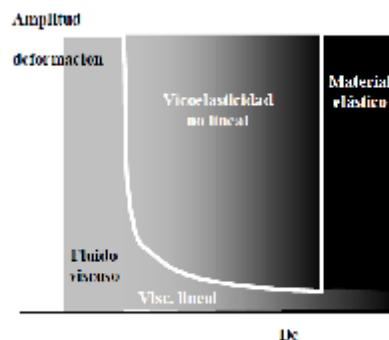


Figura 1.5 Viscoelasticidad, [12].

1.6 CLASIFICACIÓN TERMO-MECÁNICA

Los plásticos son clasificados en dos grupos según su comportamiento mecánico y térmico como termoplásticos y termoestables (polímeros termo fijos) [2].

- **Termoplásticos:** Estos materiales son normalmente fabricados por la aplicación simultánea de calor y presión. Ellos son polímeros lineales sin entrecruzamiento en la estructura donde las cadenas moleculares son unidas por enlaces dobles o intermoleculares. Los Termoplásticos comunes son: pinturas acrílicas, cloruro de polivinilo, nylon, polipropileno, poliestireno, etc. [13].
- **Termoestables:** Estos plásticos requieren un moldeo por calor y presión. El término termoestable implica que se requiere calor permanente en el plástico. La mayoría de los termoestables forman cadenas largas que son fuertemente entrecruzadas, para formar un sólido rígido con estructuras en 3D. Los termoestables son generalmente más fuertes, pero más frágiles que los termoplásticos [13].

1.7 PROCESAMIENTO DE POLÍMEROS [2]

Las materias primas para la polimerización son por lo general obtenidas de productos de carbón y de petróleo. Las siguientes son técnicas de moldeo empleadas en la fabricación de polímeros.

El moldeo por *compresión* implica colocar la cantidad apropiada del polímero con aditivos entre partes de molde “macho” y “hembra” calientes. Después de agregar el polímero, el molde está cerrado, y el calor y la presión son aplicados, haciendo el plástico viscoso para alcanzar la forma del molde. La figura 1.6 muestra un modo típico empleado para el moldeo por compresión.

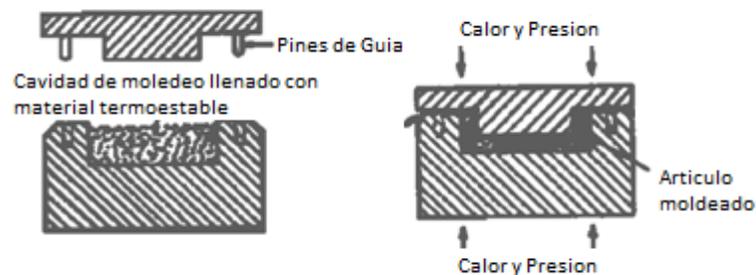


Figura 1.6 Moldeo por compresión, [2].

El moldeo por *transferencia* se diferencia de la compresión, en como los materiales son introducidos en las cavidades de molde. En la transferencia se moldea la resina plástica en una cámara fuera de las cavidades de molde. Cuando este se cierra, un émbolo presiona la resina plástica en las cavidades de molde.

En el moldeo por *inyección*, los materiales se introducen mediante un vibrador cilíndrico donde es empujado hacia la cámara caliente para que el material plástico se derrita, y luego el plástico fundido es obligado por el inyector a entrar en la cavidad de molde donde el producto alcanza su forma. La característica más excepcional de este proceso es el tiempo de ciclo que es muy corto. La *Extrusión* es otra clase de moldeo por inyección, en el cual el material termoplástico es forzado a pasar a través de un orificio, similar a la extrusión de los metales. La técnica es especializada en producir longitudes continuas con sección transversal constante.

REFERENCIAS

- [1] Prof. Shakhshiri www.scifun.org General Chemistry, Chemical of the Week. Polymers.
- [2] S. V. Kailas, Material Science, Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore – 560012 India Chapter 11. Applications and Processing of Polymers.
- [3] A. W. Birley, B. Haworth, T. Bachelor, Physics of Plastics, Hanser, Munich 1991.
- [4] R. J. Young; P. A. Lovell, Introduction to Polymers, 2nd ed. (New York: Chapman & Hall, 1991).
- [5] Universidad de Los Andes Facultad de Ciencias Departamento de Química.
- [6] L.H. Sperling, Introduction to Physical Polymer Science, ISBN 0-471-70606-X Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc.
- [7] A. E. Woodward, Understanding Polymer Morphology, Hanser Publishers, Munich, 1995.
- [8] L. Nielsen, R. Landel, “Mechanical Properties of Polymers and Composites”, Marcel Dekker Inc., 1994, New York.
- [9] I.M. Ward, D.W. Hadley, John Wiley & Sons Ltda., “An Introduction to The Mechanical Properties of Solid Polymers”, 1993, England.
- [10] W. D. Jr. Callister, Materials Science and Engineering: An introduction Fifth edition, Wiley, 2000.
- [11] H.A. Barnes; J.E Hutton; F. R. Walters; An introduction to rheology, Ed. Elsevier 1989.
- [12] Materials Science and Engineering Introduction to polymers, The University of Edinburgh, Division of Engineering, Session 2001-2002.
- [13] G. Wegner, FUNCTIONAL POLYMERS, Max Planck Institute for Polymer Research, Mainz, P.O. Box 31 48, D-55021 Mainz, Germany, (Received 1 June 1999; accepted 15 July 1999).

CAPÍTULO 2: PRUEBAS DE IMPACTO

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y DESARROLLO DE LAS PRUEBAS DE IMPACTO

2.1.1 Introducción

Históricamente, el equipo para el método de ensayo de péndulo por impacto fue propuesto por S. B. Russell en 1898 y posteriormente fue desarrollado en 1901 por G. Charpy, quien presentó su esencial idea en Francia, por medio de la revista de la Sociedad de Ingenieros Civiles de Francia y en las Reuniones del Congreso de la Asociación Internacional para pruebas de materiales, las cuales tuvieron lugar en Budapest durante Septiembre de 1901. El procedimiento para la prueba de impacto parece haber llegado a conocerse como la prueba Charpy en la primera mitad de la década de 1900, a través de la combinación de las contribuciones técnicas que éste personaje aportó y de su liderazgo en el desarrollo de los procedimientos, los cuales con el paso del tiempo se convirtieron en una herramienta robusta, de la ciencia de la ingeniería. El desarrollo temprano de los ensayos de impacto a materiales fue impulsado por la rápida expansión de la red ferroviaria entre aproximadamente 1830 y 1900 [1].

El desarrollo de todos los aspectos de la ciencia de la ingeniería durante este tiempo fue motivado y promovido por la rápida expansión de la red ferroviaria mundial, a través de la enorme demanda de los rieles, locomotoras, vagones, túneles, puentes, presas, estaciones de ferrocarril y otras estructuras mecánicas de ingeniería. La caracterización del comportamiento frágil y dúctil de los materiales, así como la explicación del comportamiento de transición dúctil-frágil de los metales, fue impulsado por el gran número de fracasos de los rieles y ejes, durante el siglo XIX en la mayoría de países industrializados. La mayor parte de estos fallos fueron la causa de cientos de accidentes catastróficos sin previo aviso, ya que, las fracturas no fueron precedidas por una apreciable deformación plástica que sirviera como una advertencia de fractura inicial. Una variedad de configuraciones de muesca se añadieron a las muestras para evaluar cómo su rendimiento era degradado por tales daños. Los primeros estudios a cerca de este tema enfatizaron en la limitación y control de estos fallos inesperados [1].

2.1.2 Evolución en las Pruebas de Materiales

A causa de la situación presentada en las vías ferroviarias se fundó la Asociación Internacional de Ensayos de Materiales (por sus siglas en inglés, IATM) en Zurich, Alemania, Considerada la primera conferencia internacional sobre ensayos a materiales. En 1905, Charpy propuso un diseño de máquina

similar a los diseños presentados y a la documentación de las primeras referencias a cerca de "el método Charpy". Las discusiones se centraron alrededor de la importancia de la geometría de la entalla (profundidad y radio), velocidad de impacto, tamaño de la muestra, y las posibilidades de la aplicación práctica de la prueba de impacto [1]. Los diseñadores y fabricantes de máquinas de impacto ofrecieron tres tipos posibles para realizar la prueba de impacto, el primero conocido como Caída de Peso (Fremont, Hart-Turner, y Olsen), el segundo como Péndulo de Impacto (de Charpy, Izod, y Russell), y por último Flywheel (Guillery). El capítulo nacional de IATM en los EE.UU. se convirtió en el núcleo de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). Estas organizaciones trabajaron en paralelo para estandarizar el procedimiento de lo que hoy en día conocemos como ensayo de impacto Charpy [1].

La primera máquina comercial del mundo instrumentado para pruebas de impacto, se denominó, PSWO, fabricado por Werkstoffprüfmaschinen, Alemania, y cuya imagen es ilustrada en la figura 2.1, la carga de impacto se medía mediante un sensor piezoeléctrico unido al martillo del péndulo [1].

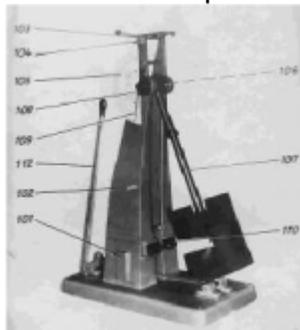


Figura 2.1 Primer péndulo de impacto comercial, PSWO, fabricado por Werkstoffprüfmaschinen, [2].

2.2 INTRODUCCIÓN

El fracaso de la ingeniería de materiales es casi siempre un acontecimiento indeseable por varias razones, las cuales en algunos casos incluye las vidas humanas que se ponen en peligro, pérdidas económicas, y la interferencia con la disponibilidad de productos y servicios. A pesar de que las causas del fracaso y el comportamiento de los materiales pueden ser conocidos, la prevención de los fracasos es difícil de garantizar. Las causas más frecuentes son la selección, diseño y elaboración de materiales inadecuados [3].

2.3 TENACIDAD A LA FRACTURA

La mecánica de fractura estudia los componentes y causas de propagación de grietas u otros defectos en sólidos, además materiales con discontinuidades,

sometidos a cierta tensión externa, con una extensa distribución de tensiones y deformaciones presentes en él. Lo que se desea saber es el esfuerzo máximo que puede soportar un material, si contiene defectos de un cierto tamaño y geometría. La tenacidad a la fractura mide la capacidad de un material a resistir una carga aplicada que contiene un defecto. A diferencia de los resultados del ensayo de impacto, la tenacidad a la fractura es una propiedad cuantitativa del material [4].

Un ensayo típico de la tenacidad a la fractura se realiza aplicando un esfuerzo de tensión a una probeta para la cual es conocido el tamaño y la geometría del defecto, actuando como un concentrador de esfuerzos. Para un ensayo simple, el *factor de intensidad de esfuerzos* K , de acuerdo a la ecuación 2.1 es [4]:

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.1)$$

Donde f es un factor geométrico relacionado a la probeta y al defecto, σ es el esfuerzo aplicado, y a es el tamaño del defecto (según la figura 2.2) [4].

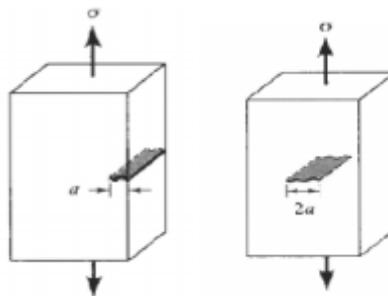


Figura 2.2 Dibujo esquemático de probetas con defectos en el borde e internos para medir la tenacidad a la fractura, [4].

Al efectuar una prueba sobre una porción del material con un defecto de tamaño conocido, se puede determinar el valor de K que hace que dicho defecto crezca y cause la falla. Este factor de intensidad de esfuerzo crítico se define como *la tenacidad a la fractura* K_c [4].

$$K_c = K \text{ (requisito para que una grieta se propague).}$$

La tenacidad a la fractura depende del espesor de la probeta: conforme se incrementa el espesor, la tenacidad a la fractura K_c disminuye hasta un valor constante (figura 2.3). Esta constante se conoce como *la tenacidad a la fractura de deformación plana* K_{IC} . Generalmente K_{IC} se reporta como propiedad de un material [4].

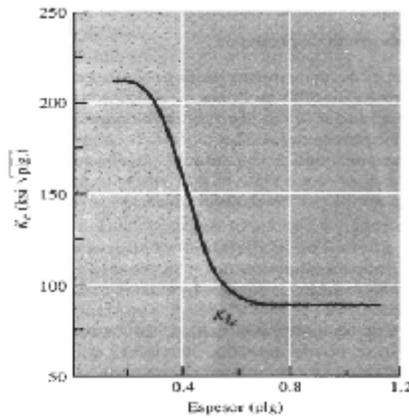


Figura 2.3 La tenacidad a la fractura K_c de un acero con esfuerzo de cedencia de 300.0000 psi se reduce al incrementar el espesor, hasta alcanzar el valor de la tenacidad a la fractura en deformación plana K_{IC} , [4].

La mecánica de la fractura permite diseñar y seleccionar materiales y al mismo tiempo tomar en consideración la inevitable presencia de defectos. Se deben considerar tres variables: la propiedad del material (K_c o K_{IC}), el esfuerzo σ que debe resistir el material y el tamaño del defecto a . si se conocen dos de estas variables, se puede determinar la tercera [4]. De igual manera se cuenta con un parámetro el cual tiene ver con la energía disponible para el avance de grieta por unidad de área, en otras palabras la *velocidad de energía liberada*, dado por la letra, G [5]. Un nuevo parámetro es introducido en este estudio y corresponde a la energía necesaria para el agrietamiento y se denomina *tasa crítica de liberación de energía o energía de agrietamiento*, G_{IC} . Los parámetros de K y G dan la posibilidad de medirse en caso de choque de carga para estimar sus valores dinámicos, mediante el uso de diferentes técnicas experimentales. Tales pruebas incluyen el *ensayo de impacto*, técnica realizada por medio del péndulo de impacto, la cual se utiliza a menudo para evaluar la fragilidad de diversos materiales o su tenacidad a la fractura, es decir la energía absorbida por cada material al ser impactado por una determinada carga y a su vez proporcionar información a cerca de la resistencia al impacto en cada uno de estos materiales, es por ende la importancia alrededor de este estudio [6]. El análisis a cerca de la aprobación en cuanto a si un material se ajusta o no a los parámetros G_{IC} y K_{IC} , nos permite establecer que tan independiente es o no lo es, un determinado material de su tamaño [7].

2.4 FRACTURA DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS

Las resistencias a la fractura de los materiales poliméricos son bajas en relación a las de los metales y cerámicas. El proceso de fractura es la formación de grietas en las regiones donde existe una concentración de

tensiones localizadas (es decir, rasguños, muescas y defectos afilados). Los enlaces covalentes en la red o estructura reticulada se cortan durante la fractura. Para los polímeros termoplásticos, ambos modos dúctiles y frágiles son posibles, y muchos de estos materiales son capaces de experimentar una transición dúctil a frágil. Los factores que favorecen la rotura frágil son una reducción de la temperatura, un aumento de la velocidad de deformación, la presencia de una muesca aguda, aumento del espesor de la muestra, y, además, una modificación de la estructura del polímero (químico, molecular y/o microestructural [3]).

Para los materiales de ingeniería, dos modos de fractura son posibles: *dúctil y frágil*. La clasificación está basada en la capacidad de un material de experimentar deformación plástica, aquellos materiales dúctiles exhiben este tipo de deformación con elevada absorción de energía antes de la fractura. Por otro lado, para la parte de fractura frágil, las grietas pueden propagarse con gran rapidez, y muy poco acompañamiento de deformación plástica. Tales grietas puede decirse que son inestables, y su propagación, una vez iniciada, seguirá espontáneamente. La mayoría de las aleaciones de metales son dúctiles, mientras que las cerámicas son especialmente frágiles, y los polímeros pueden exhibir ambos tipos de fractura [3].

2.4.1 FRACTURA FRÁGIL

La energía superficial requerida para la rotura de un material polimérico como el poliestireno o el polimetacrílico de metilo (PMMA) es de unas 1.000 veces mayor que la que se requeriría si la rotura fuera simplemente debido a la rotura de los enlaces carbono-carbono en un plano de rotura. Por tanto materiales poliméricos vítreos como el PMMA son mucho más duros que los vidrios inorgánicos. Una fisura en un termoplástico vítreo se forma en una región altamente tensionada del material y consiste en un alineamiento de las cadenas moleculares combinado con una alta densidad de intersticios dispersos. En el momento en el que la tensión es lo suficientemente intensa se forma una grieta a lo largo de la fisura (figura 2.4). El trabajo realizado en el alineamiento de las moléculas del polímero en la grieta es la causa de la relativamente alta cantidad de trabajo requerido para la rotura de los materiales poliméricos vítreos [4].

