



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**Comparación de la Resistencia al Esfuerzo Cortante entre el  
PET y Maderas utilizadas en Fortificación Minera**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO EN MINAS**

**Autoras:**

**JOSELINE GABRIELA CHÁVEZ LÓPEZ**

**SELENA PAULINA HIDALGO BRITO**

**Director:**

**GIL TARQUINO ALVAREZ PACHECO**

**CUENCA – ECUADOR**

**2019**

## **DEDICATORIA**

La culminación de esta tesis se la dedico a Dios, por darme el don de la vida, por ser quien guía mis pasos por su camino y me da la sabiduría para formarme tanto espiritual como profesional. Por sostenerme en los momentos difíciles de mi vida y la inmensa misericordia que tiene conmigo.

En memoria de mis abuelitas Judith y Laurita, con todas las fuerzas de mi corazón, con inmenso amor y cariño. Por ser luz en mi vida y ser esos ángeles que me cuidan siempre.

A mis padres Edison y Patricia quienes son mis guías, por brindarme siempre su amor, velar por mí, motivarme a ser mejor persona con su apoyo incondicional y por la gran paciencia que me tienen.

A mis hermanos Daniel y Emilia por ser la alegría de mi vida, mi compañía, mis confidentes y una de mis razones para alcanzar mis metas e ideales.

A toda mi familia de manera especial a Miguel por su gran amor de abuelo, apoyo y por trasmitirme la fe.

Y finalmente a Edison, por su amor incondicional y por estar conmigo siempre en los buenos y no tan buenos momentos.

**Gabriela Chávez López**

## **DEDICATORIA**

La presente tesis se lo dedico principalmente a Dios por todas sus bendiciones y fortaleza que me ha brindado en el transcurso de estos años de mi vida y carrera universitaria.

A mis padres Gustavo y Jenny, por todo su amor, cariño y esfuerzo para que no me rindiera y pudiera cumplir mis sueños.

A mis hermanos Jenniffer, Gabriel y Aldahir por apoyarme en todo momento y siempre estar a mi lado.

**Selena Hidalgo Brito**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos primeramente a la Escuela de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay, por habernos permitido formar parte de la carrera y culminar nuestra formación académica.

A nuestro director de tesis el Ing. Gil Álvarez por su paciencia, ayuda y tiempo brindado en el transcurso de este proceso ya que gracias a su amplio conocimiento en la materia, se pudo terminar con éxito el presente trabajo.

Queremos agradecer en especial al Ing. Patricio Feijoo, por ser una excelente persona y habernos brindado apoyo incondicional en todo el trascurso de nuestra carrera universitaria.

De igual manera al Ing. Leonardo Núñez, Ing. Fernando Valencia, Ing. Federico Auquilla y Dr. Juan Calderón por el conocimiento compartido.

A todos nuestros queridos compañeros de curso en especial a Erick Zhunio, por todos los momentos especiales y experiencias vividas que quedaran en nuestras memorias.

Y finalmente al Ing. Cesar Chica por habernos permitido realizar una parte de nuestro proyecto en su empresa INMEPLAST S.A.

**Gabriela y Selena**

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

DEDICATORIA .....iii

AGRADECIMIENTOS .....iv

ÍNDICE DE CONTENIDOS..... v

ÍNDICE DE FIGURAS..... x

ÍNDICE DE TABLAS .....xii

ÍNDICE DE ANEXOS.....xiv

RESUMEN.....xv

ABSTRACT .....xvi

INTRODUCCIÓN..... 1

**CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO..... 3**

    1.1 Fortificación en minas..... 3

    1.2. Tipos de fortificación..... 4

        1.2.1. Fortificación rígidas ..... 4

        1.2.2. Fortificación flexible..... 4

        1.2.3. Fortificación mixta: ..... 5

    1.3. Fortificación en madera ..... 6

        1.3.1. Marcos de madera..... 6

    1.4. Características generales de las maderas usadas en fortificación..... 7

    1.5. Propiedades físico - químicas de las maderas usadas en fortificación ..... 8

        1.5.1. Anisotropía ..... 8

        1.5.2. Elasticidad ..... 9

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 1.5.3.   | Plasticidad .....                                | 9  |
| 1.5.4.   | Higroscopicidad.....                             | 9  |
| 1.5.5.   | Densidad.....                                    | 9  |
| 1.5.6.   | Deformaciones por torsión .....                  | 10 |
| 1.5.7.   | Propiedades térmicas .....                       | 10 |
| 1.5.8.   | Propiedades eléctricas.....                      | 10 |
| 1.5.9.   | Contenido de humedad .....                       | 10 |
| 1.6.     | Propiedades mecánicas de las maderas .....       | 12 |
| 1.7.     | Esfuerzo cortante .....                          | 15 |
| 1.7.1.   | Cortante simple.....                             | 16 |
| 1.7.2.   | Cortante en madera .....                         | 16 |
| 1.7.3.   | Aplicaciones en perforación.....                 | 17 |
| 1.8.     | Polietileno de tereftalato (PET).....            | 17 |
| 1.8.1.   | Cadena polimérica .....                          | 18 |
| 1.8.2.   | Ventajas y desventajas del PET.....              | 19 |
| 1.8.3.   | Características físicas y químicas del PET ..... | 21 |
| 1.8.4.   | Métodos de reciclajes.....                       | 22 |
| 1.8.4.1. | Reciclaje mecánico .....                         | 22 |
| 1.8.4.2. | Reciclado químico .....                          | 22 |
| 1.8.4.3. | Reciclaje con recuperación de energía .....      | 23 |
| 1.8.4.4. | Reciclaje primario .....                         | 23 |
| 1.8.4.5. | Reciclaje secundario .....                       | 24 |
| 1.8.4.6. | Reciclaje terciario .....                        | 25 |
| 1.9.     | Granulometría de suelos.....                     | 26 |
| 1.9.1.   | Granulometría de los agregados finos .....       | 26 |

|  |           |
|--|-----------|
| 1.9.2. Tipos de granulometría .....  | 27        |
| 1.10. Análisis granulométrico.....   | 27        |
| 1.10.1 Curvas granulométricas .....  | 28        |
| 1.10.2. Tamización .....   | 29        |
| <br>   |           |
| <b>CAPÍTULO II DISEÑO DEL ACCESORIO PARA EL ENSAYO AL<br/>ESFUERZO CORTANTE, ELABORACIÓN DE PROBETAS Y<br/>PROCEDIMIENTO .....</b> | <b>31</b> |
| <br>   |           |
| 2.1. Diseño de accesorio para ensayo del Esfuerzo Cortante .....   | 31        |
| 2.1.1. Descripción de la prensa .....  | 32        |
| 2.1.2. Determinación de las partes del accesorio.....  | 33        |
| 2.1.2.1. Descripción de las partes .....   | 36        |
| 2.2. Descripción de muestras de PET.....   | 37        |
| 2.2.1. PET.....  | 37        |
| 2.2.2. Arena .....   | 38        |
| 2.2.3. Forma y tamaño .....  | 40        |
| 2.2.4. Diseño de las muestras de PET .....   | 40        |
| 2.2.4.1. Descripción de las muestras de PET.....   | 41        |
| 2.3. Procedimiento de realización de probetas de PET – Arena .....   | 46        |
| 2.3.1. Preparación de la arena.....  | 46        |
| 2.3.2. Preparación del PET.....  | 48        |
| 2.3.3. Fabricación de las probetas de PET .....  | 49        |
| 2.3.4. Caracterización de las probetas de PET .....  | 52        |
| 2.4. Ejecución experimental en las probetas de PET.....  | 56        |
| 2.5. Descripción de las probetas de madera.....  | 58        |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.5.1. Caracterización de las probetas de madera.....  | 58        |
| 2.5.1.2 Eucalipto .....  | 60        |
| 2.5.1.3 Teca.....  | 62        |
| 2.6. Ejecución experimental en las muestras de madera .....                                    | 64        |
| <b>CAPÍTULO III EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....</b>  | <b>69</b> |
| 3.1. Interpretación de resultados .....  | 69        |
| 3.2. Tablas de resultados.....   | 70        |
| 3.2.1. Resultados del PET .....  | 70        |
| 3.2.2. Resultados de la resistencia al esfuerzo cortante de eucalipto .....                    | 71        |
| 3.2.3. Resultados de la resistencia al esfuerzo cortante de pino.....                          | 72        |
| 3.2.4. Resultados de la resistencia al esfuerzo cortante de teca .....                         | 72        |
| 3.2.5. Tabla general de resultados de la resistencia al esfuerzo cortante de las maderas ..... | 73        |
| 3.3. Gráficas de resultados de la resistencia al esfuerzo cortante .....                       | 74        |
| 3.3.1. Diagrama de esfuerzo cortante del PET .....   | 74        |
| 3.3.2. Diagrama de esfuerzo cortante de las maderas.....                                       | 75        |
| 3.3.2.1. Diagrama de esfuerzo cortante del eucalipto .....                                     | 75        |
| 3.3.2.1. Diagrama de esfuerzo cortante del pino.....   | 76        |
| 3.3.2.1. Diagrama de esfuerzo cortante de la teca.....   | 77        |
| 3.4. Comparación de la resistencia al esfuerzo cortante y compresión simple.....               | 78        |
| 3.4.1. PET.....  | 79        |
| 3.4.1.1. Relación $\tau/\sigma$ en el PET.....   | 79        |
| 3.4.2. Madera.....   | 82        |



|  |           |
|--|-----------|
| 3.4.2.1. Relación $\tau/\sigma$ en la madera .....       | 84        |
| 3.4.2.1. Eucalipto .....                                 | 85        |
| 3.4.2.2. Pino .....                                      | 86        |
| 3.4.2.3. Teca.....                                       | 87        |
| 3.5. Análisis de resultados .....                        | 88        |
| 3.5.1. Evaluación del $\tau$ entre maderas.....          | 88        |
| 3.5.2. Evaluación entre $\tau$ PET y $\tau$ madera. .... | 89        |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>              | <b>91</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                                | <b>93</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                      | <b>96</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 Marcos de madera .....   | 6  |
| Figura 1.2 Componentes de la madera.....  | 7  |
| Figura 1.3 Compresión perpendicular a la fibra de la madera .....                       | 13 |
| Figura 1.4 Compresión paralela a la fibra de la madera .....                            | 13 |
| Figura 1.5 Pandeo de la madera.....   | 14 |
| Figura 1.6 Flexión de la madera .....   | 15 |
| Figura 1.7 Efecto del contenido de humedad en la resistencia al cortante en la madera . | 16 |
| Figura 1.8 Cadena polimérica del Poliéster (PET) .....                                  | 18 |
| Figura 2.1 Prensa hidráulica .....  | 32 |
| Figura 2.2 Accesorio para el ensayo al esfuerzo cortante.....                           | 33 |
| Figura 2.3 Vista frontal del accesorio para el ensayo al esfuerzo cortante en mm .....  | 34 |
| Figura 2.4 Vista lateral del accesorio para el ensayo al esfuerzo cortante.....         | 35 |
| Figura 2.5 Grano de Polietileno de Tereftalato .....                                    | 38 |
| Figura 2.6 Arena .....  | 39 |
| Figura 2.7 Curva granulométrica.....  | 47 |
| Figura 2.8 Curva de fusión del PET .....  | 51 |
| Figura 2.9 Curva de enfriamiento de las probetas de PET.....                            | 52 |
| Figura 2.10 Muestras de PET .....   | 56 |
| Figura 2.11 Resistencia al esfuerzo cortante .....                                      | 57 |
| Figura 2.12 Probetas sometidas a ensayo.....  | 57 |
| Figura 2.13 Resistencia al esfuerzo cortante .....                                      | 65 |
| Figura 2.14 Probetas de eucalipto, pino y teca en estado natural.....                   | 66 |
| Figura 2.15 Probetas de eucalipto, pino y teca sumergidas 1 semana .....                | 66 |
| Figura 2.16 Probetas de eucalipto, pino y teca sumergidas 2 semana .....                | 67 |
| Figura 2.17 Probetas de eucalipto, pino y teca sumergidas 4 semana .....                | 67 |
| Figura 2.18 Probetas de eucalipto, pino y teca sumergidas 8 semana .....                | 68 |
| Figura 3.1 Esfuerzo cortante en el PET .....  | 74 |
| Figura 3.2 Esfuerzo cortante en el eucalipto .....                                      | 75 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.3 Esfuerzo cortante en el pino .....  | 76 |
| Figura 3.4 Esfuerzo cortante en la teca .....  | 77 |
| Figura 3.5 Comparación compresión simple y esfuerzo cortante del PET .....             | 81 |
| Figura 3.6 Comparación entre compresión simple y esfuerzo cortante del eucalipto ..... | 85 |
| Figura 3.7 Comparación entre compresión simple y esfuerzo cortante del pino .....      | 86 |
| Figura 3.8 Comparación entre compresión simple y esfuerzo cortante de la teca .....    | 87 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1 Disminución dimensional con porcentajes de humedad ..... | 11 |
| Tabla 1.2 Características del PET.....                             | 21 |
| Tabla 1.3 Tipos de tamices.....                                    | 29 |
| Tabla 2.1 Características del PET de Inmeplast .....               | 38 |
| Tabla 2.2 Características de la arena.....                         | 39 |
| Tabla 2.3 Composición muestra N° 1 .....                           | 41 |
| Tabla 2.4 Composición muestra N° 2 .....                           | 41 |
| Tabla 2.5 Composición muestra N° 3 .....                           | 42 |
| Tabla 2.6 Composición muestra N° 4 .....                           | 42 |
| Tabla 2.7 Composición muestra N° 5 .....                           | 43 |
| Tabla 2.8 Composición muestra N° 6 .....                           | 43 |
| Tabla 2.9 Composición muestra N° 7 .....                           | 44 |
| Tabla 2.10 Composición muestra N° 8 .....                          | 44 |
| Tabla 2.11 Composición muestra N° 9 .....                          | 45 |
| Tabla 2.12 Composición muestra N° 10 .....                         | 45 |
| Tabla 2.13 Análisis granulométrico .....                           | 47 |
| Tabla 2.14 Características de la probeta 1 .....                   | 52 |
| Tabla 2.15 Características de la probeta 2 .....                   | 53 |
| Tabla 2.16 Características de la probeta 3 .....                   | 53 |
| Tabla 2.17 Características de la probeta 4 .....                   | 53 |
| Tabla 2.18 Características de la probeta 5 .....                   | 54 |
| Tabla 2.19 Características de la probeta 6 .....                   | 54 |
| Tabla 2.20 Características de la probeta 7 .....                   | 54 |
| Tabla 2.21 Características de la probeta 8 .....                   | 55 |
| Tabla 2.22 Características de la probeta 9 .....                   | 55 |
| Tabla 2.23 Características de la probeta 10.....                   | 55 |
| Tabla 2.24 Características de la probeta 1 .....                   | 58 |
| Tabla 2.25 Características de la probeta 2 .....                   | 59 |
| Tabla 2.26 Características de la probeta 3 .....                   | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2.27 Características de la probeta 4 .....  | 59 |
| Tabla 2.28 Características de la probeta 5 .....  | 60 |
| Tabla 2.29 Características de la probeta 6 .....  | 60 |
| Tabla 2.30 Características de la probeta 7 .....  | 61 |
| Tabla 2.31 Características de la probeta 8 .....  | 61 |
| Tabla 2.32 Características de la probeta 9 .....  | 61 |
| Tabla 2.33 Características de la probeta 10.....  | 62 |
| Tabla 2.34 Características de la probeta 11.....  | 62 |
| Tabla 2.35 Características de la probeta 12.....  | 63 |
| Tabla 2.36 Características de la probeta 13.....  | 63 |
| Tabla 2.37 Características de la probeta 14.....  | 63 |
| Tabla 2.38 Características de la probeta 15.....  | 64 |
| Tabla 3.1 Resultado de esfuerzos máximos ( $\tau$ ) en MPa del PET .....                                      | 70 |
| Tabla 3.2 Resultado de esfuerzos máximos ( $\tau$ ) en MPa del eucalipto.....                                 | 71 |
| Tabla 3.3 Resultado de esfuerzos máximos ( $\tau$ ) en MPa del pino .....                                     | 72 |
| Tabla 3.4 Resultado de esfuerzos máximos ( $\tau$ ) en MPa de teca.....                                       | 72 |
| Tabla 3.5 Resultados finales de eucalipto, pino y teca .....  | 73 |
| Tabla 3.6 Resultados obtenidos de la resistencia a la compresión simple en el PET .....                       | 79 |
| Tabla 3.7 Comparación de resultados con ensayos a la compresión simple del PET .....                          | 80 |
| Tabla 3.8 Resultados obtenidos de la resistencia a la compresión simple en el eucalipto,<br>pino y teca ..... | 82 |
| Tabla 3.9 Probetas de eucalipto, pino y teca .....  | 84 |
| Tabla 3.10 Comparación de resultados con ensayos a la compresión simple del<br>eucalipto, pino y teca .....   | 83 |
| Tabla 3.11 Resistencia al esfuerzo cortante con los mismos contenidos de humedad ....                         | 88 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

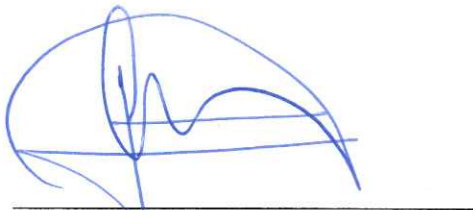
|  |     |
|--|-----|
| Anexo 1 Descripción de aceros ASSAB – SKF.....                           | 97  |
| Anexo 2 Cadena polimérica del Poliéster (PET).....                       | 98  |
| Anexo 3 Medición del peso de las probetas sumergidas en agua.....        | 99  |
| Anexo 4 Proceso de tamización.....                                       | 99  |
| Anexo 5 Fundición de PET y arena .....                                   | 100 |
| Anexo 6 Molde para probetas de PET .....                                 | 100 |
| Anexo 7 Proceso de vaciado del material al molde .....                   | 101 |
| Anexo 8 Molde con el material fundido .....                              | 101 |
| Anexo 9 Prensa hidráulica.....   | 102 |
| Anexo 10 Accesorio para ensayo al esfuerzo cortante .....                | 102 |
| Anexo 11 Pruebas de resistencia al esfuerzo cortante en el PET .....     | 103 |
| Anexo 12 Pruebas de resistencia al esfuerzo cortante en las maderas..... | 103 |

**COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE ENTRE  
EL PET Y MADERAS UTILIZADAS EN FORTIFICACIÓN MINERA**

**RESUMEN**

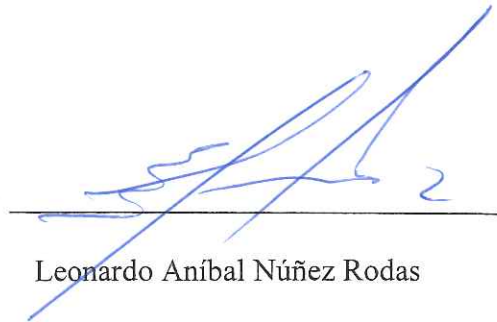
Este trabajo tiene como objetivo determinar el comportamiento al esfuerzo cortante del Polietileno de Tereftalato (PET) y madera, bajo diferentes condiciones de humedad. En el caso del PET se considera como una alternativa al uso de madera en fortificación minera. Para lo planteado se propuso el análisis en 3 tipos de madera más utilizadas en minería: Eucalipto, Pino y Teca, considerando para el proceso distintos tiempos de inmersión en agua, mientras que el PET en combinación de porcentajes y granulometrías de arena. Los ensayos se realizaron con una carga puntual perpendicular a la fibra en la madera. Para concluir, con los valores obtenidos se tabuló y se realizó una evaluación de los resultados a la resistencia al esfuerzo cortante.

**Palabras clave:** resistencia, esfuerzo cortante, fortificación, humedad, PET, arena.



Gil Tarquino Álvarez Pacheco

**Director del Trabajo de Titulación**



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Coordinador de Escuela**



Joseline Gabriela Chávez López

**Autora**



Selena Paulina Hidalgo Brito

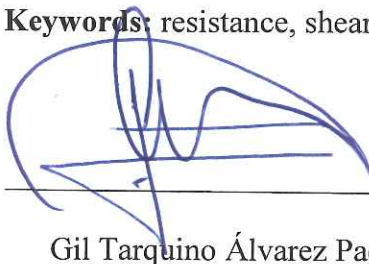
**Autora**

## COMPARISON OF SHEAR STRESS RESISTANCE BETWEEN PET AND WOODS USED IN MINING FORTIFICATION

### ABSTRACT

The objective of this work was to determine the shear stress behavior of Polyethylene Terephthalate (PET) and wood under different moisture conditions. PET is considered as an alternative to the use of wood in mining fortification. The analysis was proposed in the 3 types of wood most commonly used in mining: Eucalyptus, Pine and Teak. Different times of immersion in water were considered for the process, while PET was used in combination of percentages and sand granulometries. The tests were carried out with a point load perpendicular to the fiber in the wood. To conclude, the obtained values were tabulated and an evaluation of the shear resistance results was performed.

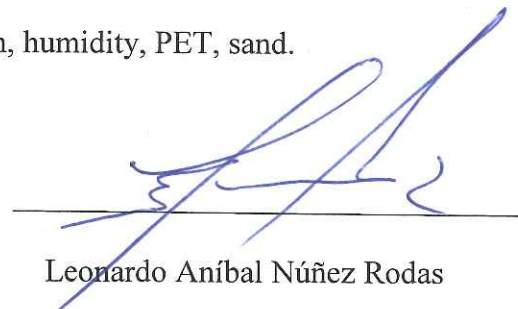
**Keywords:** resistance, shear stress, fortification, humidity, PET, sand.



---

Gil Tarquino Álvarez Pacheco

**Thesis Director**



---

Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Faculty Coordinator**



---

Joseline Gabriela Chávez López

**Author**



UNIVERSIDAD DEL  
AZUAY  
Dpto. Idiomas



---

Selena Paulina Hidalgo Brito

**Author**



Translated by  
Ing. Paúl Arpi



Joseline Gabriela Chávez López

Selena Paulina Hidalgo Brito

Trabajo de Titulación

Ing. Gil Tarquino Álvarez Pacheco

Mayo, 2019

## **COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE ENTRE EL PET Y MADERAS UTILIZADAS EN FORTIFICACIÓN MINERA**

### **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad la minería ha ido avanzando y ocupando un lugar importante en el desarrollo y evolución del país, se ha convertido en una industria importante que ha creado una serie de estudios, técnicas y análisis con el objetivo de mejorar la exploración y explotación de los yacimientos.

Para el proceso de extracción de esta actividad existen dos métodos, minería subterránea y minería a cielo abierto.

En el caso de la minerías subterránea, desde la antigüedad para fortificación se utilizan marcos de madera, arcos de acero, pernos de anclaje y hormigón lanzado, lo que evita que se desprenda material rocoso para así generar mayor estabilidad a los túneles y de esta forma los trabajadores puedan realizar las labores de manera segura.

El uso de la madera es un tema de controversia, debido a que su demanda se ha incrementado a lo largo de los años, a la vez que se han provocado impactos ambientales, por la excesiva tala de árboles. Se plantea una alternativa de material reciclable como el polietileno de tereftalato (PET), el cual se lo encuentra en envases de bebidas, recipientes, entre otros; que reemplace a la madera, demostrando que su resistencia a las propiedades

mecánicas sea igual o mayor a las de la madera. En este trabajo nos enfocaremos en determinar la resistencia al esfuerzo cortante.

En el presente trabajo se decidió realizar la comparación del esfuerzo cortante entre los distintos tipos de madera más utilizadas en minería, como son el eucalipto, pino y teca y el PET.

Se elaboraron 15 probetas de madera, que fueron expuestas a distintos períodos de inmersión en agua, para así poder determinar el contenido de humedad, lo cual hace que algunas de sus propiedades iniciales sean modificadas, teniendo en cuenta que en minas subterráneas es común que estas se encuentren expuestas a escorrentías. Las dimensiones de las probetas son de 50 mm x 50 mm x 250 mm; en función de tener una proporcionalidad geométrica de aquellas que se emplean en la fortificación de minas.

Las 10 muestras de PET fueron elaboradas con distintos porcentajes de polietileno de tereftalato (PET) y arena, además con variaciones en la granulometría (malla N° 30, 40, y 50). Las dimensiones de las probetas son de 50 mm x 50 mm x 250 mm.

Se diseñó un accesorio para efectuar el ensayo al esfuerzo cortante, construido de acero; mismo que se ajusta a la prensa del laboratorio de Ingeniería Civil y a las dimensiones de las probetas, siendo lo suficientemente resistente para aplicar cargas de hasta 12 toneladas, perpendiculares al eje de simetría que atraviesa sobre la sección de corte. Este ensayo en el caso de las maderas se lo ejecutó con orientación transversal a las fibras.

## CAPÍTULO I

### MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Fortificación en minas

La fortificación en minas es una construcción artificial que se realiza con el fin de prevenir la destrucción de la roca circundante y preservar las dimensiones de sección que tiene un túnel o galería, es el conjunto de procedimientos que permite mantener las cavidades que se construyen como resultado de la explotación subterránea de los recursos minerales y mantener seguro durante el tiempo que se desee. La fortificación en minas, como una obra más de ingeniería, debe satisfacer una serie de exigencias técnicas, productivas y económicas (Sari & Rodas, 2013).

Según el Manual de Fortificaciones mineras, se define como fortificación de excavaciones subterráneas a: “El sostenimiento o fortificación tiene por objeto mantener abiertas las labores durante la explotación, compensando la condición inestable de la masa de roca que soporta. En la mayoría de los casos, solamente es necesario que las labores mineras permanezcan abiertas durante períodos de tiempo relativamente cortos. Por ello la función de las fortificaciones es retrasar el reajuste de las masas de rocas más que asegurar un sostenimiento permanente. Pero si fallara antes que las labores puedan ser abandonadas será preciso sustituirlos”

Guía metodológica de seguridad para sistemas de fortificación y acuñadora (2002) afirma: La fortificación de minas es un tema complejo y crítico dentro de la minería subterránea, por su función como elemento de protección para trabajadores y equipos. La fortificación es el conjunto de procedimientos que permiten mantener estables las labores cuando su condición no es auto soportante en una mina subterránea.

El rol fundamental de la fortificación es:

- Mantener las labores seguras con una sección y dimensiones suficientes para la circulación del personal, equipos, aire, etc.
- Impedir el desmoronamiento de material fracturado.

- Disminuir el movimiento de las cajas, techo y piso.
- Mantener la cohesión de los terrenos.

El reconocimiento y tratamiento oportuno del terreno peligroso mediante fortificación, es vital para evitar que se produzcan accidentes, pérdidas en la producción o daños en los equipos. Se prohíbe trabajar o acceder a cualquier lugar de la mina que no esté debidamente fortificado. Solamente podrán quedar sin fortificación los sectores en los cuales su comportamiento sea conocido en cuanto a su condición de auto soporte (González, 2012).

La fortificación debe diseñarse de manera racional y específica para cada caso en particular. En faenas mineras de corta vida, la fortificación no siempre es necesaria pero si fuera el caso, será tan sencilla como sea posible; no obstante, debe asegurar la estabilidad de la labor. En faenas de mayor duración, la tendencia es diseñar fortificaciones de carácter más permanente (Guía metodológica de seguridad para sistemas de fortificación y acñadora, 2002).

## **1.2. Tipos de fortificación**

Los sistemas de fortificación en las minas subterráneas son: rígidos, flexibles y mixtos.

### **1.2.1. Fortificación rígida**

Son las que sostienen sin permitir ningún movimiento de la roca y deben ser bastante resistentes para sujetar los bloques que puedan caerse. Se usan en las bocas de la mina o en sectores donde por razones tectónicas de mala calidad de las rocas o explotaciones hundidas se ha perdido totalmente la propiedad resistente de la roca (Sernageomin, 2012).

### **1.2.2. Fortificación flexible**

Son fortificaciones que permiten deformaciones de la roca con lo que se alivian los esfuerzos y al deformarse mejoran sus propiedades resistentes. Son la mayoría de las

fortificaciones modernas tales como: marcos deslizantes, cintas, la mayor parte de pernos de anclaje y cables (Sernageomin, 2012).

### **1.2.3. Fortificación mixta:**

Son fortificaciones que admiten desequilibrios en la roca circundante y básicamente están en relación a la funcionalidad y temporalidad.

- **Funcionalidad**

Fortificación Activa: Son aquellos elementos que ejercen acción soportante, desde el mismo momento en que son instalados, mediante la aplicación de una carga externa sobre el macizo rocoso. Entre estos tenemos los pernos de anclaje expansivo, pernos de barra de construcción tensados y cables de acero.