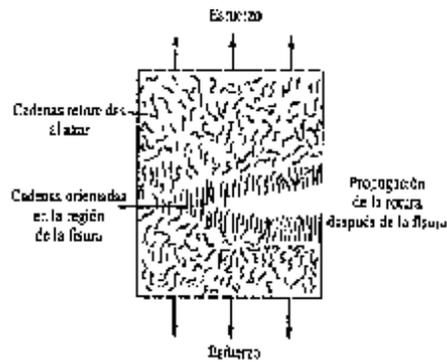


Figura 2.4 Esquema de la estructura próxima a la rotura (grieta) en un termoplástico vítreo, [4].

2.4.2 FRACTURA DÚCTIL

Los termoplásticos por encima de sus temperaturas de transición vítrea pueden presentar deformación permanente antes de la rotura. Durante la deformación plástica, las cadenas moleculares lineales se desenrollan, deslizan unas sobre otras y gradualmente se juntan alineándose en la dirección de la tensión aplicada. Cuando la tensión sobre las cadenas es demasiado alta, los enlaces covalentes de las cadenas principales se rompen y tiene lugar la rotura del material [4].

Existen tres modos diferentes en lo que se ve una fisura sometida a tensión dentro de un sólido, como se esquematiza en la figura 2.5 [7]:

- Modo I: o modo de apertura, el desplazamiento de las caras de la fisura es normal al plano de la misma, es decir se produce una apertura de la grieta.
- Modo II: el desplazamiento de las caras de la fisura se produce en el plano de la misma y perpendicularmente a su frente.
- Modo III: el desplazamiento relativo de las caras de la grieta se produce en la dirección del frente de la grieta. Este modo de rotura se conoce como *rasgado del material*.

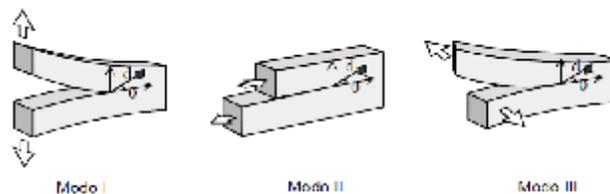


Figura 2.5 Modos de fisura en un sólido expuesto a tensión, [5].

2.5 TENSIÓN DE FRACTURA DE GRIFFITH

Una grieta logra hacerse inestable y provoca la fractura, al presentarse una variación de la energía tensional que se deriva de un aumento de la grieta y producto de esta variación se obtiene una energía superficial mayor en el material. Griffith propuso un prototipo aplicado a materiales demasiado frágiles como el vidrio o los cerámicos, sin lograr resultado alguno en los metales. Según la figura 2.3, al tener una grieta que ha crecido en un sólido a una profundidad a , una región del material adyacente a la superficie libre es “desorganizada”, dejándose en libertad su energía de deformación. Griffith calculó tal energía [8].

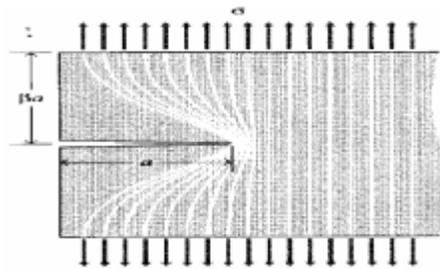


Figura 2.6 Región de deformación cercano a una grieta, [8].

En la figura 2.6, se esquematiza una forma sencilla de liberación de energía, se consideran dos regiones triangulares cerca al costado de la grieta de ancho a y altura βa , como se “desordenan” completamente, mientras el resto del material sigue sintiendo la tensión σ completa. Para la cual se inicia la prolongación de la grieta y se conoce como tensión de fractura de Griffith, mostrada en la ecuación 2.2 [8]:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (2.2)$$

El análisis teórico del análisis de fractura en los polímeros da una referencia para el estudio del comportamiento físico cuando estos son sometidos a un impacto, es decir, la determinación de las tensiones y esfuerzos provocados para el inicio y propagación de una grieta, permite inferir a cerca de la energía externa necesaria para la fractura completa de una probeta y proponer las causas de pérdida de energía dadas por los defectos de la misma.

2.6 PRUEBAS DE IMPACTO EN MATERIALES

2.6.1 Introducción

Los ensayos dinámicos son realizados para valorar la capacidad de resistencia a las cargas de impacto (tenacidad) de los materiales por lo general, polímeros o metales y de este modo establecer su disposición a la ruptura frágil [2]. Cuando se tiene un material que va a ser dispuesto a un golpe fuerte e inesperado, con una velocidad de deformación demasiada rápida, es posible estudiarlo en una forma más frágil que la que se observa en otro tipo de pruebas como es el caso de ensayos por tensión. Para el caso en estudio, el ensayo de impacto consta en liberar un péndulo pesado, quien a su paso choca con una probeta cuya forma es de paralelepípedo, ubicada en unos soportes en la base de la máquina [9]. El ángulo, desde el cual cae el péndulo debe estar relacionado con la velocidad de caída del mismo en el momento del golpe y en el punto de la nariz de golpeo, como estipula la norma ASTM D256 (“Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics”) [10].

Durante la fase de impacto, el sistema se representa como una unión entre el martillo y la estructura. Al final del impacto, el martillo pierde el contacto con la estructura, que ahora vibra libremente de acuerdo con sus frecuencias de resonancia naturales. Debido a la amortiguación interna, la vibración del martillo excitado logra atenuarse rápidamente. El desarrollo temporal y la decadencia de la vibración libre dependen de las características físicas de la geometría del sistema [11]. Después de golpear la probeta, el péndulo continúa su camino alcanzando cierta altura que depende de la cantidad de energía absorbida por la probeta durante el impacto. Las probetas que fallan en forma frágil se rompen en dos mitades, en cambio aquellas con mayor ductilidad (baja fragilidad) se doblan sin romperse. Este comportamiento es muy dependiente de la temperatura y la composición química, lo cual obliga a realizar el ensayo con probetas a distinta temperatura, para evaluar y encontrar la “temperatura de transición dúctil-frágil” [9]. Generalmente se pueden aplicar varios métodos de ensayo por impacto entre los cuales están [12]:

- Charpy (ASTM D 6110, “Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics”)
- Izod (ASTM D 256, “Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics”)
- Ensayo tracción por impacto (ASTM D 1822, “Standard Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials”)

La mecánica del impacto además de abarcar los esfuerzos inducidos, toma en cuenta la transferencia, absorción y la disipación de energía. La energía de un golpe puede absorberse de la siguiente manera [13]:

- a) A través de la fricción de las partes.
- b) A través de la deformación plástica de los miembros o partes del sistema.
- c) A través de los efectos de inercia de las partes en movimiento.

2.6.2 Temperatura de transición de dúctil a frágil

Es la temperatura a la cual un material cambia de un comportamiento dúctil a un comportamiento frágil. Esta temperatura puede definirse como la energía promedio entre las regiones dúctil y frágil, a una energía absorbida específica, o al tener ciertas características en la fractura. No todos los materiales tienen una temperatura de transición bien definida [4].

El comportamiento de transición de Frágil a dúctil, es un resultado de la dependencia entre la temperatura y la resistencia del plástico, los resultados de una serie de pruebas de impacto efectuadas a un polímero a distintas temperaturas aparece en la figura 2.7, un aumento de la temperatura conducirá a un aumento de la movilidad de la cadena, debido a la agitación térmica de las moléculas, lo que resulta en una reducción en la resistencia del material plástico [14]. Un material que se somete a un golpe de impacto debe tener una temperatura de transición menor que la de su entorno. De esta manera, la temperatura de transición de dúctil a frágil, representa la temperatura debajo de la cual un material se comporta de forma frágil en un ensayo de impacto y se relaciona estrechamente con la temperatura de transición vítrea en los polímeros y, para fines prácticos, se maneja de la misma manera. Esta temperatura sirve además como referencia en la selección de materiales, debido a que asegura que la temperatura más baja a la que el material estará expuesto esté muy por encima de la temperatura de transición de dúctil a frágil [9].

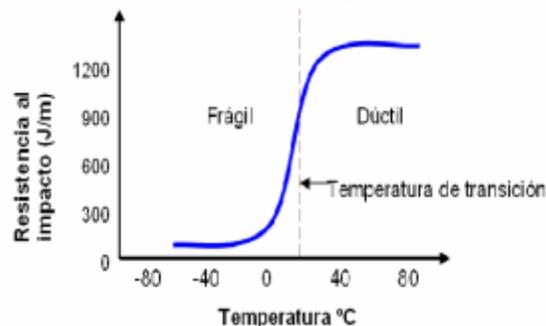


Figura 2.7 Resultado de una serie de ensayos de impacto Izod para un polímero termoplástico de Nylon súper tenaz [9].

La temperatura de transición es característica para el material, pero esto depende fuertemente de las condiciones en las que se realicen las pruebas. Durante aproximadamente un siglo, la prueba de impacto de Charpy se ha usado como un criterio de aceptación para determinar la temperatura de transición de diferentes materiales [15].

2.6.3 Relación con el diagrama esfuerzo deformación

El diseño de elementos estructurales implica determinar la resistencia y rigidez del material estructural, estas propiedades se pueden relacionar si se evalúa una barra sometida a una fuerza axial para la cual se registra simultáneamente la fuerza aplicada y el alargamiento producido. El diagrama esfuerzo deformación es similar si se trata del mismo material y de manera general permite agrupar los materiales dentro de dos categorías con propiedades afines que se denominan materiales dúctiles y materiales frágiles. Los diagramas de materiales dúctiles se caracterizan por ser capaces de resistir grandes deformaciones antes de la rotura, mientras que los frágiles presentan un alargamiento bajo, cuando llegan al punto de rotura [9]. La diferencia entre la curva carga-deformación y una curva esfuerzo-deformación es que en la primera se usa directamente para graficar la carga aplicada por la maquina en Kilogramos (kg). Y en la segunda, el esfuerzo que se obtiene considerando el área de la muestra probada y se grafican los datos kg/cm^2 . Observando en la figura 2.8, El Punto E, representa el Limite Elástico, el punto F, determina el Punto de Fluencia ó Cedencia, el punto G, es la Carga máxima, y por último el punto H, el Punto de Ruptura [13].

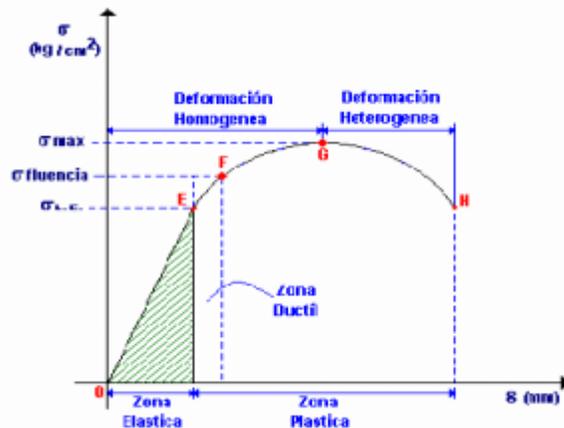


Figura 2.8 Curva Esfuerzo -Deformación Nominal ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{-mm}$), [13].

De donde [13]:

Sección “OE”: o zona elástica, esta sección indica el alargamiento proporcional a la carga aplicada. Recuperando la pieza entre estos límites, su tamaño y forma original al retirarse la carga.

Sección “EF”: o zona dúctil, muestra un alargamiento grande en comparación a la carga aplicada. En el punto de fluencia o cedencia (punto F) las cargas adicionales causaran deformaciones mayores hasta alcanzar la carga máxima, G, o esfuerzo máximo.

Sección “FG”: o zona plástica, al rebasar el punto G se presentara la estricción o también llamado, cuello de botella. La probeta sufre mayor deformación aunque en contraste al no encontrar resistencia alguna, la carga decrece automáticamente, la deformación es heterogénea hasta llegar a la ruptura H.

2.6.4 Prueba de Impacto Charpy

2.6.4.1 Introducción

La muestra se coloca horizontalmente en un patrón especial que garantiza estrictamente la posición de la ranura en la parte media entre los apoyos. El martillo golpea en dirección opuesta a la muesca. Luego se fija el péndulo en la parte superior inicial a la altura h_1 , como se indica en la figura 2.9, en seguida se procede a retirar el seguro, que fija el péndulo en la parte inicial y se deja caer libremente, impactando en su camino la muestra que de inmediato será fracturada, elevándose el péndulo en un ángulo β , en relación al eje horizontal. Por medio de los ángulos de salida y llegada se establece cuanta energía absorbe la probeta tras la ruptura [9].

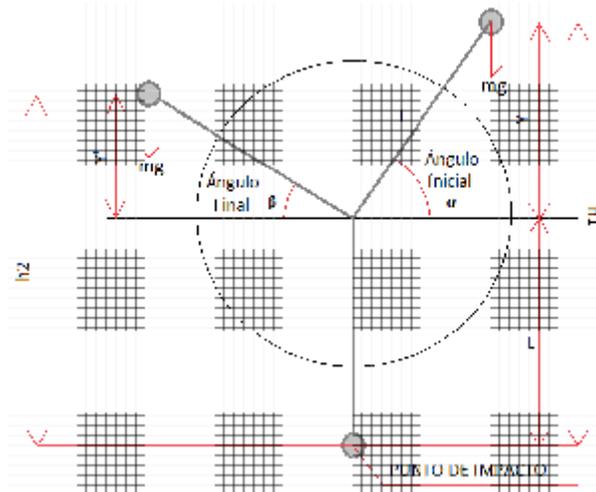


Figura 2.9 Variables físicas péndulo de impacto, [2].

Donde,

α : Ángulo de elevación inicial del péndulo desde el eje vertical.

β : Ángulo de elevación final del péndulo después del impacto.

h_1 : Altura de elevación inicial del péndulo.
 h_2 : Altura de elevación final del péndulo.



Figura 2.10 (a) Impacto en el borde con probeta entallada, (b) Impacto plano con probeta sin entalla, [16].

Las entallas propagan la fractura longitudinalmente a través de la interfaz, es en ese momento cuando sucede la ruptura [17]. Y los ensayos es posible realizarlos mediante probetas con o sin entalla, como se observa en la figura 2.10.

2.6.4.2 Dimensiones de muestra y entalla

El estándar ASTM recomienda los siguientes tipos de probetas, como se ilustra en la figura 2.11 [10]:

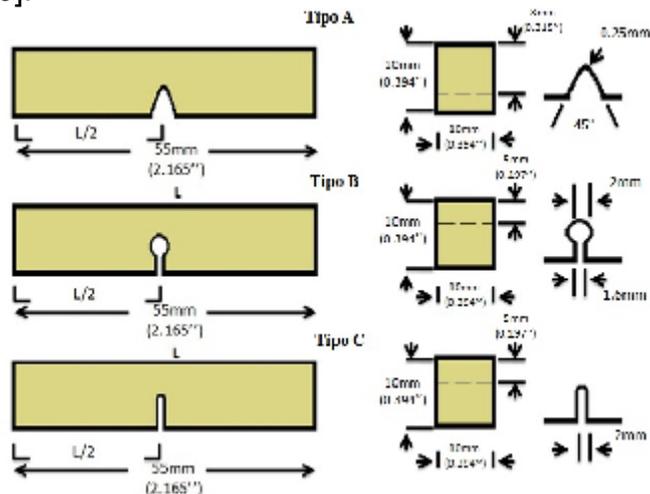


Figura 2.11 Tipos de entallas para realizar ensayo de impacto Charpy, [10].

Se deben realizar las mediciones cuidadosamente para cada probeta a impactar con instrumentos de medición convencionales para concluir de una manera no errónea, qué tipos de probeta se usaran en el ensayo. La ranura tiene como objetivo romper la probeta de un solo impacto, además garantizar el rompimiento de la misma por una sección controlada. Teniendo en cuenta que alrededor de la incisión de la muesca o ranura, es donde se considera es absorbida prácticamente toda la energía del impacto [2]. Pero cuando se realicen ensayos de impacto con aceros de alto y mediano contenido de carbono se pueden emplear probetas sin

ranura debido a que se rompen con facilidad al recibir el golpe debido a su fragilidad [13]. De acuerdo con la norma ASTM D6110 (“Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics”), la prueba es realizada en probetas con entalla. Para las probetas reforzadas con fibra el impacto se hace normal o paralelo a la orientación de las fibras, las probetas de tipo 2 y 3 son usadas para estos materiales [16].

Tabla 2.1 Tipos de probeta Charpy, [22].

Tipo	Longitud(mm) ±0,12 mm	Ancho (mm) ±0,12 mm	Grosor(mm) ±0,12 mm
1	80	10	4
2	25	10	3
3	11 ó 13	10	3

Tabla 2.2 Tipos de entalla Charpy, [22].

Tipo	Radio de la base de la entalla (mm) ±0,05 mm
A	0,25
B	1,00
C	0,10

2.6.5 Prueba de Impacto Izod

2.6.5.1 Introducción

Este tipo de prueba de impacto se utiliza frecuentemente para medir la resistencia al impacto de los plásticos. Las muestras de ensayo son algo similares a las de Impacto Charpy con probetas de ranura en forma de V (figura 2.12), aunque en Izod, la probeta está sujeta en una posición vertical, y el péndulo golpea la muestra fijada cerca del extremo libre. De acuerdo con la norma ASTM D256 (“Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics”), el espécimen de plástico tiene unas dimensiones como longitud del espécimen y profundidad de la muesca estándar, aunque con anchuras de muestras diferentes, que van desde una anchura igual a la profundidad espécimen a una anchura de aproximadamente un cuarto de esa valor [18].



Figura 2.12 Entalla Izod tipo V, [19].

2.6.5.2 Dimensiones de muestra y entalla

Según los estándares establecidos para realizar la prueba Izod en una probeta esta debe tener dimensiones de entalla como se muestra en la tabla 2.3, [19].

Tabla 2.3 Tipos de entalla Izod, [22].

Tipo	Radio de la base de la entalla (mm) $\pm 0,05\text{mm}$
A	0.25
B	1.00

2.6.5.3 Pruebas de impacto Izod

Existen 3 formas de realizar esta prueba, como se observa en las figuras 2.13, 2.14 y 2.15 [19]:

- **Prueba de impacto de fuerza:** En este tipo de ensayo se coloca una muestra de forma vertical con la entalla hacia el lado donde recibirá el impacto.

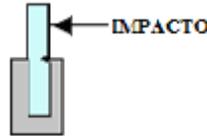


Figura 2.13 Prueba de impacto de fuerza, [19].

- **Prueba de impacto invertido de fuerza:** Esta prueba es similar a la anterior, con la diferencia que el impacto ocurre del lado opuesto de la entalla

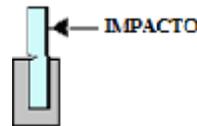


Figura 2.14 Prueba de impacto de fuerza invertida, [19].

- **Prueba de impacto de fuerza sin entalla:** Esta prueba se realiza de la misma forma que las anteriores, la diferencia radica en que la muestra carece de entalla.



Figura 2.15 Prueba de impacto de fuerza sin entalla, [19].

2.6.6 Tracción por Impacto

Mediante el uso de esta prueba es posible determinar la cantidad de energía por unidad de área requerida para romper una muestra por medio de un impacto extensible. Esta prueba se utiliza para materiales que son demasiado flexibles o demasiado finos [12]. Según la norma ASTM D1822 (“Standard Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials”), la muestra se localiza en un yunque extensible, el péndulo impacta este conjunto de yunques de modo que la carga de impacto es llevada por la muestra, como se observa en la figura 2.16 [20].

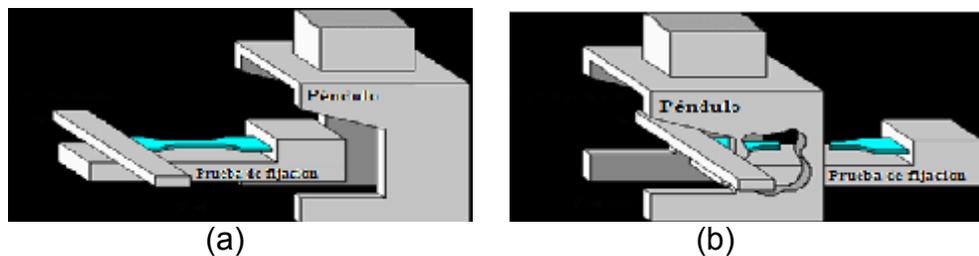


Figura 2.16 (a) Antes del impacto y (b) Después del impacto, [20].

Se utilizan dos tipos de probeta, tipo S (corto) y tipo L (largo). Según la figura 2.17, las muestras tipo S exhiben poca extensión y tienden a producir fracturas frágiles. Los resultados del modelo tipo S suelen ser más reproducibles, pero ofrecen menos diferenciación entre materiales. Mientras que las muestras tipo L exhiben mayor extensión [20].



Figura 2.17 Probetas de Tracción de impacto según norma ASTM D6110, [20].

El impacto por tracción, según la norma ISO 8256, se realiza utilizando los métodos que se describen a continuación, como lo indica la tabla 2.4 [21]:

Tabla 2.4 Métodos para el ensayo tracción por impacto, [23].

Tipo	Descripción
A	La probeta y la cruceta en un marco inmóvil, luego el péndulo golpea la cruceta causando la fractura de la probeta.
B	La probeta y la cruceta en el péndulo, la cruceta golpea un yunque inmóvil que causa la falla del material.

2.6.7 Tipo de fallos presentes tras una prueba de impacto

Según la norma ASTM E23 “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”, de estandarización de materiales se debe hacer un reporte del tipo de fractura como se indica en la tabla 2.6, que se obtiene tras ser impactada la probeta tanto para la prueba de impacto Charpy e Izod [10].

Tabla 2.6 Tipos de fracturas o fallos en las muestras después del impacto, [10].

Tipo de fallo	Definición
C	Rotura completa, muestra se separa en dos piezas o más
H	Rotura incompleta, cuando una parte de la probeta impactada está en posición vertical y la otra parte no puede estar por encima de la horizontal (menos de 90 ° ángulo incluido).
P	Rotura parcial, cuando ha fracturado al menos el 90 % de la distancia entre el vértice de la muesca y el lado opuesto.
NB	No rotura, donde la fractura amplía menos del 90 % de la distancia entre el vértice de la muesca y el lado de enfrente.

REFERENCIAS

- [1] L. Trth.; H. P. Rossmann; T. A. Siewert, Historical Background and Development of The Charpy Test, Elsevier Science Ltd. And ESIS, Hungary, 2002.
- [2] G. Calle Trujillo, Ensayo dinámico a Flexión de probetas Ranuradas Ensayo CHARPY, UTP Laboratorio de Resistencia de Materiales, Pereira Colombia.
- [3] W. D. Callister, Jr., Fundamentals of Materials Science and Engineering, The University of Utah, Department of Metallurgical Engineering, Salt Lake City, Utah, 2001.
- [4] W. F. Smith, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, University of Central Florida, 1998.
- [5] F. J. Rojo, Aplicación de la Mecánica de la Fractura a la Rotura Frágil de Fibras de Sémola, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2003.
- [6] K. Arakawa; T. Mada; M. Todo; J. Takahashi; S. Ooka, Impact tensile fracture testing of a brittle polymer, Research Institute for Applied Mechanics, Japan, 2006.
- [7] F. Cornement, Comportamiento Térmico y Mecánico de Mezclas de PC/PET con Altos Contenidos de PC, España, 2005.
- [8] D. Roylance, Introduction to Fracture Mechanics, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001.
- [9] J. Garavito, Máquina de Impacto Protocolo, Facultad Ingeniería Industrial, Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008.
- [10] ASTM Standard, Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, 2008.
- [11] J. Jó Da Silva; A. M. Nogueira; F. H. Neff; J. S. Da Rocha; Hammer Impact Test Applied For Fouling Detection In Pipelines, Universidade Federal de Campina Grande, Brazil, 2010.
- [12] Zwick/ Roell Group, Ensayo de Impacto, Alemania, (2009).
<http://www.zwick.es/es/aplicaciones/plasticos/termoplasticos-compuestos-de-moldeo/ensayo-de-impacto.html>
- [13] F. Vergara Camacho; N. J. Martinez Cervantes, Apuntes de Ciencias de Materiales II, Instituto Politécnico Nacional, Azcapotzalco, 2008.
- [14] D. Eiras; L. A. Pessan, Mechanical Properties of Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites, Universidade Federal de São Carlos, Brazil, 2009.
- [15] W. Schmitt; I. Varfolomeyev, W. Bohme, Modelling of the Charpy Test as a Basis for Toughness Evaluation, Fraunhofer-Institut for Werkstoffmechanik, Freiburg, Germany, 2002.
- [16] IDES, The Plastics Web, Charpy Impact Strength - ISO 179, (1986-2011).
http://www.ides.com/property_descriptions/ISO179.asp
- [17] A. Da Silva Ferreira; F. P. Duarte Lopes; S. N. Monteiro; K. Gundappa Satyanarayana, Charpy Impact Resistance of Alkali Treated Curaua Reinforced

Polyester Composites, State University of the Northern Rio de Janeiro, UENF, Brazil, 2010.

[18] V. Tvergaard; A. Needleman, An analysis of thickness effects in the Izod test, The Technical University of Denmark, Denmark, 2008.

[19] IDES, The Plastics Web ,Izod Impact Strength - ISO 180, (1986-2011).
http://www.ides.com/property_descriptions/ISO180.asp

[20] IDES, The Plastics Web, Tensile Impact - ASTM D1822, (1986-2011).
http://www.ides.com/property_descriptions/ASTMD1822.asp

[21] IDES, The Plastics Web, Tensile Impact - ISO 8256, (1986-2001).
http://www.ides.com/property_descriptions/ISO8256.asp

[22] ASTM D 6110 “Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics”

[23] ASTM D 1822 “Standard Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials”

CAPÍTULO 3: PÉNDULO DE IMPACTO ZWICK 5102

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MÁQUINA

El péndulo de impacto de origen alemán Zwick 5102 de la figura 3.1, es un equipo de alrededor de 7 años de fabricación, inicialmente su funcionamiento fue basado en procedimientos análogos (versión original Zwick 5102.202) para realizar los ensayos de impacto Charpy, Izod y Tracción por impacto, bajo las normas establecidas en el capítulo dos. Actualmente la máquina ha sido transformada en búsqueda de la eliminación de errores en los resultados de los ensayos, debido a procedimientos manuales, es decir, esta transformación ha sido orientada a una automatización completa, de tal forma que se ha complementado con la tecnología de la época. La máquina consta de dos paraleles paralelos, totalmente perpendiculares a su base fijada en el suelo, estos paraleles soportan un eje, el cual sostiene al péndulo, que en su parte inferior tiene el martillo, el cual se puede cambiar según el ensayo a realizar. En la base se encuentra una prensa o soporte de la probeta intercambiable [1].

La máquina cumple con la norma DIN 51222 (similar a la norma ASTM E-23 para péndulos de impacto, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials"), en conjunto con el armazón sólido se encuentra un dispositivo de liberación del péndulo. Un ejemplar de esta se observa en la figura 3.1 [1].



Figura 3.1 Péndulo de impacto Zwick 5102, [2].

3.2 PARTES PRINCIPALES DE LA MÁQUINA

3.2.1 Estructura

La estructura o el soporte de la máquina consisten en dos canales de acero que están paralelos entre sí, perpendiculares a la base. Para anclar la estructura a la superficie se utilizan cuatro tornillos en cada una de las esquinas. La máquina cuenta con un "nivel tipo burbuja" que permite establecer la perpendicularidad para la cual la máquina está diseñada. En el presente proyecto se diseñó un sistema de liberación del péndulo el cual se activa desde una interfaz usuario/ordenador,

que además se encarga de obtener los datos enviados por la maquina, procesar los resultados y finalmente mostrarlos (guardar o imprimir). El instrumento base para la obtención de datos, es un sensor óptico que detecta los grados totales después del impacto, los cuales conservan una relación con los resultados de energía absorbida por la muestra impactada, adicionalmente el equipo cuenta con un sensor de temperatura ambiente, aspecto fundamental en el análisis de los resultados, como también la disponibilidad para ensamblar un sensor de humedad. Con lo anterior se evidencia que los resultados más confiables se obtendrán si la maquina está absolutamente nivelada y ajustada las condiciones de temperatura y humedad establecidas en las normas de cada tipo de ensayo, por lo que es necesario revisar estas condiciones con antelación [1].

3.2.2 Péndulo y martillo

Un conjunto de péndulos es proporcionado para la realización de cada prueba, los cuales al igual que el resto de la máquina cumple con la norma ASTM E23; sus diseños cumplen con características de: velocidad ($v = 2,93 \text{ m/s}$), longitud (225 mm), y punto de golpe. Para el péndulo de impacto Zwick 5102 la liberación del péndulo se hace desde un ángulo de 10° a 160° . Los péndulos son llevados a la posición inicial manualmente, de tal forma que sobre pase el pestillo de la parte superior. Para los ensayos *Charpy*, *Izod* y *Tracción por Impacto*; Los péndulos intercambiables tienen un peso de: 0,5 ; 1J; 2J y 4J. El martillo tipo Charpy (figura 3.2), tiene forma de C mientras que los martillos tipo Izod (figura 3.3) y Tracción por Impacto (figura 3.4) tiene forma de n, en el caso del ensayo de tracción por impacto conservan una arquitectura especial necesaria para ensamblar el dispositivo sujetador (yunque-péndulo) [1].



Figura 3.2 Pendulos Charpy, [Fuente propia].



Figura 3.3 Péndulos Izod, [Fuente propia].



Figura 3.4 Péndulos Tracción por Impacto, [Fuente propia].

3.2.3 Soportes para las probetas

El péndulo de impacto Zwick 5102 ha sido diseñado de manera tal que puedan ser realizados tres tipos de pruebas. Para ello se han diseñado tres tipos de soportes, uno tipo Charpy que sostiene la muestra utilizando dos puntos de apoyo, uno en cada extremo, uno tipo Izod que sostiene la probeta en voladizo y el tipo tracción por impacto que sostiene la probeta utilizando una mordaza adherida al martillo y un yunque para fijar la muestra impactada. Para poder ubicar estos soportes, y por consiguiente las probetas, a la altura adecuada de acuerdo al tamaño y capacidad, es necesario utilizar unos bloques que actúan a manera de suplemento, y que permanecerán fijos en la base de la máquina [1].

3.2.3.1 Soporte para probetas tipo Charpy

Para la prueba de impacto tipo Charpy, las mordazas deben sujetar la probeta en sus extremos, dejando una distancia constante para el paso del péndulo (ver figura 3.5), estrictamente en la mitad de probeta, que debe ser 40 mm [1].



Figura 3.5 Soportes Charpy, [2].

3.2.3.2 Soporte para pruebas de impacto Izod

Para la prueba de impacto tipo Izod, las mordazas deben sujetar la probeta por uno de sus extremos, ajustando la probeta justo en el inicio de la entalla (ver figura 3.6), dejando espacio en voladizo para que el golpe suceda alrededor de 22mm de la ranura según la norma ASTM E23 [1].



Figura 3.6 Soporte Izod, [2].

3.2.3.3 Soporte para pruebas de tracción por impacto

Para la prueba de impacto tipo tracción impacto, según se ilustra en la figura 3.7, se compone de un dispositivo sujetador y una base fija, lo cual es el complemento para el sostenimiento de las probetas. El montaje es ajustable de acuerdo al grosor de la probeta desde 0 a 4,5 mm [1].



Figura 3.7 Soporte Tracción por impacto, [2].

3.3 SISTEMA DE MEDICIÓN Y REGISTRO

Los Péndulos de impacto clásicos determinan la energía absorbida en el impacto por una probeta estandarizada, midiendo la altura de elevación del martillo tras el impacto, mientras que el péndulo de impacto Zwick 5102 está equipado por medio de un sensor Encoder de referencia HEDS-9100, de tecnología AVAGO, el cual se encuentra constituido por una barrera de doble luz que detecta los pulsos en las direcciones hacia adelante y hacia atrás, gracias a la presencia de un disco decodificado ubicado entre el emisor y el receptor del sensor. El ángulo de deflexión β (ver figura 2.9), el cual determina la energía absorbida se calcula restando todos los pulsos contados hasta el momento en que la dirección del péndulo cambia, al número de pulsos que van desde el punto de liberación del péndulo hasta el punto donde impacta con la muestra. Por consiguiente la altura del punto de inversión y por lo tanto la energía de impacto absorbida se calcula a partir de este ángulo de desviación. Este sistema de reconocimiento se ajusta de tal forma que permite acondicionar y capturar cada uno de estos datos para ser implementados en los distintos métodos de ensayo

que permite realizar la máquina. La siguiente relación permite que los datos se acondicionen de la siguiente manera [1]:

- 360° corresponden a 750 pulsos del encoder.
- 160° corresponden a 333 pulsos del encoder.