Fortificación Pasiva: Corresponde a aquellos elementos de soporte que no aplican ninguna carga externa al momento de la instalación y solo trabajan cuando el macizo rocoso experimenta deformaciones o cuando son solicitados estáticamente, marcos, mallas y hormigón lanzado (Sernageomin, 2012).

- **Temporalidad**

Fortificación de Corto Tiempo: Se instala después de cada disparo, es un sostenimiento de abertura de corto tiempo (menos de un año), ejemplos: pernos con anclaje y estabilizadores de fricción; que brindan seguridad inmediata a personal y equipos, evitan el deterioro prematuro del macizo rocoso.

Fortificación Definitiva: Los cables de acero, perno de barra de construcción con resina o cementado, deben asegurar la estabilidad de la abertura y sus singularidades para toda la vida útil del proyecto. Estos deben permitir extraer la tasa de producción programada, entre estos tenemos fortificación de pilares y puntos de extracción (Sernageomin, 2012).

### 1.3. Fortificación en madera

Es la fortificación más usada a nivel de pequeña minería, debido a su menor costo y facilidad de manejo y colocación.

Sernageomin (2013) afirma: Para elegir correctamente la madera a usar, deben considerarse dos factores fundamentales:

- Las condiciones ambientales en la que se utilizará, que puede ser desde húmedo hasta seco, influyendo en la variación de peso, propiedades mecánicas y durabilidad.
- Las demandas a las que puede estar sometida, que pueden ser del tipo compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra, o bien pandeo, tracción, flexión y esfuerzo de corte.

#### 1.3.1. Marcos de madera

Los marcos de madera, que son la forma más representativa de “enmaderación”, están compuestos por un sombrero o viga en posición horizontal, que se apoya en dos postes, pie derecho o vertical. Como pieza auxiliar al marco propiamente tal, se tiene la solera que va en el piso de la labor entre los postes.

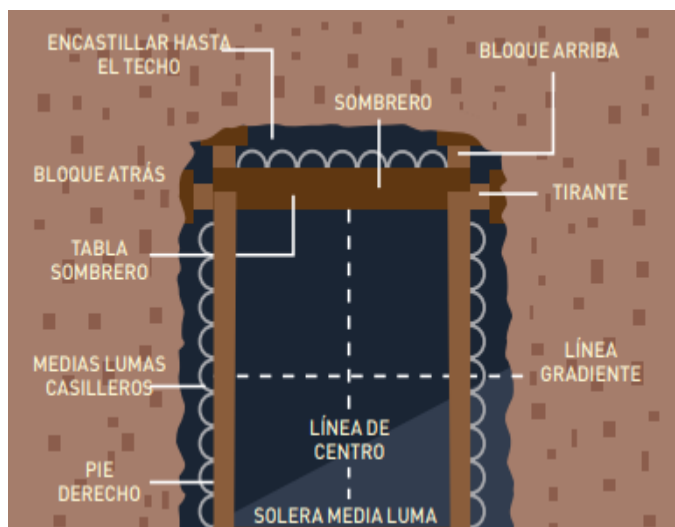


Figura 1.1 Marcos de madera

Fuente: (Fortificación y Acuñaadura, 2012)

#### 1.4. Características generales de las maderas usadas en fortificación

La madera es un material que está compuesto íntegramente por células unidas mediante una membrana de lignina, que le proporcionan las diferentes propiedades físico-químicas, formando además la unidad básica de constitución. Las células de la madera son elementos complejos que se encuentran formados por dos tipos de componentes: primarios y secundarios, cuyas cantidades varían según el tipo de árbol de que se trate. Los elementos llamados primarios, están compuestos por celulosa que es un polisacárido que forma las paredes de las células de la madera, estas células se llaman fibras, la lignina es una sustancia cementante de la madera, la pectina es un material gelatinoso y feculento que une las paredes de las células, es susceptible a la hinchazón y a la contracción, como resultado del contacto con agua. Los elementos llamados secundarios son importantes impregnaciones extrañas a la propia pared celular (Ramírez, 2009).

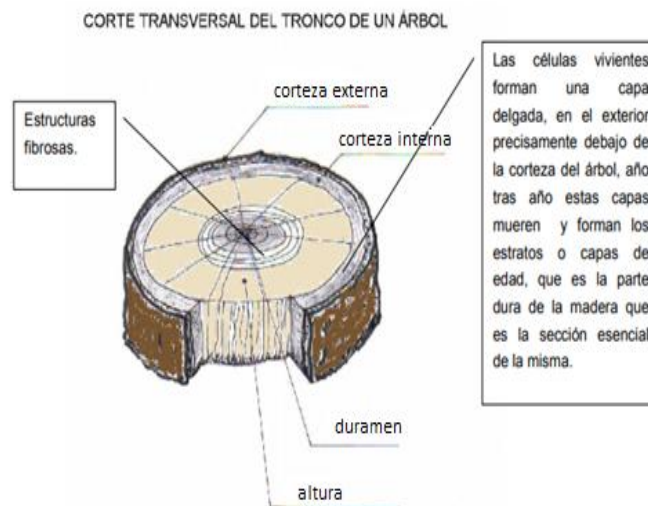


Figura 1.2 Componentes de la madera

Fuente: (Ramírez, 2009)

También está compuesta por otras sustancias como el duramen, que es la parte inmediata a la médula o corazón, formado por madera dura y consistente impregnada de tanino y de lignina, que le proporciona la coloración rosa.; la albura es denominada la madera joven, posee más sabia y se transforma con el tiempo en duramen al ser sustituido el almidón por tanino, que se fija en la membrana celular, volviéndola más densa por último la corteza cuya función es la protección y aislamiento de los tejidos del árbol de los agentes

atmosféricos. La corteza es la cubierta protectora del árbol y puede variar de gruesa a delgada pero siempre es impermeable (Ramírez, 2009).

- **Ventajas**

Es ligera ya que su peso es menor comparándola con otros materiales de sostenimiento como el acero, se transporta, maneja y coloca fácilmente como ademe en la mina. Cuando se somete a esfuerzos de compresión y tracción se rompe a lo largo de estructuras fibrosas precisas, dando señales visuales y audibles antes de que falle completamente. Presenta un alto grado de deformabilidad, lo que permite que a pesar de ser constructivamente rígida, asimila algunas deformaciones. En general tiene bajo costo, comparándola con otros tipos de fortificaciones (Ramírez, 2009).

- **Desventajas**

Las resistencias mecánicas flexión, tensión, pandeo, compresión y cortante, dependen de las estructuras fibrosas y de los defectos naturales que son propios de la madera. La humedad tiene un efecto muy marcado en la resistencia. Muchos hongos afectan a la madera cuando hay condiciones de humedad disminuyendo considerablemente su resistencia, su relación con otros materiales es poco duradera comparándola con otros tipos de fortificación. Su instalación en excavaciones que posean una sección curva es muy compleja (Ramírez, 2009).

## **1.5. Propiedades físico - químicas de las maderas usadas en fortificación**

### **1.5.1. Anisotropía**

Comportamiento diferente en las tres direcciones del espacio longitud, anchura y espesor; respecto a los esfuerzos y fuerzas a la cual es sometida. Las propiedades físicas y mecánicas de la madera no son las mismas en todas las direcciones que pasan por un punto determinado. Podemos definir tres direcciones principales en las cuales se definen y miden las propiedades de la madera que son: axial, radial y tangencial. La dirección axial es paralela a la dirección de crecimiento del árbol (dirección de las fibras). La radial es



perpendicular a la axial y corta al eje del árbol. La dirección tangencial es normal a las dos anteriores (Ramírez, 2009).

### **1.5.2. Elasticidad**

La madera se deforma bajo presiones o compresiones, volviendo a su primitivo estado cuando éstas dejan de actuar. Esta propiedad también está presente inclusive cuando la madera está seca.

### **1.5.3. Plasticidad**

Capacidad de deformación al ser sometida a cargas pesadas durante cierto tiempo.

### **1.5.4. Higroscopicidad**

Debido a su gran porosidad la madera absorbe o cede agua del ambiente que lo circunda, según éste sea húmedo o seco. La madera no obstante posee una cierta cantidad de agua estimada en un 20% - 30% de su peso, muy difícil que la pierda totalmente (Ramírez, 2009).

### **1.5.5. Densidad**

Cuanto más leñoso sea el tejido de una madera y compactas sus fibras, tendrá menos espacio libre dentro de sus fibras, por lo que pesará más que un trozo de igual tamaño de una madera con vasos y fibras grandes. La densidad de la madera varía con la humedad (12% es la humedad normal al abrigo y climatizada). La madera verde tiene valores de 50% a 60% y se reduce durante el secado, por ejemplo el peso de la madera de roble recién cortado es de alrededor de 1000 kg/m<sup>3</sup> y en estado seco (12% de humedad) baja a 670 kg/m<sup>3</sup>. Las maderas se clasifican según su densidad aparente, en pesadas, ligeras y muy ligeras. Las maderas duras son más densas (Nutsch, 2007).

### **1.5.6. Deformaciones por torsión**

Por su anisotropía la madera se hincha y/o se contrae produciéndose variaciones dimensionales. Los efectos producidos por esta propiedad pueden evaluarse por ejemplo en torno a un 0.2 % en el sentido transversal, por cada 1% de variación ambiental de la humedad relativa. Esta variación es mucho más importante en el sentido tangencial (Ramírez, 2009).

### **1.5.7. Propiedades térmicas**

Como todos los materiales, la madera se dilata con el calor y contrae al descender la temperatura, pero este efecto no suele notarse pues la elevación de temperatura lleva consigo una disminución de la humedad. La transmisión de calor dependerá de la humedad, del peso específico y del tipo. No obstante, se efectúa mejor la transmisión en la dirección de las fibras que en dirección perpendicular a ésta. (Ramírez, 2009).

### **1.5.8. Propiedades eléctricas**

La madera seca es un buen aislante eléctrico, su resistividad decrece rápidamente si aumenta la humedad. Para un grado de humedad determinado la resistividad depende de la dirección (es menor en la dirección de las fibras), del tipo (es mayor en tipos que contienen aceites y resinas) y del peso específico (crece al aumentar el mismo) (Ramírez, 2009).

### **1.5.9. Contenido de humedad (CH)**

El contenido de humedad (CH), se define como la relación entre la cantidad de agua y el peso seco o anhidrido de la madera y se expresa en %. Una consecuencia directa del contenido de humedad es el fenómeno de hinchazón y disminución de las dimensiones de la madera. No obstante, este fenómeno se produce cuando la variación de humedad tiene lugar por debajo del punto de saturación de la fibra. Como la madera tiene un

comportamiento anisótropo, los cambios dimensionales de esta son de magnitud diferente en sus correspondientes direcciones: tangenciales, radiales y longitudinales, generándose defectos o singularidades en la madera relacionados con el secado. Se denomina contracción de la madera a la reducción que se produce entre el estado saturado y el estado anhidro de una determinada dimensión (Jiménez, 2011).

En la tabla se demuestra un ejemplo sobre el porcentaje de pérdida de dimensiones según tipo de corte y madera, suponiendo que la madera pasa de un 20 o un 12% de humedad a un 8%. La diferencia de valores entre unas u otros tipos de maderas (Vignote y Martínez, 2005).

Tabla 1.1 Disminución dimensional con porcentajes de humedad

| CH/especie<br>Dirección | CH = 12% ---- 8% |            |                        |           | CH = 20% ---- 8% |            |                        |           |
|-------------------------|------------------|------------|------------------------|-----------|------------------|------------|------------------------|-----------|
|                         | Caoba<br>%       | Ayous<br>% | Pino<br>silvestre<br>% | Haya<br>% | Caoba<br>%       | Ayous<br>% | Pino<br>silvestre<br>% | Haya<br>% |
| Tangencial              | 0,7              | 0,8        | 0,9                    | 1,7       | 2,2              | 2,4        | 2,8                    | 5,0       |
| Radial                  | 0,4              | 0,4        | 0,5                    | 0,9       | 1,4              | 1,4        | 1,6                    | 2,6       |
| Axial                   | 0,04             | 0,05       | 0,1                    | 0,1       | 0,2              | 0,2        | 0,2                    | 0,4       |

Fuente: (Vignote y Martínez, 1995)

El comportamiento de las maderas depende de su mayor o menor facilidad para intercambiar humedad con el ambiente (higroscopicidad) y de las variaciones dimensionales que acompañan a estos intercambios de humedad (contracción/hinchazón). De forma simplificada se pueden clasificar las diversas maderas como: poco nerviosas, medianamente nerviosas y nerviosas (Córdoba, 2005).

Los valores de contracción que presentan los tipos de madera en particular nos permiten especificar la “sobredimensión” necesaria para que la pieza, después del secado tenga las dimensiones requeridas.

Los efectos de la contracción o hinchamiento no se pueden eliminar, pero si se pueden controlar y minimizar por medio de procedimientos apropiados de secado. Este control también se debe realizar durante la etapa de almacenamiento de madera seca y durante su

acarreo y procesamiento, ya que las expansiones (hinchamiento) pueden ser tan dañinas por sus efectos como las contracciones (Córdoba, 2005).

El contenido de humedad (CH) es la cantidad de agua que existe en una pieza de madera, expresada como porcentaje del peso que tendría ésta en condición totalmente anhidra, se representa mediante la siguiente relación: (Córdoba, 2005).

$$CH (\%) = (\text{Peso del agua contenida} / \text{Peso de la madera anhidra}) \times 100$$

### **Propiedades mecánicas de las maderas**

Las propiedades mecánicas de cualquier variedad de madera están condicionadas en gran medida por su humedad, habitualmente estas propiedades son referidas para la madera seca al aire o sea para aproximadamente un 15% de humedad.

- Resistencia a la Tensión

La resistencia máxima de la madera es a la tensión, especialmente la que es paralela a la estructura fibrosa. Una madera con unas condiciones óptimas de secado del 12% aproximadamente puede alcanzar un máximo de 1500 Kg/cm<sup>2</sup>, pero se debe tener en cuenta que la relación de la dirección de la carga con el ángulo de la fibra tienen un efecto muy marcado en la resistencia a la tensión. La rotura se produce de forma súbita (Ramírez, 2009).

- Resistencia a la Compresión

La máxima resistencia a la compresión desempeña un papel importante en la utilización de la madera, para los maderos secados al aire la máxima resistencia a la compresión paralela a la fibra, alcanza en promedio solo cerca del 50% de la resistencia a la tensión a lo largo de la misma fibra, el comportamiento diferente de la madera a la tensión y a la compresión puede explicarse por su estructura fibrosa (Ramírez, 2009).