Un mecanismo de pestillo (seguro) sujeta el péndulo en su posición elevada y asegura una liberación, sin vibraciones cuando se activa. Una vez liberado, la velocidad de impacto es de aproximadamente 2,93m/s y obtiene la máxima energía disponible para impactar la muestra. La calidad superior de su diseño y construcción del modelo 5102 asegura una máxima precisión y repetibilidad de ensayos. Cuando la máquina está correctamente instalada y nivelada, la fricción total y las pérdidas por rozamiento en la maquina durante el balanceo del péndulo están garantizadas para no exceder un 0,5% del rango de energía [1].

3.4 TIPOS DE PRUEBA DE IMPACTO

3.4.1 Introducción

Los ensayos de impacto como ya se ha mencionado se utilizan para la determinación del comportamiento de un material a velocidades de deformación más altas, lo que conduce a investigar la conducta del espécimen en condiciones de fragilidad y poder estimar y caracterizar de esta manera su comportamiento mecánico ante el impacto [1].

Los siguientes tipos de pruebas se pueden realizar en los plásticos y materiales similares utilizando el péndulo de impacto Zwick 5102, según se denota en la tabla 3.1 [1]:

Tabla 3.1 Diferentes tipos de prueba en Plásticos y materiales similares, [1].

Norma	Prueba de Impacto
ASTM D 6110 “Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics”	Charpy
ASTM D 256 Método A “Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics”	Izod
ASTM D 1822 “Standard Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials”	Tracción por Impacto

En el presente trabajo se elaborarán los ensayos de impacto bajos los parámetros de la norma ASTM. El modelo de péndulo 5102 ofrece máxima versatilidad en los

ensayos de impacto. Fácil inserción de intercambiables péndulos que se adaptan rápidamente para hacer ensayos de tipo Charpy o Izod. Una entalla en la parte trasera del cabezal del péndulo permite una herramienta opcional para adaptar y realizar también ensayos de Tracción Impacto [1].

3.4.2 Prueba de Impacto Charpy

El ensayo según la norma ASTM D6110 (“Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics”), se realiza en probetas entalladas. De no producirse la rotura de la probeta, se empleará el método de tracción por impacto. Además, el método Charpy ofrece ventajas en los ensayos con temperaturas bajas, ya que los yunques de la probeta se encuentran más alejados de la ranura, evitando así una rápida transmisión de calor a las partes críticas de la probeta [2].

3.4.3 Prueba de Impacto Izod

Dentro de las normas ASTM, el método Izod acorde a la norma ASTM D 256 (“Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics”), es el más común. En él se realizan las pruebas con probetas con o sin entalla. Cada martillo se puede emplear en un área del 10 al 80% de su energía nominal inicial, para ISO, aunque ASTM permite hasta un 85% [2]. El martillo de tipo Izod es fácilmente fijable al péndulo mientras que la muestra entallada es amordazada en el yunque. Lo que asegura que la muestra tenga el correcto alineamiento vertical y altura apropiada [1].

3.4.4 Prueba de Tracción por Impacto

Este método puede ser usado para materiales demasiado flexibles o demasiado delgados como para ser probados por Izod o Charpy, como es el caso de Poliamida 6 y polietileno de baja densidad, y para materiales más rígidos en el control de calidad y en el control de producción. La muestra del Impacto por tracción se coloca en un soporte que coincide con la cabeza del péndulo. Se aplica instantáneamente tracción cuando la masa golpea la muestra. Este método distribuye la energía de impacto de una forma uniforme a lo largo de toda la muestra hasta producir su fractura [1].

3.5 CÁLCULO DE LA ENERGÍA Y RESISTENCIA AL IMPACTO

Para calcular la energía absorbida por la probeta se debe tener en cuenta, la energía potencial del péndulo en la posición inicial y la energía potencial en la posición final después de la ruptura de la probeta, como se puede observar en la ecuación 3.1.

$$E_{\text{absorbida}} = E_i - E_f \quad (3.1)$$

Observando la figura de variables físicas del péndulo de impacto (figura 2.9), se puede establecer la energía inicial E_i y la energía final E_f como se muestra en las ecuaciones 3.2.

$$\begin{aligned} E_i &= mgh_1 \\ E_f &= mgh_2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Teniendo en cuenta que los ángulos α (ángulo inicial) se referencia respecto al eje horizontal positivo, pero de acuerdo al sistema real observado el ángulo final en realidad resultaría en ángulos negativos, se analiza entonces su punto correspondiente en el eje horizontal, denominada ángulo β . Analizando la figura 2.6 se tiene que si $h_1=y+L$ y $h_2=y'+L$, la energía absorbida por la probeta queda descrita como en la ecuación 3.3:

$$\begin{aligned} E_{\text{absorbida}} &= mgh_1 - mgh_2 \\ E_{\text{absorbida}} &= mg(h_1 - h_2) \\ E_{\text{absorbida}} &= mg((y + L) - (y'+L)) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Las relaciones trigonométricas para y y y' se describen en las ecuaciones 3.4:

$$y = L \cdot \text{sen} \alpha \quad y' = L \cdot \text{sen} \beta \quad (3.4)$$

De acuerdo a y y y' la expresión para la energía absorbida finalmente sería la ecuación 3.5:

$$\begin{aligned} E_{\text{absorbida}} &= mg((L + L \cdot \text{sen} \alpha) - (L + L \cdot \text{sen} \beta)) \\ E_{\text{absorbida}} &= mgL((1 + \text{sen} \alpha) - (1 + \text{sen} \beta)) \\ E_{\text{absorbida}} &= mgL(\text{sen} \alpha - \text{sen} \beta) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Donde mgL se le asigna a W , siendo esta la energía del péndulo. La energía absorbida de acuerdo a lo dicho anteriormente se muestra en la ecuación 3.6:

$$E_{\text{absorbida}} = (\text{sen} \alpha - \text{sen} \beta) \cdot W \quad (3.6)$$

Para el cálculo de la Resistencia al impacto, se hace uso de la ecuación 3.7:

$$R_{\text{impacto}} = \frac{E_{\text{absorbida}}}{b \cdot h} = \frac{(\text{sen} \alpha - \text{sen} \beta) \cdot W}{b \cdot h} \quad (3.7)$$

Donde b es la profundidad de la ranura y h el ancho o grosor de la probeta.

Para el reporte final de los ensayos de impacto es necesario incluir un factor de corrección F_A a la energía y resistencia al impacto establecido por la norma ASTM D256, mostradas en las ecuaciones 3.6 y 3.7, valores obtenidos por medio de la

interfaz de usuario del Péndulo de Impacto Zwick 5102. Este factor es el promedio de las energías obtenidas realizando el ensayo sin probeta, representando las pérdidas de energía dadas por la fricción con el aire y el rozamiento con el montaje y soportes del equipo, de esta manera las ecuaciones finales para energía y resistencia el impacto, se muestran en las ecuaciones 3.8 y 3.9.

$$E_{\text{absorbida}} = (\text{sen } \alpha - \text{sen } \beta) \cdot W - F_A \quad (3.8)$$

$$R_{\text{impacto}} = \frac{E_{\text{absorbida}}}{b \cdot h} - F_A = \left[\frac{(\text{sen } \alpha - \text{sen } \beta)}{b \cdot h} \cdot W \right] - F_A \quad (3.9)$$

3.6 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL MOMENTO DEL IMPACTO

En la posición inicial el martillo de la máquina de impacto tiene una energía potencial $E_p = mgh$ (donde h es la distancia de la probeta al centro de gravedad del martillo pendular) al caer, esta energía potencial se convierte en energía cinética $E_c = \frac{mv^2}{2}$; por la ley de conservación de la energía, igualamos las dos expresiones y despejamos la velocidad de impacto como se indica en la ecuación 3.10 [3]:

$$E_p = E_c \rightarrow mgh = \frac{mv^2}{2} \rightarrow v = \sqrt{2gh} \quad (3.10)$$

REFERENCIAS

- [1] Zwick GmbH & Co, Operating Instructions Zwick 5102 Pendulum, Ulm, F.R. Germany.
- [2] <http://www.zwickusa.com/en/applications/plastics/thermoplastic-thermosettingmaterials/impact-test.html>
- [3] H. E. jaramillo, A. Ruiz, Análisis y Simulación de la Prueba de Impacto Tipo Charpy Mediante Elementos Finitos, Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, Cali-Colombia, 2003.

CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA INTERFACE DE USUARIO PARA EL PÉNDULO DE IMPACTO ZWICK 5102

4.1 MICROCONTROLADORES PIC

4.1.1 Introducción

Un microcontrolador o MCU, es un ordenador puesto en un circuito integrado de una escala muy pequeña. Además de aquellos componentes contenidos en un microprocesador, un MCU también contiene algunos componentes periféricos como : Memoria, Temporizadores, contadores, interfaz de entradas y salidas, comparadores, interrupción de tiempo real, temporizador de perro guardián; Modulación de ancho de pulso (PWM), Convertidor análogo digital (ADC) ,Convertidor digital análogo (DAC) ,puerto paralelo entrada-salida, puerto de comunicación serial asincrónico (UART); Puertos de comunicación serial sincrónico. Los MCUs son usados en impresoras, teclados, módems, teléfonos, tarjetas de crédito, ordenadores superiores, y aplicaciones domesticas, como refrigeradores, lavadoras, y microondas. Ellos también son usados para controlar la operación de motores y máquinas en fábricas. Una de las aplicaciones más importantes de MCUs es probablemente el control de los automóviles [1].

El campo de microcontroladores tiene sus inicios en el desarrollo de tecnología de circuitos integrados. Este desarrollo ha hecho posible almacenar cientos de miles de transistores en un pequeño espacio [2]. El compilador de C que se utilizará es el PCW de la casa CCS Inc. A su vez, el compilador se integra en un *entorno de desarrollo integrado* (IDE) que permite desarrollar todas y cada una de las fases que compone un proyecto, desde la edición hasta la compilación pasando por la depuración de errores. La última fase, a excepción de la depuración y retoques hardware finales, será programar el PIC. Es bueno aclarar en el circuito electrónico digital, el uso de la tecnología TTL (Lógica de transistores), la cual usa 5V para el valor binario 1 y voltaje 0 para representar un cero lógico. El rango preciso para los circuitos tiene en cuenta que los voltajes por encima de 3.5V serán tomados para representar 1 lógico y a aquellos abajo 1.5V para representar 0 lógico [3]. El funcionamiento de los microcontroladores está determinado por el programa almacenado en su memoria. Además, la mayoría de los microcontroladores actuales pueden reprogramarse repetidas veces [4].

Monitoreando el valor de las entradas, el microcontrolador puede responder a eventos externos y realizar una cierta acción, como variar las señales de salida de acuerdo al valor en las entradas. Para responder a eventos externos, los MCUs cuentan con un recurso conocido como *interrupciones*. Las interrupciones son señales que se generan internamente en el microcontrolador que detienen la ejecución normal del programa para ejecutar alguna subrutina que da respuesta

al evento. Una vez ejecutada la subrutina de interrupción, la ejecución del programa continúa en el punto en que se encontraba antes de generarse la interrupción [4]. Uno de los MCUs más populares y más fáciles para usar es la familia de PIC18 de 8 bits del Microchip alta gama, que desde el 2006 han sido clasificados primeros en ventas mundiales de microcontroladores de 8 bits. Estos MCUs ofrecen una gran proporción de precio/calidad y usan tecnología aprobada debido a su confiabilidad y fácil interpretación [5].

4.1.2 Funcionamiento de la familia de microcontroladores PIC18F

Con el análisis de las anteriores características se puede visualizar según los requerimientos de la maquina ZWICK 5102, las propiedades más confiables de un microcontrolador que permita obtener los objetivos propuestos para la implementación. De esta manera se llegó a seleccionar la familia del pic18 la cual abarca los siguientes ítems [6]:

- La familia PIC18 incluye todos los periféricos populares, como el MSSP, ESCI, CCP, temporizadores de 8 y 16 bits, PSP, ADC de 10 bits, WDT, POR y CAN 2.0B. La mayor parte de dispositivos PIC18 proporcionarán una memoria de programa de *flash* en tamaños de 32 kilobytes y RAM de datos de 256 a 4 kilobytes; el funcionamiento de 2,0 a 5,5 voltios, con velocidades de corriente continua a 40 MHz.
- Esta familia incluye hasta cuatro interrupciones externas fijas, hasta tres temporizador/mostradores 16 bits, hasta dos temporizadores de 8 bits con el periodo de registro de 8 bits (base del tiempo para PWM), hasta 2 módulos USART Direccionales (ESCI) (indispensables para el requerimiento de transmisión y recepción de datos PIC-Ordenador), módulo de Convertidor análogo Digital de 10 a 13 bits (A/D) aplicación que se desarrollará en las siguientes secciones.

Tabla 4.1 Características de la familia PIC18, [7].

Dispositivo	Memoria Flash (Bytes)	SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10 Bit A/D	EAUSART	Timers 8/16 Bit
PIC18F2455	24K	2048	256	24	10	1	1/3
PIC18F2550	32K	2048	256	24	10	1	1/3
PIC18F4455	24K	2048	256	35	13	1	1/3
PC18F4550	32K	2048	256	35	13	1	1/3

Para la selección de PIC, se tuvo en cuenta que el rango de confiabilidad de las propiedades estuviera en niveles superiores (Ver Tabla 4.1). La elección que suplió las necesidades impuestas, después de probar con varios ejemplares fue el PIC 18F4550 (Ver Figura 4.1) [7].

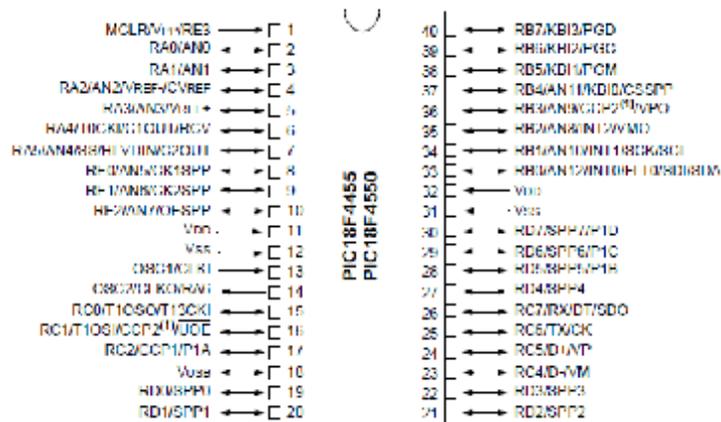


Figura 4.1. Puertos de entrada y salida para el PIC 184550, [7].

Un punto prioritario del diseño del circuito electrónico que controlaría el Péndulo de Impacto Zwick 5102, fue el funcionamiento de las interrupciones externas. Para el caso desarrollado en este proyecto se utiliza la interrupción RB0, la cual es prioritaria y ordenada por los registros en INTCON1 (ver sección 4.3.3) [7].

4.1.3 Fuente de poder

Para los objetivos de este proyecto, un suministro 5V DC será suficiente. La construcción de la fuente requiere reguladores de voltaje monolíticos, como 7805 regulador de 5V positivos, que proporciona buena regulación así como el cierre automático térmico y protección de sobrecarga de cortocircuito. El circuito consiste de un transformador, un rectificador de puente de onda completa, el 7805 regulador de voltaje IC y algunos condensadores para el filtrado de la onda [8]. De la misma manera se implementa un suministro de 12V DC con un regulador 7812, necesario en los circuitos electrónicos que se desarrollaran en capítulos siguientes. La Figura 4.2 muestra el prototipo de la fuente.

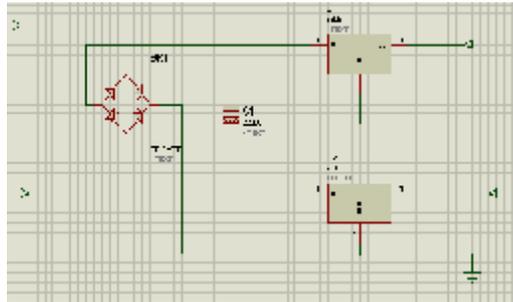


Figura 4.2 Esquema Fuente de alimentación, [Fuente propia].

4.1.4 Programa de PIC

Inicialmente se nombró el uso del compilador CCS como herramienta para la programación del microcontrolador, bajo parámetros propios del programa, se logró estructurar el código como se muestra en la Figura 4.3:

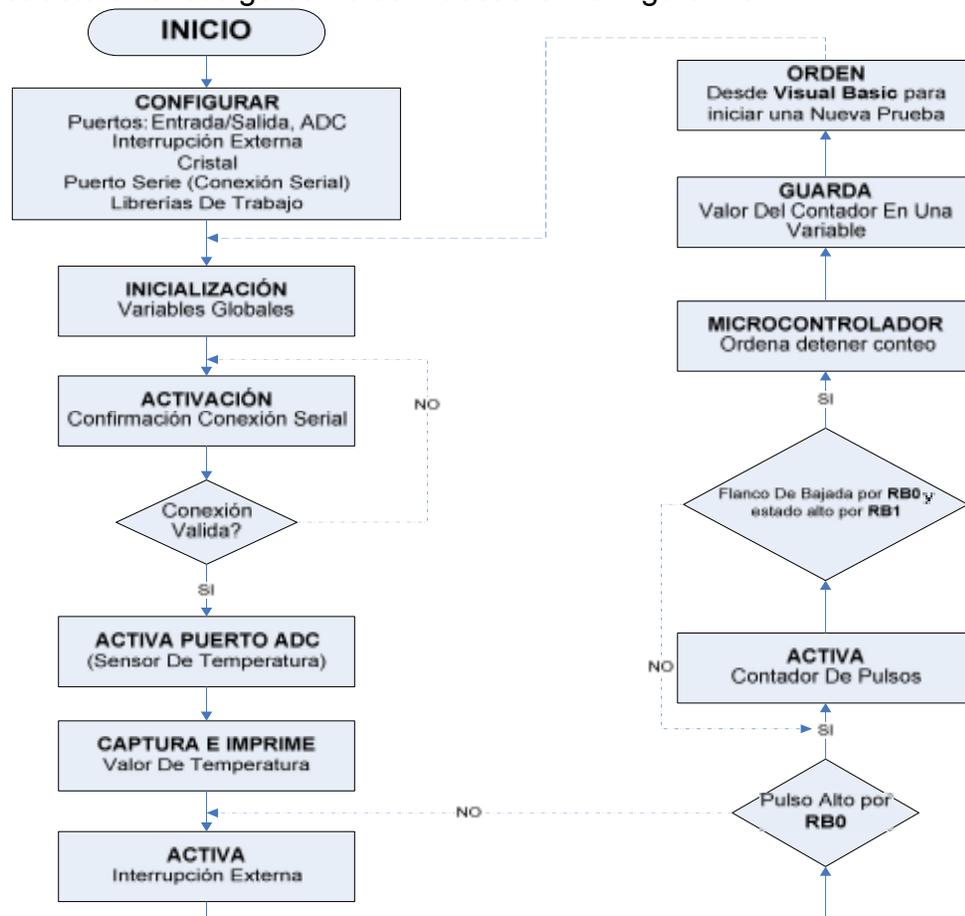


Figura 4.3 Diagrama de Flujo del funcionamiento del programa, [Fuente propia].

4.1 SENSOR DE TEMPERATURA

4.2.1 Introducción

La temperatura es una de las variables más comunes a nivel industrial, y por ende es fundamental en el proceso de determinación de la energía absorbida por un determinado material, por tal motivo es conveniente la instalación de un dispositivo que nos permita sensor la temperatura a la cual se está realizando cada prueba en el probador de impacto Zwick 5102. El sensor de temperatura semiconductor más simple es una unión PN, tal como un diodo de señal o la unión base-emisor de un transistor. Para tal fin se hace uso de un LM335 cuya razón de elección se debe en gran parte a su éxito en cuanto a precisión, fácil adquisición y bajo costo en el mercado. El LM335 permite una precisión importante, con un error típico menor a 1°C cuando se calibra a 25°C en un rango de 100°C . Su tensión de salida es proporcional a la temperatura, en la escala Celsius. El sensor LM335 se presenta en diferentes tipos de encapsulados, pero el más común es el T0-92 (ver figura 4.4), de igual forma que un típico transistor con 3 pines, dos de ellas para alimentarlo y la tercera nos entrega un valor de tensión proporcional a la temperatura medida por el dispositivo [9].

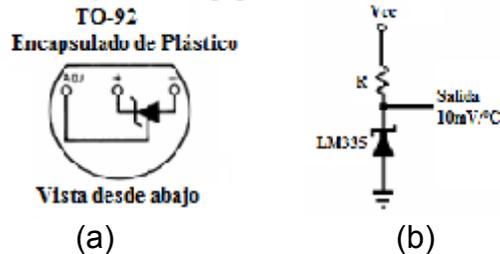


Figura 4.4 Sensor de temperatura LM335
(a) Encapsulado, (b) Diagrama Interno, [9].

4.2.2 Modo de operación

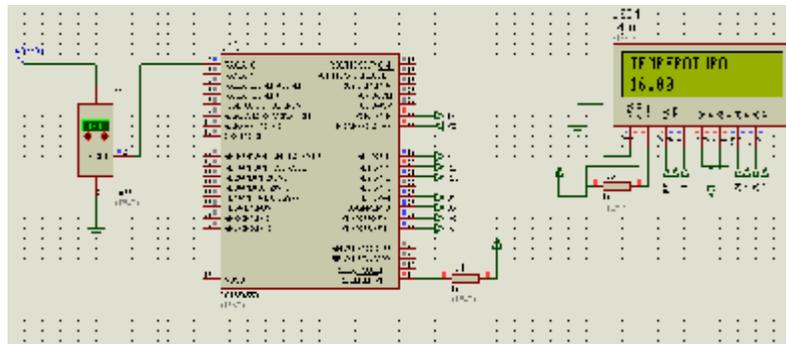


Figura 4.5 Circuito sensor de temperatura con LM335 por medio de PIC18F4550, [Fuente propia].

Se optó por un sensor con salida análoga, debido a que es posible aprovechar el conversor del microcontrolador para obtener el valor digital de la temperatura. Como se observa en la figura 4.5, el sensor LM335 es quien capta la temperatura ambiente cuya salida se encuentra conectada al pin RA0 del microcontrolador, el cual debe estar previamente activado y configurado como conversor A/D. El ADC del PIC adquiere la señal analógica acondicionada del fotodiodo y la convierte a formato digital. La señal digital generada es enviada al sistema de transmisión, que comunica al microcontrolador con el PC, en este caso la comunicación serial es por RS232. Se ha elegido esta comunicación porque es totalmente programable y permite configurar por software todos los parámetros de la comunicación: velocidad de transmisión, paridad, número de bits, *full o half dúplex*, etc. El módulo conversor A/D para pic18f4550, tiene una resolución de 10 bits con 13 canales, con un rango de la tensión de 0 a 5 voltios. Externamente utiliza un oscilador a una frecuencia de 20MHz. Cuando finaliza la conversión se provoca una interrupción externa en el microcontrolador, de forma que a través del puerto RA0 se procede a la lectura [10].

Sin importar el sensor que se utilice, el convertidor Analógico-Digital debe calibrarse de tal forma que todo su rango de trabajo sea utilizado por la señal a medir. Recordemos que el convertidor es de 10 bits por lo cual tiene hasta 1024 valores posibles, es decir, es de 1024 conteos. Estos conteos son los que se deben aprovechar al máximo para lograr la máxima precisión posible. Para ello se tiene que tener en cuenta el voltaje de referencia del convertidor A/D y el voltaje máximo entregado por el sensor, tratando de que sean iguales. Para determinar las unidades de tensión, se divide la tensión máxima de entrada del ADC por el mayor número contado por sus bits de resolución. El mayor número numerable por los bits de resolución es igual a $2^R - 1$, donde R es el número de bits de resolución en el ADC. Así para el caso del ADC correspondiente del PIC18F4550, con 10 bits de resolución y una tensión máxima de entrada de 5 voltios, se presenta la siguiente relación 4.1:

$$\frac{\text{Tensión de entrada}}{2^R - 1} = \frac{5V}{(2^{10} - 1)\text{bit}} \approx 4.887\text{mV/bit} \quad (4.1)$$

Lo que quiere decir que el registro del ADC aumentará en 1 por cada 2. 929 mV/bit. Acomodando las escalas, si el sensor Lm335 entrega 10.0 mV/°C y el ADC aumenta en 4.887mV/bit y es necesario dejar uno a uno la escala, luego basta con buscar un factor que lo haga y este sería:

$$10.0 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}} / 4.887 \frac{\text{mV}}{\text{bit}} = 2.046 \approx 2\text{bit}/^\circ\text{C}$$

Es decir dividiendo el valor de la conversión A/D por $2\text{bit}/^{\circ}\text{C}$, dará el valor de la temperatura en grados centígrados. El sistema dispone de dos interfaces de usuario, una en la pantalla del PC realizado por medio del software MICROSOFT VISUAL STUDIO 2008, y otra por medio de una LCD ubicada en la tarjeta de adquisición. La LCD elegida es de 16x2, empleándose la configuración hardware de 4 bits para visualizar la información.

4.3 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DEL ENCODER

4.3.1 Introducción

Cuando el péndulo se suelta de su posición inicial se activa de inmediato el circuito de acondicionamiento del encoder HEDS-9100 de tecnología AVAGO, el cual como se observa en la figura 4.6 se encuentra acoplado a la estructura mecánica de la máquina. Al realizar el acondicionamiento de los pulsos arrojados por el encoder cuando el péndulo se encuentra de bajada (sentido de las manecillas del reloj) o de subida (sentido contrario a las manecillas del reloj), por medio del osciloscopio y gracias a la información proporcionada por el fabricante se comprobó que éste efectivamente, como se visualiza por medio de la figura 4.7, entrega uno de sus pulsos desfasado 90° respecto al otro, además cuando el péndulo está bajando se observa que el pulso A realiza un flanco de bajada, mientras que el pulso B se encuentra en estado ALTO.

Así mismo cuando el encoder gira en sentido opuesto, es decir el péndulo se encuentra subiendo, mientras que el canal A presenta un flanco de bajada, el canal B está en estado BAJO. Es por ende que haciendo uso de estas características es posible sensar el sentido de giro del péndulo, particularidad fundamental para determinar el ángulo β , ángulo máximo de deflexión después del impacto tomado desde la horizontal, y mencionado ya en capítulos anteriores para así determinar la energía y resistencia al impacto de un material polimérico, tema de estudio del presente trabajo. Para el caso del Codewheel (disco codificado) empleado para el péndulo de impacto Zwick 5102, 750 pulsos arrojados por el encoder corresponden a 360° grados de rotación del péndulo.

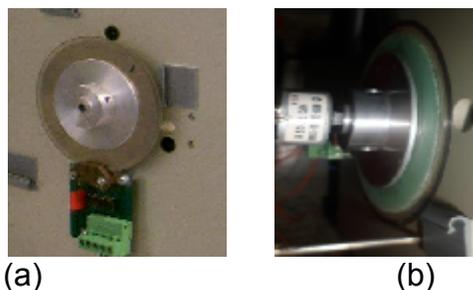


Figura 4.6 Encoder HEDS-9100

(a) Circuito de acondicionamiento del encoder, (b) Motor C.C. ensamblado, [Fuente propia].

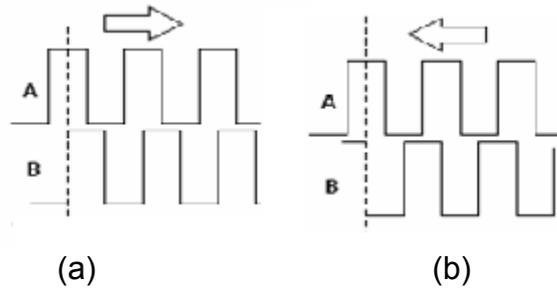


Figura 4.7 Comportamiento de los pulsos del encoder
(a) Pulsos generados cuando el péndulo baja, (b) Pulsos generados cuando el péndulo sube, [Fuente propia].

4.3.2 Encoder Rotativo Incremental

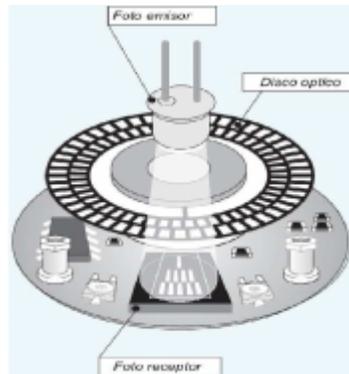


Figura 4.8 Elementos constitutivos de un encoder rotativo incremental, [11].

El encoder rotativo incremental (ver figura 4.8), opera como un transductor rotativo, por lo que convierte el movimiento angular en señales eléctricas con forma de onda cuadrada. Usa el principio de rastreo fotoeléctrico para detectar el movimiento angular, contando con un sistema de lectura que consta de un disco graduado con un reticulado radial que será iluminado por una fuente de luz, el disco proyecta su imagen sobre la superficie de varios receptores. En la figura 4.9, se observa el diseño del circuito de acondicionamiento con el que cuenta la máquina, esto es necesario para obtener señales de forma cuadrada y sin interferencia, típicamente se utilizan señales diferenciales para eliminar interferencias de modo común. Este tipo de encoder suministra normalmente 2 señales, las cuales tienen forma de onda cuadrada, y se encuentran desfasadas 90° [12].

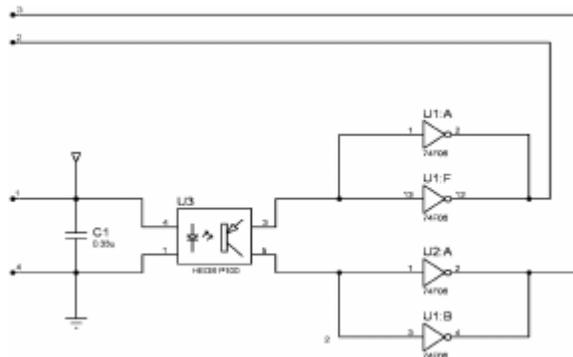


Figura 4.9 Circuito de acondicionamiento del encoder, [Fuente propia].

4.3.3 Programación del PIC18F4550

El microcontrolador PIC18F4550, tiene la función de recibir y procesar los datos provenientes del circuito de acondicionamiento del encoder, y comunicarlos con el computador por medio de la comunicación serial RS232. En seguida se explicará la metodología y programación usada para sensar este cambio de sentido por medio de los pulsos arrojados por el encoder y adicionalmente por medio del comparador de ventana, tema siguiente a ser enunciado. Para empezar la programación del PIC se realizó mediante el software PIC C Compiler, tomando como primer paso la inicialización y configuración de todas las variables a usar como contadores, interrupciones y puertos.

a. Configuración

Se configura el puerto B, para que todas sus entradas sean digitales, de las cuales se utiliza RB0 como puerto para activar la interrupción externa por flanco de bajada del canal A del encoder y RB1 como puerto para testear si el canal B del mismo se encuentra en estado alto o bajo, esto para determinar el sentido de giro del péndulo, por recomendación del fabricante cualquier pin de entrada/salida que no se utilice se debe configurar como entrada. Para el puerto C, se configura al pin RC6 como salida para transmisión de datos y RC7 como recepción de datos; para el puerto D, se configura la LCD como instrumento de visualización de resultados. Antes de continuar con la configuración de los demás periféricos del microcontrolador, se escriben los valores iniciales necesarios para que el sistema funcione correctamente y para obtener una base de tiempo aproximada de 0.4ms equivalente a una frecuencia de 2,5kHz, se hizo uso de un cristal de cuarzo de 20MHz, como entrada en los pines 13 y 14 del PIC en uso.

b. Interrupción

Inmediatamente después de que se ha dado la orden de liberación del péndulo desde la interface de Visual Basic 2008, el programa habilita el contador de eventos externos. Hecho esto, el programa queda en un bucle esperando la interrupción externa. Cada vez que se presente una interrupción externa debido a los pulsos provenientes del encoder, se evalúa dentro de la subrutina el flanco en el que se encuentra el pulso A y a su vez el estado en el que está el pulso B, si el programa determina que el péndulo se encuentra bajando entonces cuenta todos los pulsos generados por esta situación pero en el momento preciso en el que determine que el péndulo se encuentra subiendo entonces sale de la interrupción y salva el valor de pulsos contados en una variable hasta el instante en que se indica este cambio de sentido. Luego el valor de esta variable es transmitido por medio del puerto serie al PC, para calcular el ángulo barrido por el péndulo desde que se libera hasta el cambio de giro.