La resistencia a compresión aumenta al disminuir el grado de humedad, a mayor peso específico de la madera mayor es su resistencia, la dirección del esfuerzo al que se somete también influye en la resistencia a la compresión, la madera resiste más al esfuerzo

ejercido en la dirección de sus fibras y disminuye a medida que se ejerce atravesando la dirección de las fibras (Nutsch, 2007).

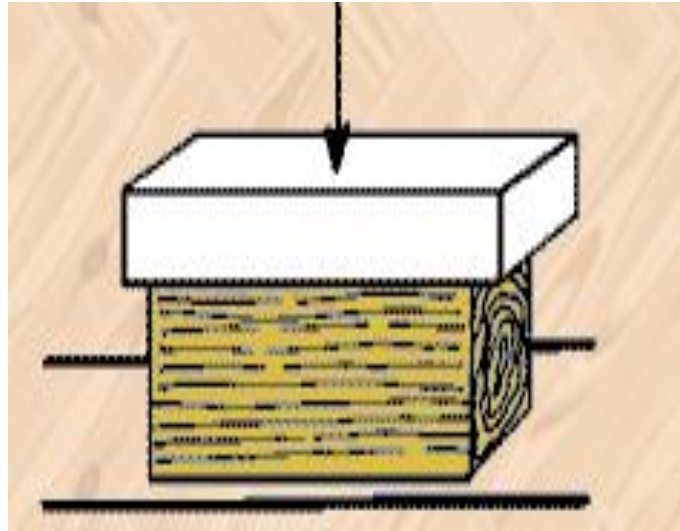


Figura 1.3 Compresión perpendicular a la fibra de la madera

Fuente: (Nutsch, 2007)

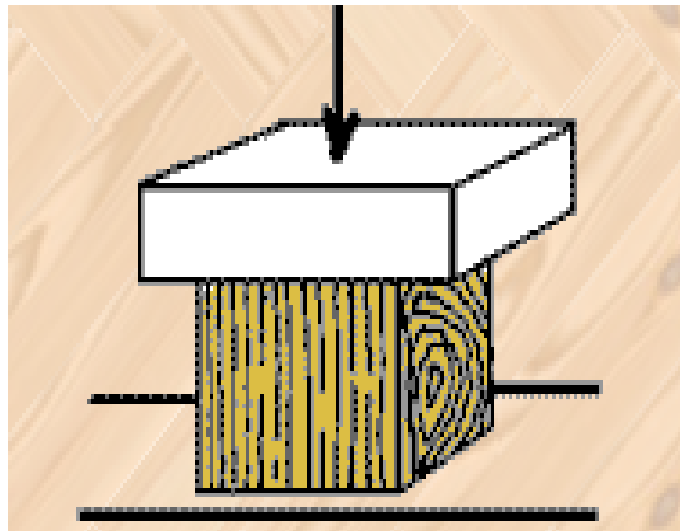


Figura 1.4 Compresión paralela a la fibra de la madera

Fuente: (Nutsch, 2007)

- Resistencia al Pandeo

Esta resistencia se mide paralelamente a las fibras, en el eje de la madera, según el diámetro y la longitud aproximada se puede calcular la resistencia al pandeo (Ramírez, 2009).

El pandeo se produce cuando se supera la resistencia de las piezas sometidas al esfuerzo de compresión en el sentido de sus fibras generando una fuerza perpendicular a ésta, produciendo que se doble en la zona de menor resistencia (Nutsch, 2007).

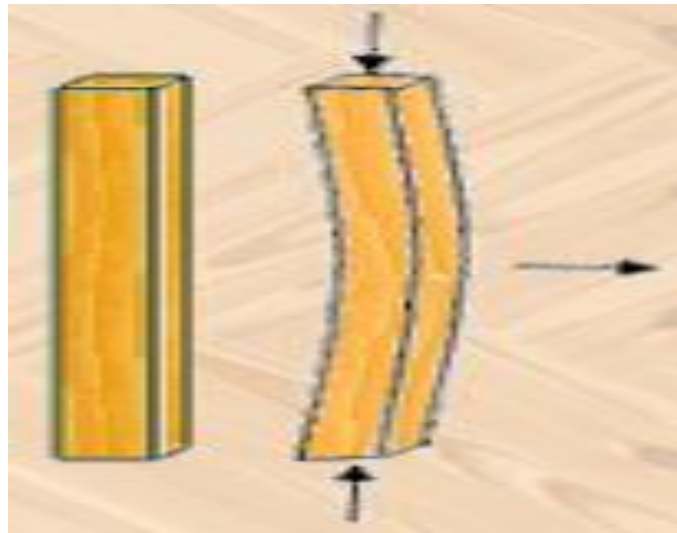


Figura 1.5 Pandeo de la madera

Fuente: (Nutsch, 2007)

- Resistencia a la Flexión

Los maderos horizontales están sujetos al esfuerzo a la flexión cuando las fibras superiores están sometidas a compresión y las fibras inferiores a tensión. El eje neutro se da por los centroides de la sección transversal. El módulo de elasticidad se mide cargando una viga en el centro, al cargarla, la deflexión se mide y se gráfica, después se compara y se concluye que hay varias zonas de deformación, la primera es la zona elástica en donde la carga y la deflexión son proporcionales después esta relación continua pero en menor grado, hasta que se rompe la fibra más alejada, la ruptura no es repentina, si no que se propaga de fibra a fibra deformando el madero (Ramírez, 2009).

El esfuerzo aplicado en la dirección perpendicular a las fibras produce un acortamiento de las fibras superiores y un alargamiento de las inferiores (Nutsch, 2007).

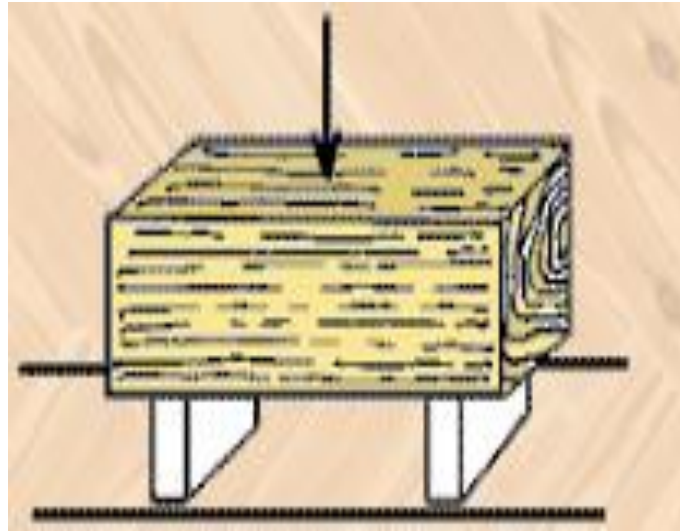


Figura 1.6 Flexión de la madera

Fuente: (Nutsch, 2007)

### 1.6. Esfuerzo cortante

Es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico como por ejemplo una viga o un pilar, dicho esfuerzo impide que el objeto se deforme y así pueda mantener su rigidez (Ortiz, 2007).

En las piezas sometidas a flexión y a cortante, las tensiones que intervienen son conjuntamente las de cortadura y deslizamiento. Sus valores característicos por deslizamiento varían entre 1.7 y 3 MPa en los tipos de madera y calidades utilizadas habitualmente en la construcción. Las tensiones tangenciales por las fibras sólo se producen en casos muy concretos, como son las uniones encoladas entre el alma y el ala de una vigueta con sección en doble T. El valor de la resistencia por rodadura es del orden del 20 al 30% de la resistencia por deslizamiento (Bernal, 1999).

### 1.6.1. Cortante simple

Cuando se aplican fuerzas perpendiculares al eje del perno, existe la tendencia de cortado a través de su sección transversal, produciendo un esfuerzo cortante. Si una sola sección transversal del perno resiste la fuerza aplicada, se dice que se produce un efecto de cortante simple. El área de corte para una sección circular se obtiene de la siguiente manera: (Bernal, 1999).

$$A_s = \frac{\pi * d^2}{4}$$

### 1.6.2. Cortante en madera

La resistencia máxima al cortante de la madera es notablemente más bajo que la resistencia a la torsión. Según Wood Handbook Manual de la Madera (1955, página 82), para elementos de madera sólida, el cortante máximo permisible por torsión puede tomarse como el esfuerzo cortante paralelo a la fibra y pueden utilizarse dos tercios de este valor como el esfuerzo cortante permisible por torsión en el límite proporcional. El esfuerzo cortante perpendicular a las fibras, es alrededor de tres a cuatro veces mas alto que el paralelo a las fibras (Kollmann y Cote, 1968 pagina 414).

(Biron y Arioglu, 1987).

La humedad siempre afecta la resistencia, como se ve en la figura 1.7

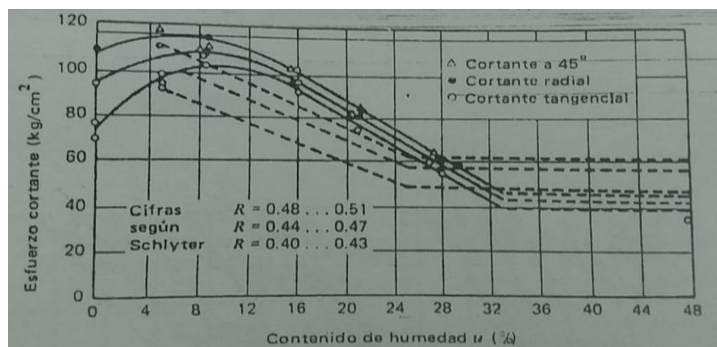


Figura 1.7 Efecto del contenido de humedad en la resistencia al cortante en la madera

Fuente: (Kollmann y Cote, 1968)



### 1.6.3. Aplicaciones en perforación

El esfuerzo cortante directo es un tipo de esfuerzo en el que la fuerza cortante aplicada se resiste uniformemente por el área de la parte que se corta, lo que produce un nivel uniforme de fuerza cortante sobre el área. Se denota con la letra griega (tau). Este tipo de esfuerzo es muy común en las operaciones de perforación en donde el área de corte se obtiene de la siguiente manera: (Bernal, 1999).

$$As = \text{perímetro} * \text{espesor}$$

$$As = p * t$$

### 1.7. Polietileno de tereftalato (PET)

El polietileno de tereftalato es un polímero termoplástico perteneciente a la familia de los poliésteres ampliamente usado en la producción de fibras, películas, empaques, envases, botellas y otras aplicaciones de carácter técnico, hace 20 años era considerado un polímero ingenieril, pero en la última década se ha extendido notablemente en aplicaciones de uso general, siendo el integrante más reciente de los termoplásticos que forma el grupo de polímeros de uso general de mayor consumo (El sector de los plásticos - Estadísticas, 2001).

Un kilogramo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos de gas natural y 13% de aire. El paraxileno, extraído del petróleo crudo, permite la obtención del ácido tereftálico al oxidarse con el aire. Por su parte, el etileno, derivado del gas natural, se oxida con aire para la obtención del etilenglicol. El PET resulta de la combinación del ácido tereftálico y el etilenglicol.

Entre los usos más generalizados de este polímero destaca la fabricación de preformas de botellas para la industria de bebidas gaseosas y agua mineral, así como para cosméticos, medicinas, aceites y frascos de todo tipo. También se fabrican cintas de video y audio, bandejas para microondas, geo textiles y fibras para la industria textil (Mansilla y Ruiz, 2009).

### 1.7.1. Cadena polimérica

El comportamiento físico de los polímeros no sólo viene determinado por la composición química de la unidad repetitiva, sino que su conformación y configuración también tienen una gran importancia. Se denominan conformaciones a las distintas disposiciones de los átomos y sustituyentes de la cadena de polímeros que se originan mediante rotación de sus enlaces sencillos (Laza, Pérez y Ruiz. 2014).

El término configuración sin embargo, se refiere a las diferentes reorganizaciones de los átomos y sustituyentes en una cadena que pueden ser interconvertidos sólo mediante ruptura y formación de nuevos enlaces químicos primarios (Laza, Pérez y Ruiz. 2014).

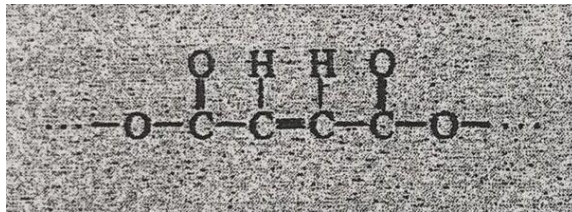


Figura 1.8 Cadena polimérica del Poliéster (PET)

Fuente: (Askeland, 2012)

- Estructura primaria: Estructura química de la unidad repetitiva de átomos y enlaces.
- Estructura secundaria: Reorganización de los átomos y sustituyentes de la cadena de polímero mediante rotación de sus enlaces sencillos.
- Estructura terciaria: Conformación de las cadenas en grupo depende de la conformación local y de las interacciones entre las cadenas.
- Estructura cuaternaria: Describe la morfología, muy importante en el estado sólido.

(Laza, Pérez y Ruiz. 2014)

Sus propiedades son:

- Gran ligereza.
- Posee diferentes formas de producción; soplado, extrusión e inyección.
- Es una confiable barrera ante los gases externos.

- Alto grado de reciclabilidad.
- Alta resistencia al desgaste y corrosión.
- Posee muy buenas propiedades mecánicas y químicas.
- Impermeable.

El PET tiene tres estados estructurales: cristalino, orientado y amorfo.

- PET Cristalino: Este tipo de PET tiene las moléculas dispuestas en un orden determinado parecido al arreglo que tiene el agua en un copo de nieve.
- PET Orientado: Este tipo de PET tiene un arreglo artificial en sus moléculas las cuales son enrolladas u orientadas en una dirección para aprovechar sus propiedades fibrosas. Este es el PET que se utiliza para fabricar las botellas. No se enrolla ni se teje, se estira axialmente y se sopla.
- PET Amorfo: Este tipo de PET tiene las moléculas dispuestas en forma aleatoria y desarreglada a nivel microscópico. En otras palabras el plástico no está cristalizado ni orientado.

(Quito, R & Villafuerte E. 2011).

### **1.7.2. Ventajas y desventajas del PET**

A continuación; de acuerdo a los autores Mansilla y Ruiz se determinan las siguientes ventajas y desventajas del PET.