Para finalizar la subrutina, se limpia la bandera de interrupción de esta sección. Después de ejecutar dicha interrupción se debe retornar los valores originales (valores antes de la interrupción) de los registros de trabajo, de estado y de contador y se regresa al programa principal, hasta que se le ordene iniciar una nueva prueba. Como se mencionó con anterioridad, se hizo uso de un sistema de aseguramiento para sensar el cambio de sentido de giro del péndulo, es por esta razón que se diseñó un circuito comparador de ventana que tiene como salida un estado alto o bajo que nos permitirá introducir al puerto RB1 del PIC, y por ende permitirá testear dicho propósito de la misma manera como se mencionó antes, es decir haciendo uso del mismo modo del código ya mencionado, con la única diferencia de que en lugar de conectar el canal B del encoder al puerto RB1, se conectará entonces esta salida del comparador de voltaje. A continuación se hablará a cerca del diseño y modo de operación de dicho circuito.

4.4 COMPARADOR DE VOLTAJE

4.4.1 Introducción

Debido a que el CODEWHEEL, disco codificado del sensor HEDS-9100, se encontraba en mal estado, y lo que respecta a la necesidad de sensar el cambio de sentido (hacia abajo o hacia arriba del péndulo de impacto), se diseñó por medio del software AUTOCAD y fabricó gracias al método de película delgada, este diseño se llevó a cabo teniendo en cuenta las recomendaciones del fabricante del encoder utilizado, por lo que el nuevo disco tiene las mismas características del original, se aseguró que no se introdujeron distorsiones al fabricarlo, por medio de una inspección realizada en el Laboratorio de Óptica y Láser de la Universidad del Cauca, mediante un montaje óptico sobre la superficie

del disco, lo que arrojó una buena precisión en el mismo, sin la presencia de errores en las líneas por manchas de tinta. Pero al mismo tiempo se consideró la posibilidad de tener una medida de aseguramiento extra para testear este cambio de sentido, por tal razón se diseñó e implementó un comparador de voltaje que nos permita recibir por parte de unos de los pines del PIC18F4550, exactamente pin RB1, un estado alto (5V) o estado bajo (0V). Esto se logró por medio de un motor de corriente continua o CC, ubicado y fijado estratégicamente en el eje de rotación del disco del encoder (ver figura 4.6) y cuya finalidad en tal diseño es lanzar un voltaje que en este caso se denominará voltaje de entrada, **V_{ent}**, cuyo valor se comparará con los voltajes de referencia, **V_{ref}**, de los cuales se dará a conocer a continuación la forma como se obtuvieron, lo anterior después de haber pasado por una adecuada caracterización del motor. Y así lograr determinar el sentido de giro del péndulo cuando éste se encuentra en funcionamiento.

4.4.2 Motor C.C.

Son de los más comunes y económicos, y se encuentran en la mayoría de los juguetes a pilas, constituidos, por lo general, por dos imanes permanentes fijados en la carcasa y una serie de bobinados de cobre ubicados en el eje del motor, que habitualmente suelen ser tres.

El funcionamiento se basa en la interacción entre el campo magnético del imán permanente y el generado por las bobinas, ya sea una atracción o una repulsión hacen que el eje del motor comience su movimiento. Estos motores disponen de dos bornes que se conectan a la fuente de alimentación y según la forma de conexión el motor girará en un sentido u otro, es aquí donde se encuentra la base esencial para llevar a cabo el diseño del comparador de voltaje, ya que por medio de esta característica se puede notar que dependiendo en qué sentido esté girando el motor, este generará voltajes de salida ya sea positivos (en contra de las manecillas del reloj) o negativos (en sentido de las manecillas del reloj), como se nota en la figura 4.10 [13].

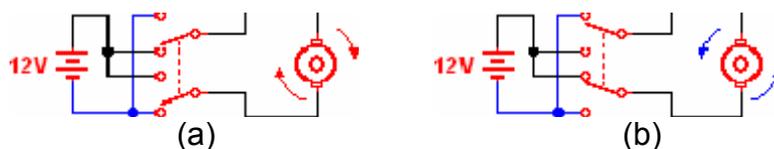


Figura 4.10 Giro de un motor C.C.

(a) Sentido de las manecillas del reloj, (b) Sentido contrario a las manecillas del reloj, [13].

Según la velocidad de giro del motor se acondicionó los voltajes de salida del motor C.C. a utilizar con valores que van desde 0.01V a 1V, los cuales serán

considerados como voltajes de referencia dentro del comparador de ventana a implementar.

4.4.3 Diseño y modo de operación

Según los requerimientos para tomar voltajes de salida que no superen el rango de voltajes entre 0,01V y 1V, se diseñó el circuito que se presenta en la figura 4.11, el cual cuenta con un par de comparadores LM339, una compuerta AND 7408 y un arreglo de resistencias de tal manera que fuera capaz de suplir tal necesidad y hacer efectivo el proceso mediante el cual se permita sensor el cambio de sentido de giro del péndulo de impacto Zwick 5102, cuando éste se encuentra en funcionamiento.

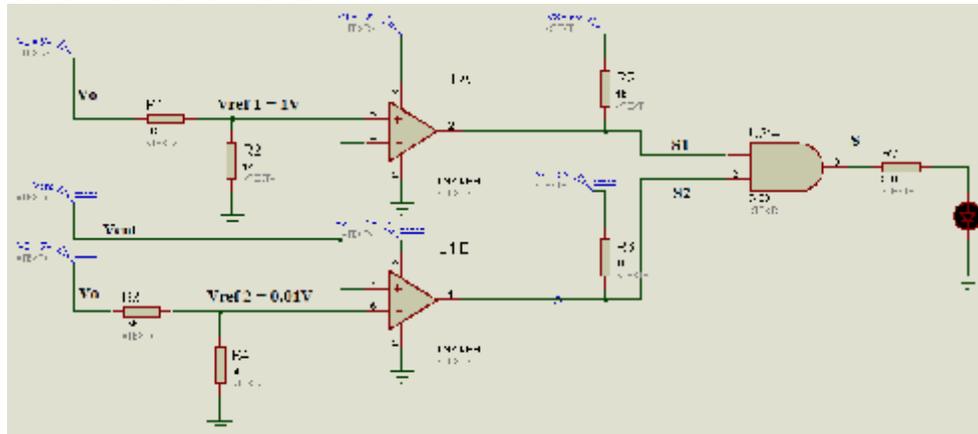


Figura 4.11 Diseño del circuito Comparador de Voltaje, [Fuente propia].

Para el desarrollo del diseño fue necesario realizar los siguientes cálculos para los siguientes componentes:

$$Vref_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_0 \quad (4.3)$$

Y

$$Vref_2 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V_0 \quad (4.4)$$

Asumiendo $R_2 = 1K\Omega$, $R_4 = 50\Omega$, $Vref = 1V$ y $Vref_2 = 0.01V$; entonces se tiene de la ecuación 4.3 y la ecuación 4.4 que:

$$1V = \frac{1K\Omega}{R_1 + 1K\Omega} \cdot 5V \quad (4.5)$$

De donde,

$$R_1 = 1K\Omega$$

Y,

$$0.01V = \frac{50\Omega}{R_3+50\Omega} \cdot 5V \quad (4.6)$$

Al realizar el anterior procedimiento para la ecuación 4.6, se obtiene:

$$R_3 = 25K\Omega$$

Tal circuito está diseñado para monitorear un voltaje de entrada, (que corresponde en este caso al voltaje de salida del motor) e indicar cuando este voltaje se encuentre dentro de los límites prescritos ($V_{ref_1} = 0.01 V$ a $V_{ref_2} = 1V$). En este caso mediante estos valores es posible regular una salida de voltaje que no sobrepase al rango ya mencionado. Si el voltaje de entrada del comparador excede o no alcanza el rango de voltajes de referencia, la lógica funcionará de una manera no deseada. La fuente de alimentación deberá observarse a través de una ventana cuyos límites están entre 0.01V y 1V. Por lo anterior se le ha dado el nombre de *detector de ventana*. Este circuito a veces se conoce también como *detector límite de doble extremo*.

El circuito de la figura 4.11 funciona de la manera siguiente: Si el voltaje en la entrada (+) del LM339 es mayor que el voltaje en la entrada (-) del mismo, la salida es ALTA. Ahora en caso de que el voltaje en la entrada (-) del LM339 sea mayor que el voltaje en la entrada (+) del mismo, la salida es BAJA. Las entradas a un comparador se pueden considerar como entradas análogas, pero la salida es digital puesto que siempre será ALTA o BAJA. Por esta razón con frecuencia al comparador se le considera convertidor analógico a digital (A-D) de un bit [14]. El anterior análisis se resume en la tabla 4.2:

Tabla 4.2 Resultados comparador de ventana, [Fuente propia].

Comparador de Voltaje	S₁	S₂	S
Vent < 0,01V	1	0	0
0,01V < Vent < 1V	1	1	1
Vent > 1V	0	1	0

Cuando se obtiene como resultado **S=1**, significa que el estado final o salida final del comparador es 5 V o estado alto, lo que se comunica con el PIC18F4550, para alimentar la entrada de RB1 con 5V o como mínimo con 1,6V, y así poder realizarse posteriormente el testeado para indicar el cambio de sentido del péndulo de impacto.

4.5 ETAPA DE POTENCIA PARA SISTEMA DE LIBERACIÓN DEL PÉNDULO

4.5.1 Introducción

Para la etapa que comprende gran parte del proceso de automatización del péndulo de impacto Zwick 5102, se propuso realizar un sistema (ver figura 4.12) que permitiera la liberación automática del péndulo a partir de una orden dada desde la interfaz de usuario. Para tal fin es necesario realizar un diseño del circuito, el cual comprenderá una etapa de potencia que permitirá aumentar el nivel de la señal que proviene del PIC18F4550 del puerto RB2, tras haber ordenado por medio de la interfaz de usuario la liberación del péndulo, incrementando, para ello, la amplitud de la señal de entrada mediante corrientes de polarización en el transistor de salida, que finalmente llegan a una bocina que anuncia que tal proceso está a punto de culminar y que será capaz de liberar el péndulo tras activar el seguro que desde el comienzo de la prueba sostiene al mismo. Y que se activa y por ende se desactiva tras ir obteniendo los resultados de energía y resistencia al impacto para cada una de las pruebas de impacto que se realizan sobre cada probeta del mismo material. Esta etapa de potencia está básicamente constituida por un optoacoplador, en lugar de usar relés ya que tienen una velocidad de conmutación mayor, así como, la ausencia de rebotes y un transistor NPN que activarán y permitirán llevar con éxito tal proceso de liberación.

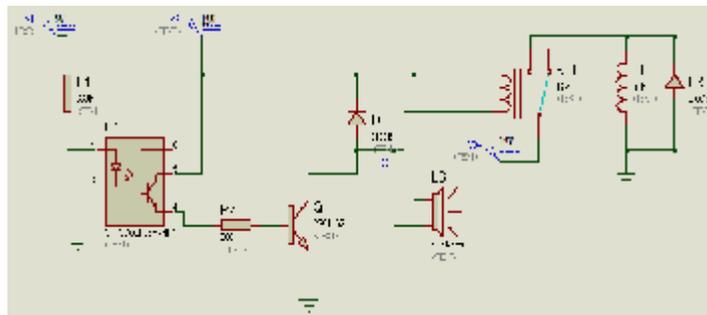


Figura 4.12 Etapa de potencia para liberación del péndulo, [Fuente propia].

4.5.2 Modo de operación

Cuando el pulso que proviene del puerto RB2 del PIC18F4550, está en estado alto o 5V enciende el circuito de la figura 4.12, entonces es en este momento cuando se activa el optoacoplador (2N35) mediante el cual la señal de entrada es aplicada al fotoemisor y la salida es tomada del fotoreceptor (ver figura 4.13), convirtiéndose la señal inicial eléctrica en una señal luminosa modulada y de nuevo en una señal eléctrica que irá directamente a saturar el transistor NPN, quien se comportará a su vez como un interruptor cerrado, el cual alimentará la bobina que mediante la generación del campo magnético y el movimiento de su

núcleo (barra metálica) permite soltar el seguro que mantiene el péndulo en su posición inicial.

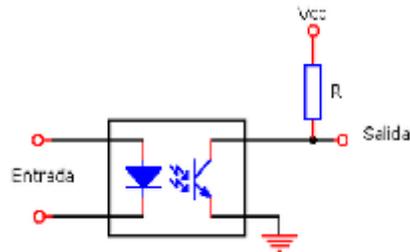


Figura 4.13 Esquema general optoacoplador, [15].

El optoacoplador usado fue el 4N35 de 6 pines de paquete blanco, sus características son: En el diodo emisor de luz el voltaje de entrada del diodo emisor es ($V_{Fmax} = 1,5V$), la potencia de disipación del led es ($PD = 150mW$), los voltajes en el transistor detector son $V_{CBO} = 70V$, $V_{CEO} = 30V$, $V_{ECO} = 7V$ [16].

4.6 COMUNICACIÓN SERIAL

4.6.1 Introducción

La configuración USART, permite la comunicación con un ordenador trabajando en modo *full dúplex* asíncrono o con periféricos trabajando en modo *half duplex* síncrono. En el caso presente se usará la configuración USART, aprovechando que este puede transferir tramos de 8 a 9 bits, además de detectar errores de transmisión. También puede generar interrupciones cuando se produce una recepción de datos o cuando la transmisión ha sido completada. La principal función de USART es la de transmitir o recibir datos en serie. Esta operación puede dividirse en dos categorías; síncrona y asíncrona. La transmisión síncrona utiliza una señal de reloj y una línea de datos, mientras que en la transmisión asíncrona no se envía la señal de reloj, por lo que el emisor y el receptor deben tener relojes con la misma frecuencia y fase. Cuando la distancia entre el emisor y el receptor es pequeña se suele utilizar la transmisión síncrona, mientras que para distancias mayores se utiliza la transmisión asíncrona. Básicamente, la transmisión serie consiste en enviar los datos bit a bit a través de una línea común en periodos de tiempo fijos, dando lugar a la llamada *velocidad de transmisión* o número de bits enviados por segundo (baudios). En el modo asíncrono se emplea relojes tanto en el emisor como en el receptor. Ambos relojes deben ser de igual frecuencia y deben estar en fase o sincronizados. La frecuencia del reloj se acuerda antes de la transmisión configurando la velocidad mientras que la sincronización se realiza durante la transmisión. Cada tramo de datos tiene un

tamaño y posee un bit inicial o de arranque (start) y un bit de parada (stop) que permiten realizar dicha sincronización [17].

Cuando se opera en modo asíncrono no existe una línea de reloj común que establezca la duración de un bit y el carácter puede ser enviado en cualquier momento (Ver Figura 4.14). Esto conlleva que cada dispositivo tiene su propio reloj y que previamente se ha acordado que ambos dispositivos transmitirán datos a la misma velocidad. Durante el intervalo de tiempo en que no son transferidos caracteres, el canal debe poseer un "1" lógico. Al bit de parada se le asigna también un "1". Al bit de inicio del carácter a transmitir se le asigna un "0". Por todo lo anterior, un cambio de nivel de "1" a "0" lógico le indicará al receptor que un nuevo carácter será transmitido [18].

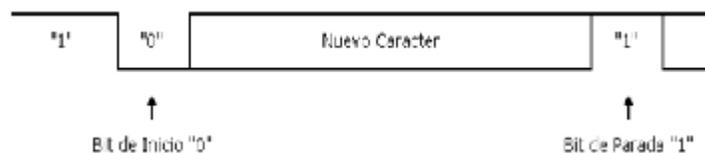


Figura 4.14 Transmisión Asíncrona, [18].

4.6.2 RS232 en el PC

El puerto serie de un ordenador trabaja en modo asincrónico y es la norma más usada en la implementación de aplicaciones. El puerto serie recibe y envía información fuera del ordenador mediante un determinado software de comunicación o un driver del puerto serie. La información se envía al puerto carácter a carácter. Cuando se ha recibido un carácter, el puerto serie envía una señal por medio de una interrupción indicando que el carácter está listo. Cuando el ordenador ve la señal, los servicios del puerto serie leen el carácter [19]. La implementación de esta norma RS232, en el montaje electrónico de control de la Máquina Zwick 5102 requiere del uso del integrado MAX232 en conjunto con el puerto serial (este se ha configurado con una velocidad de 1200 baudios y 8 bits de transmisión).

4.6.3 MAX 232

El MAX232 es un circuito integrado que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 a niveles TTL y viceversa. Lo interesante es que sólo necesita una alimentación de 5V, ya que genera internamente algunas tensiones que son necesarias para el estándar RS232 [19].

El MAX232 soluciona la conexión necesaria para lograr comunicación entre el puerto serie de un PC y cualquier otro circuito con funcionamiento en base a

señales de nivel TTL/CMOS. El circuito integrado posee dos convertidores de nivel TTL a RS232 y otros dos que, a la inversa, convierten de RS232 a TTL. Estos convertidores son suficientes para manejar las cuatro señales más utilizadas del puerto serie del PC, que son TX, RX, RTS y CTS. Donde TX es la señal de transmisión de datos, RX es la de recepción, y RTS y CTS se utilizan para establecer el protocolo para el envío y recepción de los datos [20].

En la Figura 4.15 se muestra el esquema para el MAX 232 y el PIC 18F4550 en la plantilla de ISIS PROTEUS.

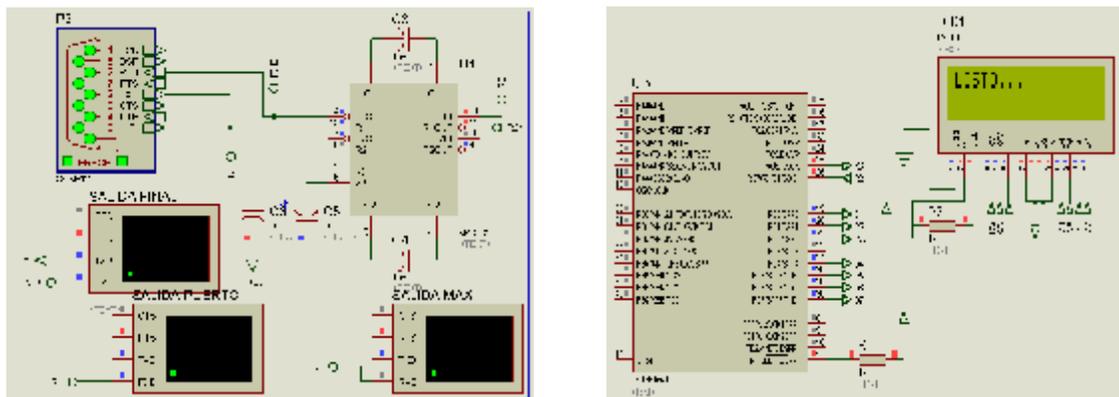


Figura 4.15 Configuración del MAX232 con puerto serial, [Fuente Propia].

Haciendo uso de la herramienta ISIS PROTEUS quien proporciona una potente componente que permite la simulación a través del puerto serie: COMPIM. La configuración del puerto se realiza como cualquier componente y se pueden cambiar todas las propiedades del puerto serie: números de puerto, velocidad, paridad, número de bits, etc [17].

4.7 INTERFAZ

4.7.1 Introducción

Visual Basic Studio Professional 2008 es una herramienta eficaz capaz de crear aplicaciones y componentes plenamente funcionales que se pueden compartir con otros usuarios. Todos los objetos en el lenguaje de Visual Basic, incluidos los formularios y controles, tienen sus propias propiedades, métodos y eventos. Las propiedades pueden considerarse como los atributos de un objeto, los métodos como sus acciones y los eventos como sus respuestas [21].

En los puntos a tener en cuenta en el diseño de la interfaz es la comunicación que se desarrollara entre el software y el circuito electrónico controlador. Este se hace mediante la herramienta Virtual Serial Port Driver (VSPD), un software que permite emular múltiples puertos RS232 (hasta 254 pares), en pares conectados entre

sí. Es decir VSPD crea siempre un par de puerto que se comunican entre sí. Donde el dato transmitido por uno es recibido por el otro puerto y viceversa [22].

4.7.2 Guía de usuario de la interfaz

1. El usuario se encontrara con una pantalla de presentación donde encontrara las opciones a ser manipuladas para la presentación de resultados de cada prueba (Ver Figura 4.16).



Figura 4.16 Pantalla de presentación inicial, [Fuente Propia].

En la Figura 4.17 se encuentra los datos característicos los cuales influyen en los resultados de la prueba, nombre del operario, fecha de realización e identificación de probeta. El inicio de la prueba se da cuando se ingresa al *menú* (superior izquierda), desde la opción INICIAR PRUEBA. La interfaz propuesta permite el ingreso de cada uno de los datos de forma secuencial, de tal forma que estos se capturen y el usuario no tenga manera de modificarlos.

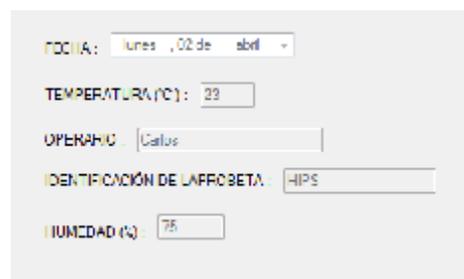


Figura 4.17 Características del Ensayo, [Fuente Propia].

2. Cuando el operario llega a la caja de texto de la humedad la interfaz inicia las especificaciones del tipo de péndulo y prueba que se desarrollará. Las opciones mostradas en la parte superior derecha son orientadas a las condiciones del ensayo, para la energía del péndulo el usuario cuenta con péndulos de 0,5 J, 1J,

2J Y 4J; para los tipos de prueba de impacto con Ensayo Charpy, Ensayo Izod y Ensayo Tracción Por Impacto (Ver Figura 4.18).



Figura 4.18 Clasificación del ensayo, [Fuente Propia].

3. Cuando se ha finalizado la clasificación del ensayo el programa habilita la opción para iniciar la primera prueba, este a su vez indica las casillas que el usuario debe ingresar para el cálculo de la energía y resistencia de impacto. Cuando se tiene la totalidad de los datos se habilita el botón liberar péndulo el cual es la comunicación con el circuito electrónico de control y la liberación del péndulo. De esta forma se muestran los datos de la energía de impacto y la resistencia de impacto en los cuadros de textos adecuados como se puede observar en la Figura 4.19.

	ANCHO	PROFUNDIDAD RAMBLA	ENERGIA IMPACTO	RESISTENCIA DE IMPACTO	TIPO FRACTURA
PRUEBA 1	2	3	0,4241	0,0707	H
PRUEBA 2	3	4	0,4507	0,1007	H
PRUEBA 3	3	5	0,4284	0,1001	H
PRUEBA 4					
PRUEBA 5					

Figura 4.19 Obtención de Resultados, [Fuente Propia].

4. Al final de la fila de datos de cada prueba se encuentra el tipo de fractura que para el caso de los ensayos Charpy e Izod, despliegan las siguientes alternativas: C (Falla completa), H (Falla incompleta con ángulo menor a 90°), P (Falla incompleta con ángulo mayor a 90°) y NB (No falla) (Ver Figura 4.20).



Figura 4.20 Tipo de fallas, [fuente propia].

En el caso de la prueba tracción de impacto aparecerá en este ítem solo la opción de falla completa. La obtención de resultados aparece en la parte central de la

presentación, su programación no permite que se reingresen datos en las pruebas y en cada opción se elabora la validación respectiva para el valor de “0”.

5. Luego de realizar las pruebas, la interfaz habilita las opciones para promedio y desviación estándar (muestral), con las cuales se completa el reporte de los datos de la probeta impactada (Ver Figura 4.21).



PROMEDIO	2.0000	4.0000	0.4275	0.0348
DESVIACIÓN				

Figura 4.21 Promedio y desviación de los datos, [Fuente Propia].

6. Para iniciar el ensayo con otra probeta el operario debe remitirse a la parte superior en el *menú* en opción salir.

7. Las opciones de guardar e imprimir se encuentran incluidas en el *menú*.

4.8 MOLDEADO

4.8.1 Introducción

En la fabricación de las probetas a impactar por el péndulo Zwick 5102, la técnica utilizada fue el moldeo por compresión. El moldeo por compresión se utiliza casi exclusivamente para moldear materiales termoestables, y ocasionalmente para procesar termoplásticos [23]. Estos materiales se encuentran inicialmente en forma de polvos o granzas, a veces incluso son líquidos. Cuando los materiales termoendurecibles se someten a calor y presión, en primer lugar disminuye su viscosidad, hasta alcanzar el estado líquido y luego sufren una reacción química irreversible (polimerización o curado). Los principales materiales termoestables empleados son resinas epoxi, fenólicas, poliésteres, poliuretanos y siliconas. Los materiales reforzados de fibras (BMC; bulk moulding compounds) también se suelen procesar mediante esta técnica, así como los materiales espumados [23].

4.8.2 Descripción de la técnica

En el moldeo por compresión el material, bien líquido, o en forma de polvo, granza o de pastillas preformadas (preformas), se coloca en el molde caliente, y éste se cierra lentamente, hasta que las dos mitades del molde ejercen presión sobre el material. Conforme el molde va cerrándose, el material es obligado a ocupar todas las partes de la cavidad de moldeo. En ciertos casos, es ventajoso realizar el moldeo cerrando primeramente el molde casi por completo y abriéndolo después unos segundos antes de aplicar la presión definitiva. De esta forma se deja “respirar” al material, para permitir la evacuación del gas que queda atrapado entre el polvo de moldeo o que es generado en la reacción de polimerización. Una vez

que el molde se ha cerrado completamente se aplica la máxima presión, que provoca el llenado final y completo de la cavidad. Bajo la acción conjunta del calor y la presión tienen lugar las reacciones de entrecruzamiento que transforman al material termoendurecible en termoestable, proceso que se conoce vulgarmente como “curado”. Tras el curado se abre el molde y se extrae la pieza totalmente sólida, que solamente alcanza su rigidez definitiva cuando se ha enfriado totalmente. Cuando la pieza tiene forma complicada o grandes dimensiones, es aconsejable colocarla en conformadores después de extraerla del molde, para evitar que se deforme mientras se enfría (Ver Figura 4.22) [24].

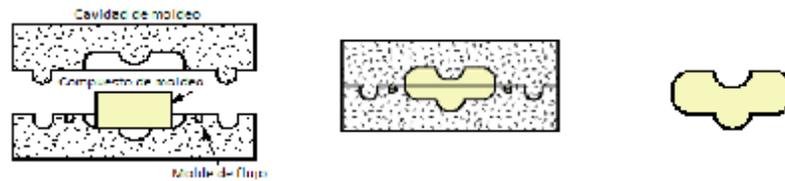


Figura 4.22 Esquema general de la técnica de moldeo, [24].

El ciclo de moldeo, por tanto, podría considerarse el siguiente [25]:

- Apertura del molde.
- Extracción de las piezas moldeadas en el ciclo anterior.
- Preparación del molde, lo que incluye limpieza del molde y lubricación para facilitar la extracción de la pieza siguiente y colocación de las inserciones metálicas, si las hubiera, y del compuesto de moldeo, bien líquido, en forma de polvo o de pastilla.
- Cierre del molde caliente y aplicación de presión.
- Apertura del molde para dejarlo “respirar” y permitir la salida de humedad y materias volátiles.
- Aplicación de toda la presión al molde caliente y mantenimiento durante el tiempo necesario hasta que el material haya curado totalmente.
- Extracción de la pieza.

La temperatura del molde y la presión aplicada son los factores más importantes del proceso. Además de estas variables, otros factores que influyen en la calidad de las piezas moldeadas por compresión son: el diseño de la pieza que debe moldearse, la velocidad de cierre de la prensa, la plasticidad del material y las condiciones en que se encuentra la superficie de la cavidad de moldeo [25].

El moldeo por compresión tiene algunas limitaciones, y no es muy aconsejable cuando se trata de moldear artículos de forma muy complicada con resaltes, entrantes o pequeños taladros laterales. Tampoco es aconsejable para moldear artículos de paredes gruesas (1 cm o más). Valores típicos de temperatura del molde, presión de moldeo y tiempo de moldeo para, por ejemplo, una resina

fenólica son 150-200 °C, 20000 kg/cm² y 1.5 min [25]. Los moldes en moldeo por compresión suelen tener áreas muy elevadas, por lo que las prensas utilizadas deben desarrollar elevadas fuerzas de cierre. La figura 4.23 muestra una prensa típica empleada en moldeo por compresión [25].

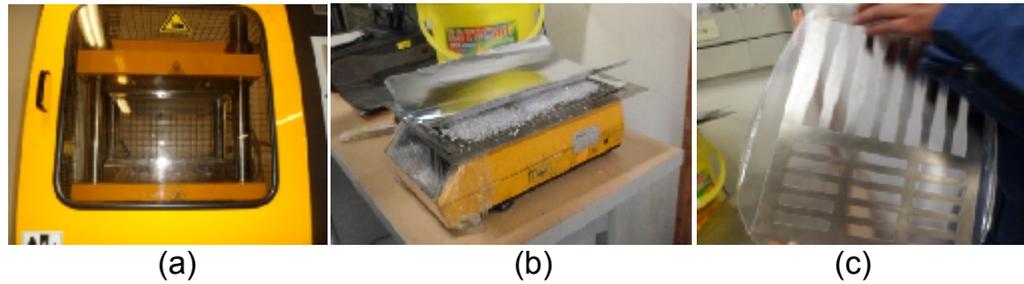


Figura 4.23 Proceso de moldeo por compresión, (a) Prensa para compresión, (b) Preparación del molde, (c) Moldeo terminado, [Fuente Propia].

REFERENCIAS

- [1] Bergquist, Carl. Guide to PICMICRO Microcontrollers, Sams Technical Publications, Indianapolis, 2001.
- [2] PIC microcontrollers, Author: Nebojsa Matic, 2003.
http://elektraku.lt/attachments/File/Studentams/PIC_Microcontrollers_for_Beginners.pdf
- [3] Getting started with PIC microcontrollers, A. L. Stevens, (1997).
- [4] mikroElektronika: books : PIC microcontrollers:
<http://www.mikroe.com/en/books/picbook/picbook.htm>
- [5] Microchip Technology, Mar 2006.
http://ww1.microchip.com/downloads/en/Market_Communication/00890c.pdf
Referenciado en: The PIC microcontroller, 3a ed., May 2000. Y MLAB IDE.
- [6] Microchip Technology Inc, W. Chandler Blvd, 1999.
- [7] Data Sheet PIC18F2455/2550/4455/4550, Microchip, 2004.
- [8] W. H. Gothmann, "Digital Electronics - An introduction to Theory and Practice", Prentice-Hall, USA, 1977.
- [9] National Semiconductor Corporation, LM135/LM235/LM335/LM135A/LM235A/LM335A Precision Temperature Sensors, 1995.
- [10] Microchip Technology Inc., PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet, 2006.
- [11] ELTRA, Encoder Incremental Descripción genreal, Silge Electronica S.A., Argentina, 2000.
- [12] West Instruments S.A., Manual de Aplicación de Encoders, México.
- [13] Todo Robot, Motores de corriente continua (DC).
<http://www.todorobot.com.ar>
- [14] R. F. Coughlin; F. F. Driscoll, Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits, México, 1999.
- [15] W. A. Rosero; M. Tamayo, Construcción de un Bloqueador de Llamadas con un Microcontrolador para Telefonía Fija en el Ecuador, Escuela de Formación de Tecnólogos, Quito, 2010.
- [16] Fairchild Semiconductor Corporation, general Purpose 6-pin Phototransistor Optocouplers, 2002.
- [17] Garcia Breijo E., Compilador C CCS y Simulador Proteus para Microcontroladores PIC, Edición MARCOMBO, S.A, Barcelona-España, Junio 2008.
- [18] Carletti E. J., Comunicación - MAX232 - Conversor TTL-RS232.
- [19] Aeberhard M. y Hamblen J., 8-Bit PIC18 Microcontroller Units, A Technology Review, 2004.
- [20] Serial Port Operation, technical Bulletin 22, CHRONTEL.
- [21] Gaitan E. G., Visual Basic 2008, Granada- Nicaragua
- [22] Comunicación de Visual Basic 2008 con Puerto Serie Virtual Proteus (COMPIM), 2010.