#### **Ventajas**

- Propiedades únicas: Claridad, brillo, transparencia, barrera a gases y aromas, impacto, termoformabilidad, fácil de imprimir con tintas, permite cocción en microondas (Mansilla y Ruiz, 2009).
- Disponibilidad: Hoy se produce PET en Sur y Norteamérica, Europa, Asia y Sudáfrica (Mansilla y Ruiz, 2009).

### **Desventajas**

- **Secado:** Todo poliéster tiene que ser secado a fin de evitar pérdida de propiedades. La humedad del polímero al ingresar al proceso debe ser de máximo 0.005%. Para ello se utiliza el secado por circulación de aire caliente previamente secado en deshumificadores antes de ser procesado en inyectoras o extrusoras. Lo que le confiere un costo extra. También se puede secar por radiación infrarroja, pero presupone un costo aún mayor (Mansilla y Ruiz, 2009).
- **Temperatura:** Los poliésteres no mantienen buenas propiedades cuando se les somete a temperaturas superiores a los 70°C. Se han logrado mejoras modificando los equipos para permitir llenado en caliente. Excepción: el PET cristalizado (opaco) tiene buena resistencia a temperaturas de hasta 230°C (Mansilla y Ruiz, 2009).
- **Intemperie:** No se aconseja el uso permanente en intemperie (Mansilla y Ruiz, 2009).

### 1.7.3. Características físicas y químicas del PET

El polietileno de tereftalato posee propiedades mecánicas y características muy buenas como su densidad, dureza, resistencia al calor, resistencia al impacto, entre otras.

A continuación la tabla 1.2 en la que se clasifica cada propiedad del polietileno de tereftalato con sus respectivos valores y unidades.

Tabla 1.2 Características del PET

| <b>Propiedad</b>              | <b>Unidad</b>        | <b>Valor</b>            |
|-------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Densidad                      | g/cm <sup>3</sup>    | 1.34 – 1.39             |
| Resistencia a la tensión      | MPa                  | 59 – 72                 |
| Resistencia a la compresión   | MPa                  | 76 – 128                |
| Resistencia al impacto, Izod  | J/mm                 | 0.01 – 0.04             |
| Dureza                        | M                    | 94 – 101                |
| Dilatación térmica            | 10 <sup>-4</sup> /°C | 15.2 – 24               |
| Resistencia al calor          | °C                   | 80 – 120                |
| Resistencia dieléctrica       | V/mm                 | 13780 – 15750           |
| Constante dieléctrica (60 Hz) | -                    | 3.65                    |
| Absorción de agua (24h)       | %                    | 0.02                    |
| Velocidad de combustión       | Mm/min               | Consumo lento           |
| Efecto luz solar              | -                    | Se decolora ligeramente |
| Calidad de mecanizado         | -                    | Excelente               |
| Calidad óptica                | -                    | Transparente a opaco    |
| Temperatura de fusión         | °C                   | 244 - 254               |

Fuente: (Richardson y Lokensgard, 1999)

#### **1.7.4. Métodos de reciclajes**

El PET puede ser reciclado dando lugar al material conocido como RPET, lamentablemente el RPET no puede emplearse para producir envases para la industria alimenticia debido a que las temperaturas implicadas en el proceso de reciclaje no son lo suficientemente altas como para asegurar la esterilización del producto. A tal fin han surgido procesos especiales para el reciclaje del PET que permiten su uso en contacto con alimentos (Mansilla y Ruiz, 2009).

Las técnicas de reciclaje de materia prima post consumo de plásticos son tres: reciclado mecánico, reciclado químico y aprovechamiento energético derivándose de estos otros cuatro métodos de reciclaje que son: reciclaje primario, secundario, terciario y cuaternario (Quito y Villafuerte, 2011).

##### **1.7.4.1. Reciclaje mecánico**

Es la técnica más utilizada en la actualidad, consiste en la molienda, separación y lavado de los envases. Las escamas resultantes de este proceso se pueden destinar en forma directa sin necesidad de volver a hacer pellets, en la fabricación de productos por inyección o extrusión (Quito y Villafuerte, 2011).

El reciclado mecánico se subdivide en:

- Proceso de reciclados primarios.
- Procesos de reciclado secundario.

##### **1.7.4.2. Reciclado químico**

En este tratamiento a los residuos plásticos, conducen a productos tales como monómeros, gas de síntesis y corrientes hidrocarbonados, mediante la aplicación de procesos de polimerización, gasificación y otros tradicionales del refino, tanto térmico como catalítico (Quito y Villafuerte, 2011).

#### **1.7.4.3. Reciclaje con recuperación de energía**

Dentro de las estrategias del reciclaje, existe también la alternativa de aprovechamiento energético tal cual se aplica en varios países extranjeros. El PET es un polímero que está formado solo por átomos de carbono e hidrógeno, por lo cual al ser quemado produce solo dióxido de carbono y agua con desprendimiento de energía (Quito y Villafuerte, 2011).

#### **1.7.4.4. Reciclaje primario**

El reciclaje primario consiste en la conversión del desecho plástico en artículos con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original. El reciclaje primario se hace con termoplásticos como PET, HDPE (polietileno de alta densidad), LDPE (polietileno de baja densidad), PP (polietileno), (poliestireno) y PVC (cloruro de polivinilo). Las propiedades de los termoplásticos son la base de este reciclaje primario debido a la habilidad de los termoplásticos de fundirse a bajas temperaturas sin ningún cambio en su estructura ya que tienen moléculas que se encuentran en un alineamiento paralelo (Quito y Villafuerte, 2011).

- a) Proceso de reciclaje primario: El proceso de reciclaje primario es fundamentalmente el mismo para los distintos plásticos. Consiste en la separación, limpieza, paletizado, moldeado por inyección, moldeado por compresión y termoformación. (Quito y Villafuerte, 2011)
  
- b) Separación: La separación es tan difícil que algunos sistemas automatizados, además del manual, han sido desarrollados. Uno de estos sistemas automatizados son las máquinas foto óptimas las cuales reconocen formas y transparencia. Hay otros métodos de separación automatizados basados en las diferencias de gravedad específica, difracción de rayos X y disolución en solventes. Los métodos de separación se hace sobre el producto completo usando el reconocimiento óptico del color o la forma, la separación manual se incluye dentro de esta categoría, esta clasificación se ve auxiliada por un código de números. La micro separación puede

hacerse por una propiedad física específica como el tamaño, peso, densidad, etc. (Quito y Villafuerte, 2011)

- c) Limpieza: Los plásticos separados están generalmente contaminados con comida, papel, piedras, polvo, pegamentos, etc. De ahí que tienen que ser primero limpiados al granularseles y luego lavar este gránulo en un baño de detergente. Otra opción de limpiado es la de granular los plásticos repetidamente e irlos desechando sobre pantallas móviles. También se pueden usar hidrociclones cuando el desecho plástico está muy contaminado. El plástico contaminado es removido y al ser ligero, flota en la superficie donde es expulsado. Los contaminantes caen al fondo y se descargan. Después del proceso de limpieza, los plásticos se llaman hojuelas limpias o gránulos limpios (Quito y Villafuerte, 2011).
  
- d) Peletizado: El granulado limpio y seco puede ser ya vendido o puede convertirse en pellet. Para esto el granulado debe fundirse y pasarse a través de un tubo para tomar la forma de un espagueti, se enfría en un baño de agua y es cortado en pedacitos de pellet (Quito y Villafuerte, 2011).

#### **1.7.4.5. Reciclaje secundario**

El reciclaje secundario convierte el plástico en artículos con propiedades que son inferiores a las del polímero original. Ejemplos de plásticos recuperados por esta forma son los termoestables y plásticos contaminados. El proceso mezclado de plásticos es representativo del reciclaje secundario. Este elimina la necesidad de separar y limpiar los plásticos (Quito y Villafuerte, 2011).

La mezcla de plásticos incluye tapas de aluminio, etiquetas de papel, polvo, etc. Se muelen y funden juntos dentro de un extrusor. Los plásticos pasan por un tubo con una gran abertura hacia un baño de agua y luego son cortados a varias longitudes dependiendo de las especificaciones del cliente. Los plásticos termoestables son partes que nos se funden



y que tienden a acumularse en el centro de la mezcla y los plásticos más viscosos tienden a salir, dándole al producto final una apariencia uniforme.

#### **1.7.4.6. Reciclaje terciario**

El reciclaje terciario degrada al polímero a compuestos químicos básicos y combustibles. Este tipo de reciclaje es fundamentalmente diferente a los dos primeros mencionados anteriormente porque involucra un cambio químico y no solo un cambio físico. En este reciclaje terciario las largas cadenas del polímero se rompen en pequeños hidrocarburos o monóxidos de carbono e hidrogeno. Para ello se utilizan diversos procesos químicos basados en reacciones de hidrólisis, alcoholisis, glicolisis, hidrogenación, pirólisis y gasificación (Quito y Villafuerte, 2011).

- Pirólisis: La pirólisis se define como la descomposición térmica de grandes moléculas orgánicas en tres fracciones: gaseosa, líquida y sólida, en ausencia de oxígeno a temperaturas comprendidas entre 500 y 1000°C. En estas condiciones el plástico no arde, pero se descompone en moléculas más pequeñas, dando lugar a diversos productos básicos reutilizados en la industria petroquímica (mezclas de gases etileno, propileno, butadieno y mezclas de gasolina ligera y alquitrán), y un gas natural para uso doméstico. La pirólisis tiene muchas ventajas como solución al problema de los residuos, ya que no solo puede utilizarse como fuente de productos químicos y energía, sino que permite una reducción del volumen de los residuos del post consumo del 90% e incluso superior. Además la pirólisis produce una mínima contaminación del aire.

El tratamiento pro pirólisis está especialmente indicado en los casos de mezclas se residuos plásticos cuya separación es inviable y para el tratamiento de residuos plásticos que no pueden someterse a reciclado mecánico. No obstante, debe de tenerse en cuenta que su utilización como fuente de energía está fuertemente condicionada por el precio en el mercado de los combustibles fósiles y por el elevado consumo energético inicial que requiere la misma, el cual hace que en

muchos casos sea preferible la reutilización térmica directa de los residuos plásticos (Quito y Villafuerte, 2011).

## **1.8. Granulometría de suelos**

La granulometría se define como la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra seca. Aprenderemos a utilizarla como un instrumento en la clasificación de los materiales, ya que la descripción por tamaño tiene especial interés en la selección de materiales para rellenos de carreteras y presas, los cuales requieren materiales con graduaciones determinadas (Sánchez, 2013).

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices (norma ASTM C 136).

El tamaño de partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas. Los siete tamices estándar ASTM C 33 para agregado fino tienen aberturas que varían desde 150 micras hasta 9.52 mm (Sánchez, 2013).

### **1.8.1. Granulometría de los agregados finos**

Depende del tipo de trabajo, de la riqueza de la mezcla y el tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, o cuando se emplean agregados gruesos de tamaño pequeño, la granulometría que más se aproxime al porcentaje máximo que pasa por cada criba resulta lo más conveniente para lograr un buen trabajo.

Entre más uniforme sea la granulometría, mayor será la economía. Estas especificaciones permiten que los porcentajes mínimos en peso del material que pasa las mallas de 0.30mm (No. 50) y de 15mm (No. 100) sean reducidos a 15% y 0% (Sánchez, 2013).

### 1.8.2. Tipos de granulometría

- **Granulometría por hidrómetro:** Este método de prueba cubre las determinaciones cuantitativas de la distribución de tamaño de las partículas de las fracciones finas de los suelos. La distribución de tamaños de partículas más grandes de 75  $\mu\text{m}$  retenidas en el tamiz No 200 se determina por tamizado, en tanto que la distribución de las partículas más pequeñas que 75  $\mu\text{m}$  se determina por un proceso de sedimentación, usando un hidrómetro (González y Alloza. 2011).
- **Granulometría óptica:** La granulometría óptica es un procedimiento cada vez más empleado por las empresas mineras para medir los diferentes tamaños de grano de un material granular, información vital para reducir el costo de mantenimiento de la maquinaria. Este método óptico de análisis consiste en crear estadísticas a partir de una fotografía, analizando tanto la roca inactiva como la roca en movimiento para cuantificar el tamaño de sus fragmentos (González y Alloza. 2011).
- **Granulometría de áridos para hormigón:** La norma UNE-EN 933-2 especifica los tamaños nominales y la forma de las aberturas de los tamices utilizados en los ensayos para determinar la granulometría de los áridos.

Se contemplan dos tipos de tamices:

Tela metálica trenzada: Elaborada con hilos metálicos trenzados formando aberturas cuadradas de tamaño  $< 4 \text{ mm}$

Chapa perforada: Chapa con agujeros cuadrados, uniformes y dispuestos de forma simétrica de tamaño  $\geq 4 \text{ mm}$  (González y Alloza. 2011).

### 1.9. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico o de granulometría es el conjunto de procesos mediante los cuales se logra la determinación de los tamaños que componen una muestra en relación a su peso, es una herramienta que sirve para el análisis del comportamiento de un material

que se destina como agregado de un producto ya sea para construcciones civiles o ensayos de permeabilidad.

La finalidad de este análisis es obtener la distribución y clasificación de un suelo según su tamaño de partícula mediante un proceso manual o mecánico de tamización, en los cuales se utilizan tamices de separación normalizados en orden decreciente, los resultados se pueden interpretar de forma analítica, mediante tablas de porcentajes con respecto al peso total y mediante gráficas de curvatura conocida como “Curva Granulométrica” (Casanova, 2004).

### **1.10.1 Curvas granulométricas**

La curva granulométrica de un suelo se obtiene mediante los datos obtenidos por el proceso de tamización, se representa en una tabla junto a una gráfica donde se puede observar el tamaño promedio de las partículas y la forma de distribución, estos sistemas de representación ayudan a comparar diversas granulometrías de forma eficiente.

La gráfica en la que la curva granulométrica se representa está conformada por un eje de abscisas, que contiene una escala logarítmica que representa el diámetro del tamiz, y en el eje de las ordenadas se encuentra una escala natural que representa el porcentaje que pasa por cada tamiz.

Las representaciones gráficas de las curvas granulométricas sirven para determinar tres parámetros básicos del suelo, estos son:

- **Diámetro Efectivo:** Es la abertura del tamiz por la cual pasa el 10% de la muestra.
- **Coefficiente de Uniformidad:** Es la relación entre el diámetro correspondiente al 60% y el diámetro efectivo de la curva granulométrica.
- **Coefficiente de Curvatura:** Es la relación que existe entre la abertura por la cual pasa el 30% del material dividida para la abertura por la cual pasa el 60% del material multiplicada por el diámetro efectivo de la curva granulométrica.