<http://www.eltima.com/products/vspdxp/>

[23] Introduction to Compression Molding, 2012.

http://www.efunda.com/processes/plastic_molding/molding_compression.cfm

[24] Plastics engineering company, sheboygan, U.S.A., 2010.

[25] M. L. Berins, "Plastics Engineering Handbook", Van Nostran Reinhold, New York, 1991.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para cada de los materiales presentados a continuación se realizaron ensayos previos con cada uno de los péndulos disponibles (4J, 2J, 1J y 0,5J) para las pruebas de impacto tipo Izod y tipo Charpy, con el objetivo de seleccionar el péndulo adecuado para cada polímero. De acuerdo a lo anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

5.1 ENSAYO DE IMPACTO TIPO IZOD

- Energía Péndulo: 2J
 Temperatura: 21°C
 Humedad: 58%
 Nombre Probeta: PSAI (POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO)
 Factor de Corrección (F_A): 0,0356J (ver sección 3.5)

Tabla 5.1 Ensayo tipo Izod para PSAI

No. probeta	Ancho (mm)	Profundidad de Entalla (mm)	Energía (J)	Energía (ft-lbf)	Resistencia al Impacto (J/m)	Resistencia al Impacto (ft-lbf/in)	Tipo de fallo ¹
1	2,980	10,160	0,324	0,239	108,825	2,038	C
2	3,010	10,130	0,335	0,247	111,362	2,085	C
3	3,010	10,100	0,324	0,239	107,741	2,018	C
4	3,000	10,140	0,335	0,247	111,733	2,092	C
5	3,020	10,180	0,313	0,231	103,808	1,944	C
Promedio	3,004	10,140	0,326	0,241	108,694	2,035	-
Desviación Estándar	0,006	0,011	0,010	0,010	3,208	0,060	-

- Energía Péndulo: 1J
 Temperatura: 21°C
 Humedad: 54%
 Nombre Probeta: PS D685 (POLIESTIRENO CRISTAL)
 Factor de Corrección (F_A): 0,0341J

¹ Tipo de fractura presente en la probeta después del impacto (ver tabla 2.6).

Tabla 5.2 Ensayo tipo Izod para PS D685

No. Probeta	Ancho (mm)	Profundidad de Entalla (mm)	Energía (J)	Energía (ft-lbf)	Resistencia al Impacto (J/m)	Resistencia al Impacto (ft-lbf/in)	Tipo de fallo ¹
1	3,300	10,160	0,052	0,038	15,818	0,296	C
2	3,260	10,180	0,052	0,038	16,012	0,299	C
3	3,320	10,140	0,066	0,048	19,789	0,370	C
4	3,290	10,100	0,052	0,038	15,866	0,297	C
5	3,310	10,150	0,057	0,042	17,160	0,321	C
Promedio	3,296	10,146	0,056	0,041	16,929	0,317	-
Desviación Estándar	0,008	0,001	0,006	0,006	1,691	0,032	-

- Energía Péndulo: 0,5J
 Temperatura: 22°C
 Humedad: 53%
 Nombre Probeta: ACRÍLICO
 Factor de Corrección (F_A): 0,0167J

Tabla 5.3 Ensayo tipo Izod para Acrílico

No. Probeta	Ancho (mm)	Profundidad de Entalla (mm)	Energía (J)	Energía (ft-lbf)	Resistencia al Impacto (J/m)	Resistencia al Impacto (ft-lbf/in)	Tipo de fallo ¹
1	2,930	10,110	0,031	0,023	10,580	0,198	C
2	3,070	10,110	0,028	0,020	8,990	0,168	C
3	3,010	10,100	0,038	0,028	12,558	0,235	C
4	3,020	10,100	0,033	0,024	10,993	0,206	C
5	2,920	10,140	0,035	0,026	12,157	0,228	C
Promedio	2,990	10,112	0,033	0,024	11,056	0,207	-
Desviación Estándar	0,110	0,006	0,004	0,004	1,411	0,026	-

- Energía Péndulo: 0,5J
 Temperatura: 21°C
 Humedad: 54%
 Nombre Probeta: POLIESTIRENO

Factor de Corrección (F_A): 0,0124J

Tabla 5.4 Ensayo tipo Izod para Poliestireno

No. Probeta	Ancho (mm)	Profundidad de Entalla (mm)	Energía (J)	Energía (ft-lbf)	Resistencia al Impacto (J/m)	Resistencia al Impacto (ft-lbf/in)	Tipo de fallo ¹
1	2,580	10,120	0,160	0,127	62,093	1,163	C
2	2,570	10,110	0,184	0,145	71,692	1,342	C
3	2,600	10,110	0,167	0,132	64,231	1,203	C
4	2,580	10,210	0,137	0,110	53,139	0,995	C
5	2,580	10,200	0,177	0,140	68,721	1,287	C
Promedio	2,582	10,150	0,165	0,131	63,975	1,198	-
Desviación Estándar	0,004	0,022	0,018	0,018	7,125	0,133	-

ENSAYO DE IMPACTO TIPO CHARPY

- Energía Péndulo: 0,5J
 Temperatura: 21°C
 Humedad: 58%
 Nombre Probeta: POLEOLEFINA
 Factor de Corrección (F_A): 0,0356J

Tabla 5.5 Ensayo tipo Charpy para Poleolefina

No. Probeta	Ancho (mm)	Profundidad de Entalla (mm)	Energía (J)	Energía (ft-lbf)	Resistencia al Impacto (J/m)	Resistencia al Impacto (ft-lbf/in)	Tipo de fallo ¹
1	3,990	7,250	0,029	0,021	7,183	0,135	C
2	3,990	7,250	0,028	0,021	7,017	0,131	C
3	3,980	7,260	0,025	0,018	6,236	0,117	C
4	4,000	7,270	0,027	0,020	6,686	0,125	C
5	4,000	7,250	0,026	0,019	6,500	0,122	C
Promedio	3,992	7,256	0,027	0,020	6,724	0,126	-
Desviación Estándar	0,008	0,009	0,002	0,002	0,382	0,007	-

- Energía Péndulo: 2J
 Temperatura: 21°C
 Humedad: 58%
 Nombre Probeta: PSAI (POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO)
 Factor de Corrección (F_A): 0,0356J

Tabla 5.6 Ensayo tipo Charpy para Poliestireno de Alto Impacto (PSAI)

No. Probeta	Ancho (mm)	Profundidad de Entalla (mm)	Energía (J)	Energía (ft-lbf)	Resistencia al Impacto (J/m)	Resistencia al Impacto (ft-lbf/in)	Tipo de fallo ¹
1	3,030	7,650	0,503	0,371	166,006	3,108	C
2	2,980	7,650	0,487	0,359	163,423	3,060	C
3	3,030	7,690	0,480	0,354	158,415	2,966	C
4	3,040	7,640	0,495	0,365	162,829	3,049	C
5	3,000	7,680	0,487	0,359	162,333	3,039	C
Promedio	3,016	7,662	0,490	0,362	162,601	3,040	-
Desviación Estándar	0,036	0,009	0,003	0,003	2,735	0,051	-

Para los resultados presentados en las tablas 5.7 y 5.8 se realizó un inter laboratorio realizado en el Laboratorio y Servicios de Materiales y Manufactura de la Universidad de los Andes con el instrumento patrón adecuado un Péndulo de Impacto de referencia Testing Machines Inc., tipo análogo.

- Energía Péndulo: 2ft-Lb
 Temperatura: 24°C
 Humedad: 52%
 Nombre Probeta: PSAI (POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO)
 F_A: 0,030J

Tabla 5.7 Ensayo tipo Izod UNIANDES para Poliestireno de Alto Impacto (PSAI)

No. Probeta	Ancho (mm)	Profundidad de Entalla (mm)	Energía (ft-lbf)	Resistencia al Impacto (ft-lbf/in)	Tipo de fallo
1	2,944	10,109	0,260	2,243	C
2	2,981	10,185	0,250	2,130	C
3	2,945	10,135	0,250	2,156	C
4	3,068	10,135	0,250	2,069	C
5	2,982	10,135	0,240	2,044	C
Promedio	2,984	10,139	0,250	2,128	-
Desviación Estándar	0,050	0,006	0,007	0,081	-

- Energía Péndulo: 2ft-Lb
 Temperatura: 24°C
 Humedad: 52%
 Nombre Probeta: PS D685 (POLIESTIRENO CRISTAL)
 F_A: 0,040J

Tabla 5.8 Ensayo tipo Izod UNIANDES para Poliestireno Cristal (PS D685)

No. Probeta	Ancho (mm)	Profundidad de Entalla (mm)	Energía (ft-lbf)	Resistencia al Impacto (ft-lbf/in)	Tipo de fallo
1	3,293	10,211	0,07	0,539	C
2	3,232	10,211	0,07	0,550	C
3	3,275	10,185	0,07	0,543	C
4	3,223	10,185	0,06	0,473	C
5	3,284	10,235	0,07	0,541	C
Promedio	3,261	10,205	0,07	0,529	-
Desviación Estándar	0,032	0,021	0,005	0,032	-

Tabla 5.9 Energía y Resistencia al Impacto experimental, de ficha técnica y de UNIANDES para los diferentes polímeros en estudio

Nombre del Polímero	Tipo de ensayo	Resistencia experimental (ft-lbf/in)	Resistencia de ficha técnica (ft-lbf/in)	Energía obtenida por laboratorio UNIANDES (ft-lbf/in)	Desviación Estándar (ft-lbf/in)
Poliestireno de Alto Impacto	IZOD	2,035	2,000 ²	2,128	0,060
Poliestireno cristal (685D)	IZOD	0,317	0,300 ³	0,429	0,032
Acrílico	IZOD	0,207	0,200 ⁴	-	0,026
Poliestireno	IZOD	1,198	1,200 ⁵	-	0,113
Poleolefina	CHARPY	0,126	-	-	0,007
Poliestireno de Alto Impacto	CHARPY	3,040	-	-	0,051

De acuerdo con los resultados obtenidos enmarcados en los polímeros evaluados se establecen desviaciones estándar para la resistencia al impacto en un rango de 0,007 a 0,133 ft·lbf/in, lo cual indica el buen funcionamiento de los datos arrojados por la interfaz electrónica del Péndulo de Impacto. Con tal desviación es posible hacer un reporte confiable de los resultados del equipo para el ensayo Izod, de acuerdo a esta observación se calcula el error, con el promedio de resistencia al impacto y el valor real (reportado en la literatura).

Tales condiciones se citan a continuación: en el proceso de moldeo los materiales poliméricos se ven influenciados por el ciclo de presión y temperatura, dándose el caso de que se produzcan burbujas en el molde y por tanto se introduzca esfuerzos adicionales en la probeta. Adicionalmente, materiales como el Acrílico y el Poliestireno fueron cortados a partir de del material en lámina, para lo cual no se reguló la velocidad de corte, parámetro que influye en la probeta, debido a la posibilidad de que el corte genere calentamiento en la probeta y por tanto se modifiquen de forma irreversible propiedades en la muestra.

² STYRON ® 484 por AmericasStyrenics

³ HH104 por Resirene ®

⁴ Acrílico genérico por GAREN ®

⁵ Poliestireno por LERMONT PLASTICS S.A.

Entre los parámetros que influyen en la respuesta de los materiales poliméricos, están la temperatura ambiente y humedad relativa, requeridas en el momento de la realización de la prueba, las cuales no fueron posibles controlar con los recursos disponibles, por lo cual los ensayos se desarrollaron a una temperatura y humedad relativa, alrededor de 21°C y 58%, valores dentro del rango establecido por la norma ASTM D256. Estos factores tienen trascendencia debido a su influencia en las propiedades mecánicas generando transiciones plásticas internas que transformarán las condiciones iniciales del material moldeado.

Según la norma ASTM D256, para la profundidad de la ranura se permite un margen de error de $10,16 \pm 0,05\text{mm}$, este ítem es fundamental en la determinación de la propagación de la fractura en la probeta, ya que si la profundidad es mayor entonces habrá una disminución considerable en la energía absorbida. Dentro del mismo parámetro de dimensiones se encuentra el rango permitido para el ancho de las probetas (3,00 - 12,70mm), esta medida establece también la cantidad de energía absorbida, es decir, si hay grosor mayor en la probeta será mayor la energía necesaria para fracturarla.

Todos los factores mencionados líneas atrás son determinantes en el momento de reportar los resultados arrojados por el equipo. De acuerdo con la norma ASTM D256 se establece una corrección para la energía resultante, según las pérdidas de energía debido a la fricción con el aire y el rozamiento del péndulo con los soportes, esta energía de corrección se establece realizando pruebas con cada péndulo sin probeta, determinando así la energía de impacto total corregida y la desviación de los valores entregados para cada material.

CONCLUSIONES

- Con el desarrollo de una tarjeta electrónica eficiente se logró obtener una interfaz de usuario confiable para la instrumentación del Péndulo de Impacto Zwick 5102, que permite la inspección y desarrollo de las distintas pruebas de impacto en materiales poliméricos de una manera accesible y segura para el operario.
- A través de esta interfaz de usuario para el Péndulo de Impacto Zwick 5102 es posible obtener el valor de la Energía y Resistencia al Impacto por medio de las respectivas pruebas Izod, Charpy y Tracción Impacto, dentro de un rango de precisión confiable y al mismo tiempo aceptable con base a las normas de estandarización para ensayos de impacto.
- Es posible garantizar la seguridad para realizar reportes a nivel industrial ya sea local o nacional esto teniendo en cuenta que los resultados obtenidos (capítulo 5) presentan errores muy bajos y gran precisión con respecto a los valores presentados tanto por las fichas técnicas como los realizados por medio de un interlaboratorio en la Universidad de los Andes, por lo cual es posible habilitar tales ensayos de impacto y permitir realizar la caracterización mecánica de materiales poliméricos por medio de este péndulo Zwick 5102 apoyado en las normas ASTM D256 “Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics”, ASTM D6110 “Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics”, Y ASTM D1822 “Standard Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials” para la realización de los ensayos Izod, Charpy y Tracción por Impacto respectivamente.
- En el presente proyecto no se muestran resultados cuantitativos de Tracción por Impacto de materiales poliméricos, debido a que no se cuenta con el yunque de sujeción adecuado para la realización del ensayo. El diseño del mismo requería de más de tres meses para su diseño y construcción, lo cual retrasaría la culminación de este proyecto.
- Correlacionando el Péndulo de impacto Zwick 5102 con otros equipos análogos, es posible garantizar que el tiempo de ejecución desde el momento en que se ingresan los datos medidos a la interfaz hasta el momento en que se obtiene los valores finales para la energía y la resistencia al impacto en cada tipo de ensayo, es notablemente menor,

debido a que se cuenta con un equipo automatizado el cual asegura mayor eficacia.

- A partir de los resultados de energía y resistencia al impacto para los materiales poliméricos estudiados (capítulo 5) y sometidos a la prueba de Impacto Izod, fue posible obtener una calibración del equipo gracias a las medidas tomadas a través de un inter laboratorio realizado en el Laboratorio y Servicios de Materiales y Manufactura de la Universidad de los Andes con el instrumento patrón adecuado un péndulo de impacto de referencia Testing Machines Inc., tipo análogo (ver tabla 5.5).

PERSPECTIVAS DEL TRABAJO

Para aumentar el grado de automatización del proyecto, es recomendable implementar un brazo robotizado encargado del cambio de muestras, y un sistema el cual retire los residuos de las mismas una vez finalizado el ensayo de impacto.

La implementación de péndulos con energías superiores a 4 Joule, con el objetivo de tener un mayor rango de energías y así ampliar los servicios con el péndulo de impacto Zwick 5102 para materiales con energías de impacto altas.

Es recomendable la instalación de un montaje para la máquina que proteja al operario de las esquirlas producidas al efectuar las pruebas.

Para tener conocimiento acerca del uso de la máquina, es posible habilitar la opción de un contador de pruebas, el cual permita inferir cuando es el momento apropiado para realizar el respectivo mantenimiento a las partes mecánicas del péndulo.

Disponer de un sistema que permita sensar y al mismo tiempo cuente con una alarma la cual informe acerca de si se encuentra o no nivelada la máquina antes de realizar cualquier prueba.

Instalar un sensor de humedad relativa que permita capturar este valor para ser registrado en el formulario de resultados.

Debido a que el montaje para la prueba Izod fue un diseño propio, se sugiere realizar un diseño y construcción para obtener una pieza con todos los parámetros mínimos requeridos como por ejemplo una dureza igual o cercana a la de los péndulos Izod, y obtener resultados óptimos durante los ensayos de este tipo.