Por medio del análisis granulométrico se pueden obtener los distintos tipos de diámetros de los granos del material representados por la letra “D” y un subíndice (10, 30, 60,85) que denota el porcentaje del material (Casanova, 2004).

### 1.10.2. Tamización

El proceso mecánico de tamización mediante el cual se separan las partículas por su tamaño en diferentes tamices normalizados que contienen diferentes tipos de aberturas en orden decreciente, la cantidad retenida entre dos tamices indica el tamaño que posee, estos ensayos se realizan en partículas cuyo tamaño es mayor a 0.075 mm.

Un tamiz es un instrumento metálico por el cual se separan los suelos según su tamaño, está conformado por alambres que se cruzan ortogonalmente y forman aberturas, según las normas ASTM son diseñados por medio de pulgadas y números que indican el grado de abertura del tamiz.

Existen diferentes tipos de mallas que clasifican el material, pero las más comunes se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1.3 Tipos de tamices

| Tamiz(ASTM) | Abertura Real(mm) | Tipo de Suelo |
|-------------|-------------------|---------------|
| 3"          | 76,12             | Grava         |
| 1"          | 25,4              |               |
| 3/8"        | 9,52              |               |
| N° 4        | 4,76              | Arena Gruesa  |
| N° 10       | 2                 | Arena Media   |
| N° 20       | 0,84              |               |
| N° 40       | 0,42              |               |
| N° 60       | 0,25              | Arena Fina    |
| N° 140      | 0,105             |               |
| N° 200      | 0,074             |               |

Fuente: (Unión Internacional de Ciencias del Suelo, 2011)

El método de tamización también posee algunas claras desventajas al momento de aplicarlo, por ejemplo, no provee de información acerca de la estructura y forma de las partículas, algunas partículas pequeñas tienden a adherirse a partículas grandes, el número de tamices son limitados y los tamaños que una partícula puede tener son infinitos y sobre todo este método de gradación mide partículas irregulares en un sistema orientado a partículas de forma regular.

Procedimiento para la preparación de la arena:

- La muestra se debe secar en un horno a 100°C por un periodo de 3 horas con el fin de evaporar todo tipo de humedad que las cavidades porosas puedan albergar.
- Con ayuda de una balanza se debe pesar la cantidad de muestra que se va analizar.
- Se procede a verter el material a través de los tamices en orden decreciente con un acumulador en el fondo.
- Se inserta el sistema de tamices en un agitador mecánico con movimiento vertical y horizontal durante 5 minutos, de no contar con agitadores mecánicos se puede hacer de forma manual por un lapso de 10 minutos.
- Se pesa la cantidad de material retenido en cada tamiz, este proceso puede hacerse de manera individual o acumulada.
- El material acumulado en el fondo se puede secar a 100°C si se desea clasificar aún más.
- Cabe recalcar que si se tiene un material compuesto por granulometrías muy dispares es mejor realizar el proceso en dos etapas, en la primera realizar el procedimiento con tamices de hasta una granulometría media y la segunda etapa realizar solo con tamices de granulometría media y fina (Casanova, 2004).

## CAPÍTULO II

### **DISEÑO DEL ACCESORIO PARA EL ENSAYO AL ESFUERZO CORTANTE, ELABORACIÓN DE PROBETAS Y PROCEDIMIENTO**

El objetivo de este trabajo de investigación es comparar los valores de resistencia al esfuerzo cortante entre las probetas de madera y PET. Es fundamental establecer la manera en la que interviene la variación del contenido de humedad en los diferentes tipos de madera, en comparación a las probetas de PET que permanecen en estado natural.

La dimensión y forma de las muestras se establecen en función de diferentes parámetros técnicos, los cuales se detallan a continuación; en general se emplearon 25 muestras: 10 muestras de PET y 15 muestras de madera.

Las muestras de madera comúnmente utilizadas en la fortificación de minas son: pino, eucalipto y teca. Las muestras de PET están compuestas por plástico reciclado, mezclado con arena común. El motivo de esta unión de productos se debe a que el PET realiza la labor de proporcionar dureza y resistencia, mientras que la arena proporciona consistencia y estabilidad.

#### **2.1. Diseño de accesorio para ensayo del Esfuerzo Cortante**

Para realizar el ensayo de resistencia al esfuerzo cortante en los distintos tipos de madera y el PET, fue necesario contar con una prensa y la construcción del accesorio para el ensayo al esfuerzo cortante con ciertos requerimientos:

- Las dimensiones del accesorio fueron establecidas acorde a las dimensiones de las probetas a utilizar 50 mm x 50 mm x 250 mm; en proporción geométrica a elementos de madera empleados en fortificación minera.
- Contar con una estructura resistente para cargas hasta de 12 toneladas.

- La estructuración del utillaje debió ser aplicable a la prensa del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay.
- Debido a la resistencia de los materiales PET y madera; en función del empleo que se le dará al utillaje como herramienta de corte, se seleccionó el acero como material constructivo.

### 2.1.1. Descripción de la prensa

Para realizar el experimento es necesario el uso de una prensa hidráulica que normalmente se emplea para romper vigas de hormigón, instalada en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad el Azuay con código 3001047.



Figura 2.1 Prensa hidráulica

Especificaciones del equipo:

- Part No.: 60916
- Modelo: B
- 10000 PSI (Max)



- Serial No.: 0512Z03546
- Procedencia: Fabricación Nacional
- Capacidad: 50 toneladas

### 2.1.2. Determinación de las partes del accesorio

En la siguiente figura se procede a describir cada una de las partes del utillaje que se concibió para la realización de las pruebas del esfuerzo cortante en las probetas de madera y PET.

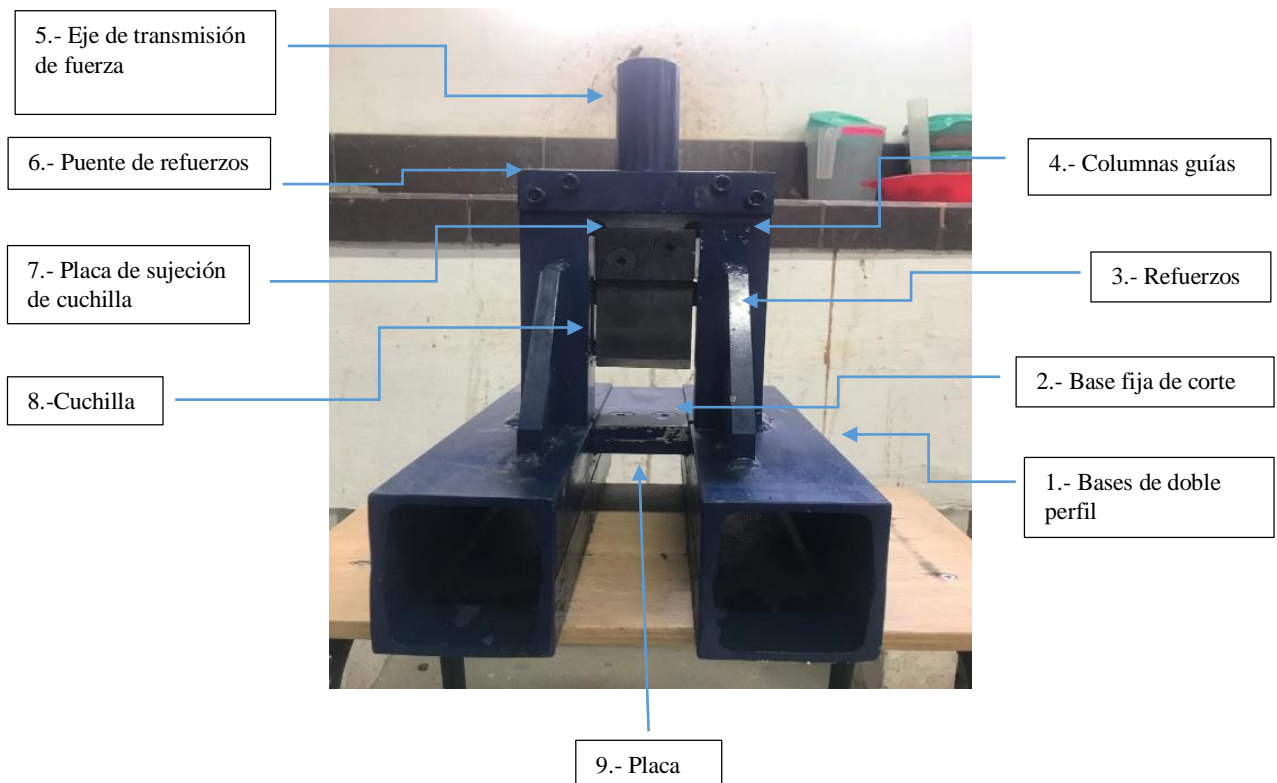


Figura 2.2 Accesorio para el ensayo al esfuerzo cortante

La descripción de todas las partes del utillaje para el ensayo al esfuerzo cortante se presentan en el punto 2.1.2.1. A continuación se pueden apreciar las diferentes vistas principales con sus respectivas dimensiones generales del equipo.

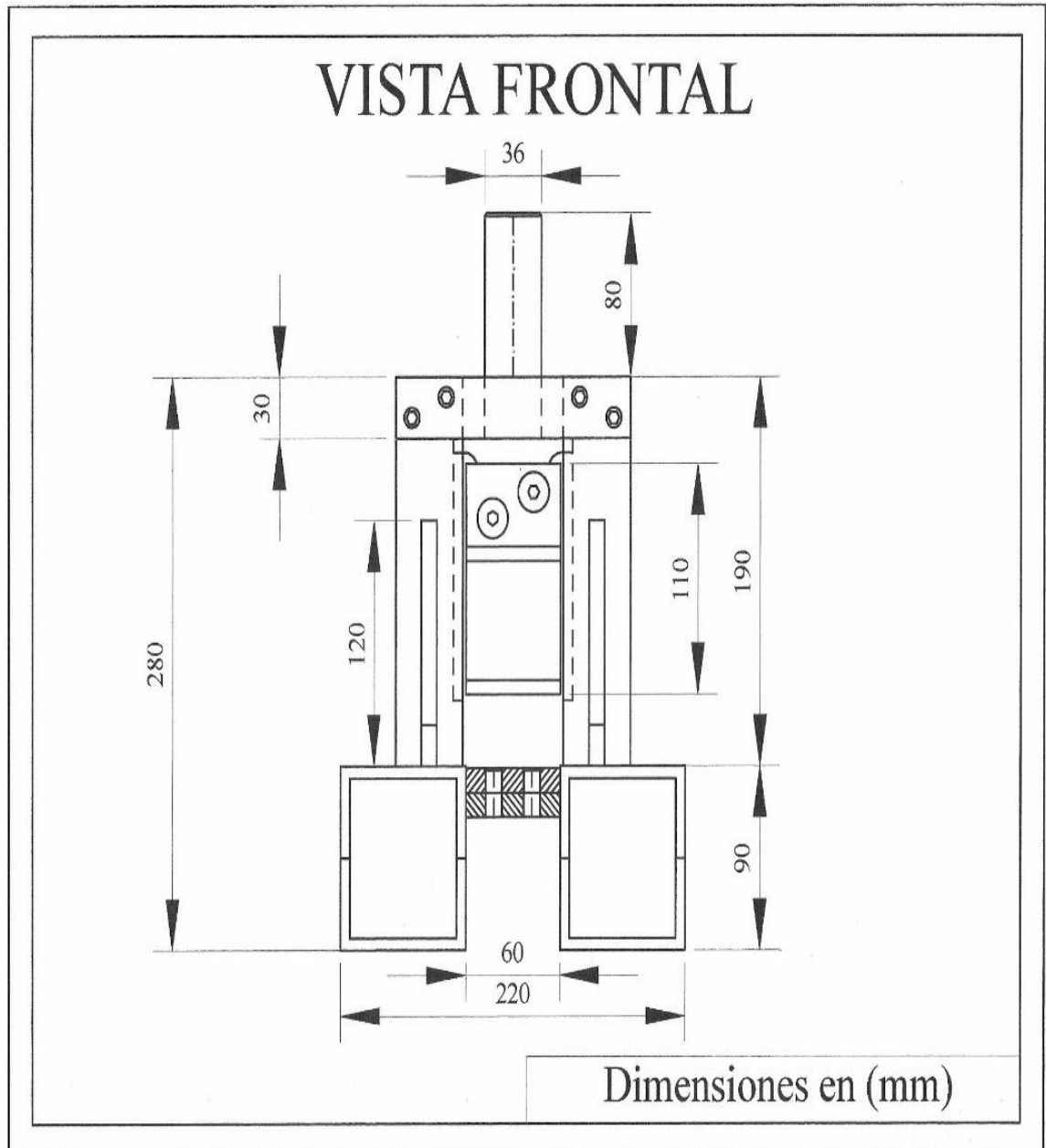


Figura 2.3 Vista frontal del accesorio para el ensayo al esfuerzo cortante en mm

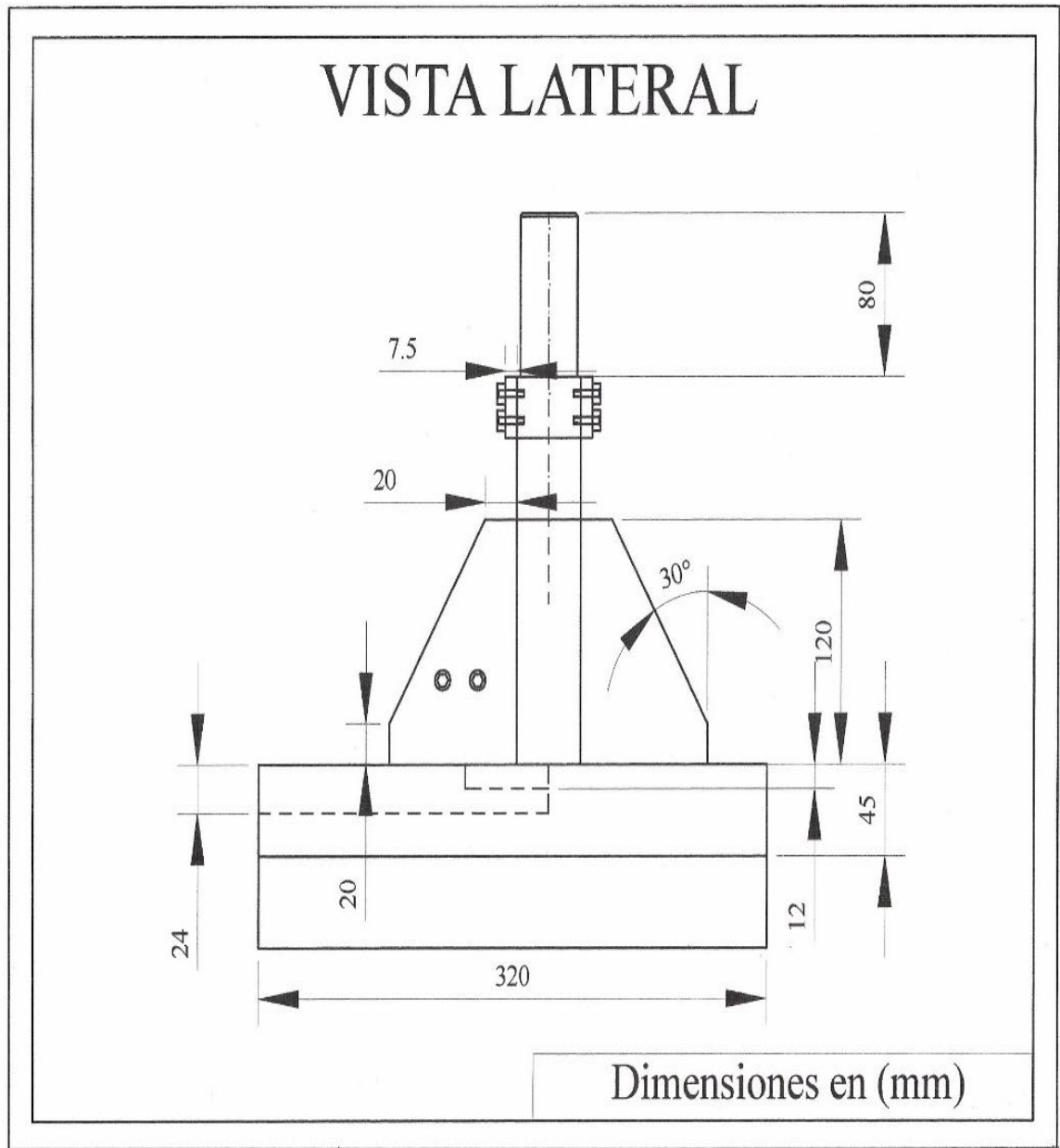


Figura 2.4 Vista lateral del accesorio para el ensayo al esfuerzo cortante

### 2.1.2.1.Descripción de las partes

1. Bases de doble perfil: Construidos en perfil C con medidas de 80 mm x 45 mm x 320 mm, con un espesor de 6mm, su posición es horizontal y soldados en doble perfil para formar dos vigas en caja con una altura de 90 mm, que permite el espacio suficiente para que la probeta pueda desplazarse hacia abajo, al momento de cortarse.
2. Base fija de corte: Está construida por dos cuerpos, el primero es una base inferior de acero al carbono que se suelda a las bases de doble perfil y el segundo es una base superior de cuchilla de alta dureza y templeable en acero ASSAB 705 (Norma AISI 4337), empotrado a la base inferior. Mediante dos pernos de acero de cabeza avellanada se sujeta a la placa soldada. Las dimensiones de esta placa cuadrada son 60.5 mm x 60.5 mm con un espesor de 12 mm por cada base.
3. Refuerzos: El accesorio para el ensayo al esfuerzo cortante consta de cuatro refuerzos triangulares, con un ángulo de 30° respecto a la vertical, construidos de plancha de acero cepillada, con medidas de 80 mm x 120 mm x 12 mm, estas planchas le dan la rigidez necesaria para que la prensa de corte no sufra deformaciones.
4. Columnas guías: Están construidas en barras de acero estructural, cepillada y fresada la ranura de guía de cuchilla. Tiene dimensiones de 40 mm x 40 mm x 190 mm. Son dos unidades ubicadas verticalmente, las mismas que están soldadas a la base en la parte inferior.
5. Eje de transmisión de fuerza: Está construida por un eje hueco de acero de transmisión con un diámetro de 38 mm y un diámetro interno de 22 mm. Este eje es el encargado de transmitir la fuerza de la prensa hacia la cuchilla de corte.

6. Puente de refuerzos: Está construido con planchas de acero, cepilladas con dimensiones de 35 mm x 120 mm x 6 mm, el mismo que hace una junta de las dos columnas guías, se encuentran ubicados en la parte superior de las columnas y sujetas mediante cuatro pernos de cabeza Allen de diámetro de 8 mm y una longitud de 15 mm.
7. Placa de sujeción de cuchilla: Este elemento es el que sujeta a la cuchilla móvil a través de dos pernos de cabeza avellanada con un diámetro de 10 mm. Estos pernos están trabajado con un factor de seguridad de 1.41.
8. Cuchilla: Está construida de acero especial de alta resistencia, dureza y templable. Consta de las siguientes dimensiones 60 mm x 110 mm x 7 mm, maquinadas con un ángulo de corte entre 15 – 20 °. Teniendo en cuenta que el ASSAB 75 es un acero bonificado al cromo níquel, fabricado bajo el proceso M y R de SKF que consiste en fundición y refinado del acero, lo cual permite conseguir un acero puro y poca escoria, debido a su alta resistencia a la fatiga, se puede utilizar en piezas que estén sometidas a grandes esfuerzos y desgastes. Ver anexo 1.
9. Placa tope: Esta placa sirve para dar estabilidad y evitar que la probeta se levante.

## **2.2. Descripción de muestras de PET**

### **2.2.1. PET**

El Polietileno de Tereftalato (PET), como se ha descrito anteriormente es un material plástico que posee propiedades físicas y mecánicas muy buenas como su resistencia, fácil moldeo y un bajo costo de adquisición, por lo tanto la composición de las probetas tienen un elevado porcentaje de PET. El material utilizado para la elaboración de las probetas es proveniente de la empresa INMEPLAST de la ciudad de Cuenca. El polietileno de tereftalato fue sometido a un proceso de deshidratación a través de un secador térmico, debido a que es un polímero higroscópico que absorbe humedad del ambiente.

Tabla 2.1 Características del PET de Inmeplast

| <b>Polietileno de Tereftalato</b> |                                  |             |
|-----------------------------------|----------------------------------|-------------|
| Características                   | Forma                            | Granular    |
|                                   | Color                            | Blanco      |
|                                   | Peso                             | Ligero      |
| Propiedades                       | Temperatura de Transición Vítrea | 270° - 300° |
|                                   | Granulometría                    | Uniforme    |
|                                   | Reciclabilidad                   | Alta        |

Fuente: Empresa Inmeplast



Figura 2.5 Grano de Polietileno de Tereftalato

### 2.2.2. Arena

La arena utilizada para la elaboración de las muestras es procedente del sector El Tahual, El Descanso, ubicado en la provincia del Azuay, de la formación Biblián.

La litología del terreno es una secuencia sedimentaria clástica que presenta alternancia de argilitas, limolitas rojizas y areniscas tobáceas de grano fino a grueso, también se presentan conglomerados de cantos mal sorteados y subangulares de la formación

Yunguilla. El uso de este tipo de arena es principalmente en labores de construcción por su dureza, compactación y bajo costo económico.

Tabla 2.2 Características de la arena

| <b>Arena Andesítica</b> |                          |                         |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Características         | Origen                   | Ígneo Extrusivo         |
|                         | Composición              | Intermedia Básica       |
|                         | Forma                    | Piroclastos             |
| Propiedades             | Densidad                 | 2,42 gr/cm <sup>3</sup> |
|                         | Absorción                | 5,40%                   |
|                         | Porcentaje M. Finos      | < Malla Nro. 100:15%    |
|                         | Granulometría            | Discontinua             |
|                         | Calidad Física y Química | Buena como agregados    |

Fuente: (Rodríguez, 2018)



Figura 2.6 Arena

### 2.2.3. Forma y tamaño

La forma y tamaño de las muestras se determinaron en estudios anteriores de pandeo, con relación y tamaño proporcional, para lograr así que el esfuerzo cortante se distribuya uniformemente. Las dimensiones de los prismas cuadrangulares fueron establecidos en relación de los marcos que se utilizan en la fortificación minera para su debida comparación con las probetas de madera, las mismas que son: 250 mm de largo x 50 mm de ancho x 50 mm de alto.

En el caso de las probetas PET – arena, existe una mayor cantidad de PET en relación a la cantidad de arena, por lo que al momento de fusionarse se obtendrá un volumen mayor debido a que se encierran los granos de arena y se plastifican, ocupando más espacio en comparación a otras probetas con menor volumen de PET.

### 2.2.4. Diseño de las muestras de PET

En la elaboración de las muestras se tiene como objetivo la utilización del PET como el producto principal. Este proceso se realiza con materiales reciclables, teniendo un total de 10 piezas con dimensiones de 250 mm de largo x 50 mm de ancho x 50 mm de alto, con diferentes porcentajes de composición de PET y arena.

Se procedió a elaborar la siguiente muestra, con 1090 gramos de material, dentro de los cuales estuvo incluido el 10% de pérdida de durante el proceso de fundición y moldeo. En esta ocasión la presión aplicada al molde fue mayor, la cantidad de material fue precisa y finalmente se obtuvieron los resultados deseados (Malla, 2019). Se planteó cuatro tipos de muestras, teniendo en cuenta que el porcentaje de PET- arena tenía que ser igual que en los demás estudios para de esta manera se pudiera realizar el experimento.

Relación PET/Arena: (Malla, 2019)

- Relación: 100% PET – 0% Arena
- Relación: 90% PET – 10% Arena
- Relación: 80% PET – 20% Arena



- Relación: 70% PET – 30% Arena


### 2.2.4.1.Descripción de las muestras de PET

- Muestra N° 1

La composición de esta muestra tendrá un contenido de 1090 gr de puro Polietileno de Tereftalato (PET).

Tabla 2.3 Composición muestra N° 1

| Compuesto | %   | Gr   |
|-----------|-----|------|
| PET       | 100 | 1090 |
| Arena     | -   | -    |




- Muestra N°2

Su elaboración tendrá una composición de 90% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 10% de arena de la malla #50 con un tamaño de 0,595mm.

Tabla 2.4 Composición muestra N° 2

| Compuesto | %  | Gr  |
|-----------|----|-----|
| PET       | 90 | 980 |
| Arena     | 10 | 110 |




- Muestra N°3

Su fabricación tendrá una composición de 80% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 20% de arena de la malla #50 con un tamaño de 0,595mm.

Tabla 2.5 Composición muestra N° 3

| Compuesto | %  | Gr  |
|-----------|----|-----|
| PET       | 80 | 870 |
| Arena     | 20 | 220 |




- Muestra N°4

Su obtención tendrá una composición de 70% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 30% de arena de la malla #50 con un tamaño de 0,595mm.

Tabla 2.6 Composición muestra N° 4

| Compuesto | %  | Gr  |
|-----------|----|-----|
| PET       | 70 | 765 |
| Arena     | 30 | 325 |




- Muestra N°5

Su elaboración tendrá una composición de 90% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 10% de arena de la malla #40 con un tamaño de 0,420mm.

Tabla 2.7 Composición muestra N° 5

| Compuesto | %  | Gr  |
|-----------|----|-----|
| PET       | 90 | 980 |
| Arena     | 10 | 110 |




- Muestra N°6

Su fabricación tendrá una composición de 80% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 20% de arena de la malla #40 con un tamaño de 0,420mm.

Tabla 2.8 Composición muestra N° 6

| Compuesto | %  | Gr  |
|-----------|----|-----|
| PET       | 80 | 870 |
| Arena     | 20 | 220 |

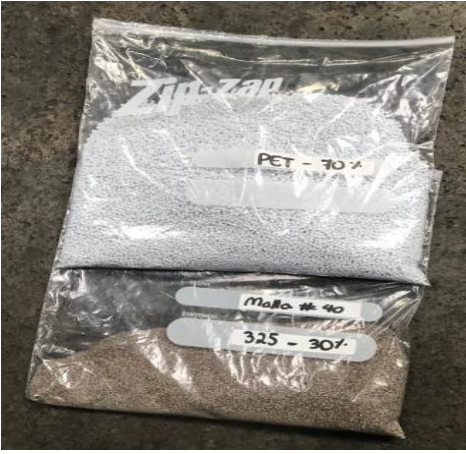


- Muestra N°7

Su obtención tendrá una composición de 70% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 30% de arena de la malla #40 con un tamaño de 0,420mm.

Tabla 2.9 Composición muestra N° 7

| Compuesto | %  | Gr  |
|-----------|----|-----|
| PET       | 70 | 765 |
| Arena     | 30 | 325 |




- Muestra N°8

Su elaboración tendrá una composición de 90% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 10% de arena de la malla #30 con un tamaño de 0,297mm.

Tabla 2.10 Composición muestra N° 8

| Compuesto | %  | Gr  |
|-----------|----|-----|
| PET       | 90 | 980 |
| Arena     | 10 | 110 |




- Muestra N°9

Su fabricación tendrá una composición de 80% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 20% de arena de la malla #30 con un tamaño de 0, 297mm.

Tabla 2.11 Composición muestra N° 9

| Compuesto | %  | Gr  |
|-----------|----|-----|
| PET       | 80 | 870 |
| Arena     | 20 | 220 |




- Muestra N°10

Su obtención tendrá una composición de 70% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 30% de arena de la malla #30 con un tamaño de 0, 297mm.

Tabla 2.12 Composición muestra N° 10

| Compuesto | %  | Gr  |
|-----------|----|-----|
| PET       | 70 | 765 |
| Arena     | 30 | 325 |



### **2.3. Procedimiento de realización de probetas de PET – Arena**

Al momento de realizar las muestras se tuvo estrictas precauciones para así evitar algún daño a la salud, debido a que en su proceso de elaboración se generan vapores por su fundición lo cual puede ocasionar quemaduras.

#### **2.3.1. Preparación de la arena**

- Se recolecta dos tipos de agregados: arena gruesa y arena fina.
- Se procede a mezclar la arena gruesa y fina; golpearlas para que así los conglomerados formados se destruyan.
- Se coloca la arena en recipientes y se procede a lavar con abundante agua y realizar movimientos circulares para que así se extraigan los limos incluidos en el material.
- Una vez finalizado el proceso de lavado se debe escurrir el agua de los recipientes para proceder con el proceso de secado, mediante el horno a una temperatura de 100° por un tiempo de 3 horas para secarlas completamente.
- Se debe colocar el material en los tamices de diámetro mayor a menor, luego se deben pasar los tamices al agitador mecánico por un tiempo de 7 minutos.
- El material retenido por los tamices N° 30, 40 y 50, es pesado por separado en las bandejas.
- Se tuvo una pérdida de 57 gramos en todo el proceso de tamización.

Tabla 2.13 Análisis granulométrico

| Arena                     |                         |                    |                              |              |                        |          |
|---------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------|--------------|------------------------|----------|
| Total de Muestra: 9500 gr |                         |                    |                              |              |                        |          |
| Tamiz                     | Tamaño de apertura (mm) | Peso Retenido (gr) | Peso Retenido Acumulado (gr) | Retenido (%) | Retenido Acumulado (%) | % Pasado |
| Nro. 4                    | 2,800                   | 83                 | 83                           | 0,88         | 0,88                   | 99,12    |
| Nro. 8                    | 2,360                   | 209                | 292                          | 2,21         | 3,09                   | 96,91    |
| Nro. 10                   | 2,000                   | 111                | 403                          | 1,17         | 4,26                   | 95,74    |
| Nro. 16                   | 1,190                   | 539                | 942                          | 5,70         | 9,96                   | 90,04    |
| Nro. 20                   | 0,850                   | 541                | 1483                         | 5,72         | 15,68                  | 84,32    |
| Nro. 30                   | 0,595                   | 988                | 2471                         | 10,46        | 26,14                  | 73,86    |
| Nro. 40                   | 0,420                   | 2319               | 4790                         | 24,55        | 50,69                  | 49,31    |
| Nro. 50                   | 0,297                   | 2027               | 6817                         | 21,46        | 72,15                  | 27,85    |
| Nro. 100                  | 0,149                   | 2159               | 8976                         | 22,86        | 95,01                  | 4,99     |
| Fondo                     |                         | 467                | 9443                         | 4,94         | 99,95                  | 0,05     |

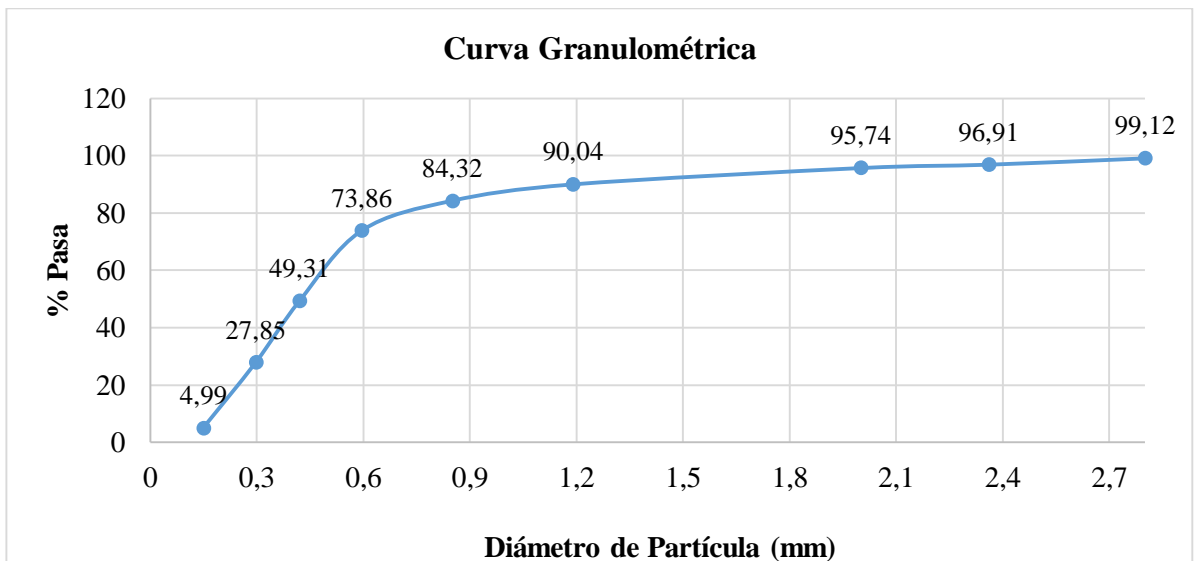


Figura 2.7 Curva granulométrica

Para el análisis granulométrico se necesitó lo siguiente:

- Arena gruesa y fina.
- Tamices N° 4, 8, 10, 16, 20, 30, 40, 50 y 100.
- Balanza digital.
- Bandejas metálicas.
- Agitador de tamices mecánico.
- Horno de secado.

### **2.3.2. Preparación del PET**

Según Rodríguez; el Polietileno de Tereftalato utilizado en este experimento es de material reciclado, el cual se puede obtener en empresas con experiencia y alta calidad tecnológica ubicadas en su mayoría en la ciudad de Guayaquil (2018).

Para obtener este material, se deben realizar varios procesos descritos a continuación:

- **Recolección de materiales reciclables:** Existen varios sitios en los que se recolectan estos materiales, colaborando a su vez con el medio ambiente y brindando empleo, una vez obtenidas cantidades significativas, estos productos son adquiridos por ciertas empresas que se dedican a un posterior proceso de elaboración de polietileno de tereftalato.
- **Clasificación y separación:** Todo tipo de material es separado para así obtener los polímeros e igualmente clasificarlos según su tipo es decir polietilenos, polipropilenos, poliuretanos, entre otros. Es muy importante que al momento de realizar el polímero reciclado, éste conste de un solo tipo de polímero, de lo contrario el nuevo polímero perderían o alterarían sus propiedades.
- **Limpieza:** Luego de clasificar y separar los materiales se procede a lavar para de esta manera remover cualquier tipo de impureza presente, hay dos maneras de realizar el lavado: manual o mecanizado. Ambos procesos se deben realizar



cuidadosamente para limpiar totalmente el material evitando cualquier tipo de alteración o daño en el mismo. Teniendo en cuenta que en este proceso no se deben utilizar detergentes o algún producto químico, debido a que el agua utilizada en este debe ser devuelta a su cauce natural en las mismas condiciones que se obtuvo, por lo que para recuperar el agua en su mismo estado será complicado o incluso imposible debido al tratamiento necesario.

- Trituración: Luego de proceso de limpieza se procede a la trituración o molienda del material. El material es triturado en un molino de polímeros hasta conseguir un tamaño aproximado de 1 pulgada y mayormente uniforme.
- Lavado y secado: Por medio de todos los pasos dados anteriormente se busca eliminar cualquier tipo de impurezas que hayan permanecido en el material. En este proceso tampoco se utilizarán detergentes o algún producto químico para el lavado e igualmente se lo podrá realizar manual o mecánicamente. El secado del material se realizará por medio de máquinas de acción centrífuga, ya que por acción de aire caliente permiten escurrir y liberar todo tipo de humedad presente en el material. Por último se coloca el material dentro de contenedores asépticos que mediante varios procesos de fusión, bombeo y presión que dan origen al grano de PET.

### **2.3.3. Fabricación de las probetas de PET**

- Cantidad de material: Para cada probeta se requirió de 1090 gramos de material, la cantidad de PET y arena utilizados dependió de la relación a la que pertenece, descrito anteriormente en el diseño de muestras. Luego se combinó los materiales hasta crear una mezcla uniforme para una posterior fundición.

- Tipo de hornos: Para la elaboración de las muestras se requirió el uso de dos hornos de altas temperaturas, los cuales fueron facilitados por la empresa Inmeplast. El primer horno se utilizó para la fundición del material con una temperatura de 350°C, mientras que el segundo horno fue utilizado para el enfriamiento de las muestras a temperaturas de 100°C, debido a que las muestras no deben ser expuestas directamente al ambiente ya que el cambio brusco de temperatura provocara su rotura.
- Preparación del molde: Antes de fundir las muestras, se colocó el molde dentro del horno a una temperatura de 350°C, para luego proceder a untar aceite en las paredes del molde para así evitar que al momento de colocar el material fundido queden restos en sus paredes.
- Fundición del material: Para la fundición de las muestras se utilizó un recipiente metálico resistente a altas temperaturas, en el mismo fue colocado el material mezclado para posteriormente introducirlo al horno por unos 5 - 7 minutos aproximadamente, se lo retiro con cuidado para mezclar y de esta manera la fundición se realiza uniformemente en todo el material, este proceso se realizó unas 4 -5 veces aproximadamente.

Teniendo en cuenta que la temperatura del horno con la que se inició fue de 300°C y en cada extracción del recipiente se incrementaban unos 10°C hasta llegar a los 350°C, esta temperatura es la necesaria para que el polietileno de tereftalato polimérico y encapsule cada grano de arena.

Es importante tener en cuenta que este procedimiento requiere de cuidado, responsabilidad y precaución por parte de quien lo realiza, es obligatorio para la salud de las personas el uso de guantes, mascarillas y pinzas debido a que se desprenden vapores dañinos debido a la manipulación del molde caliente.

Para la realización de las muestras, se requiere rapidez al momento de fundir el material por lo contrario se puede enfriar y endurecer.

- **Formación de las probetas:** Obtenida la polimerización adecuada, se transfiere el material dentro del molde metálico con ayuda de guantes, pinzas y espátulas, que sirven para evitar pérdidas del material. Una vez que el material se encuentra dentro del molde se coloca la tapa, para ser llevado a la prensa de compresión lo cual permite ejercer presión al molde para así compactar de mejor manera las probetas y eliminar posibles excesos.
- **Desmolde:** Una vez retirado el molde de la prensa simple, se desarma para extraer la probeta.
- **Enfriamiento de las probetas:** Las probetas son llevada al horno con temperaturas de 100°C, alrededor de 20 minutos se disminuyó la temperatura a 50°C y por último pasando 20 minutos más se acortó la temperatura a 10°C por aproximadamente 1 hora, para así evitar un shock térmico en las probetas y brindar un enfriamiento equilibrado.

Luego de que la probeta permanece a temperatura de 10°C durante 1 hora, se procede a retirarla del horno y dejarla a temperatura ambiente por 12 horas.

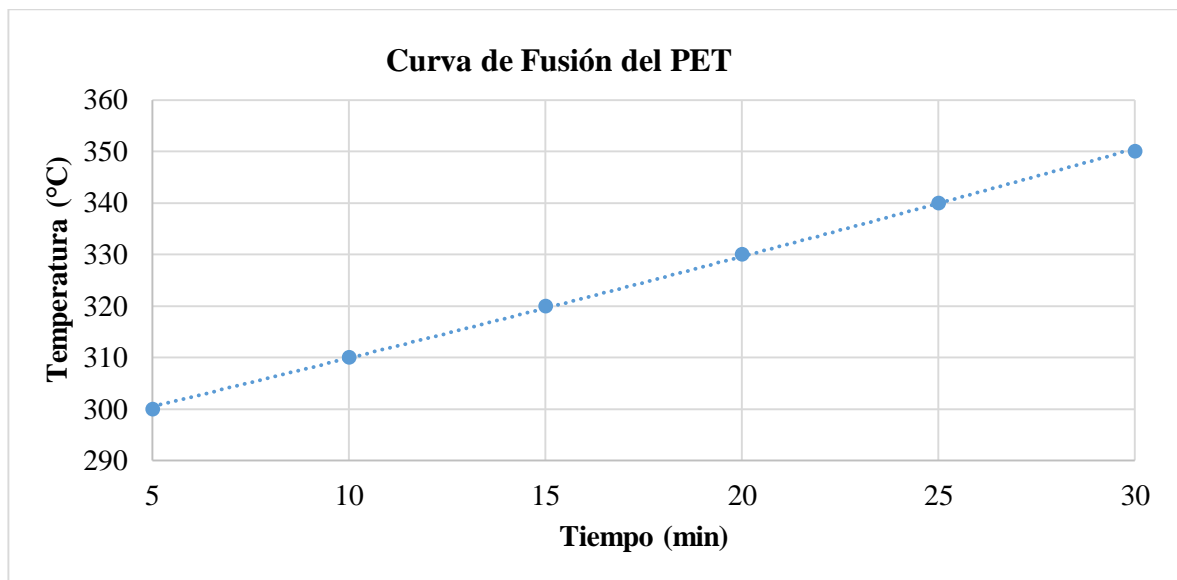


Figura 2.8 Curva de fusión del PET

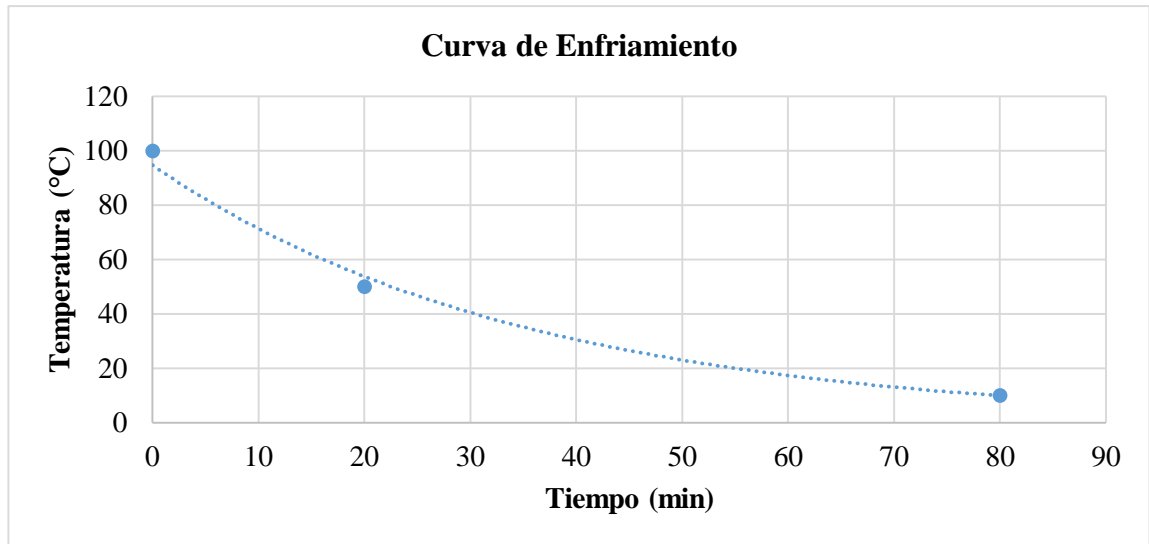


Figura 2.9 Curva de enfriamiento de las probetas de PET

#### 2.3.4. Caracterización de las probetas de PET

En las siguientes tablas se describen las características principales de las probetas de PET, para lo cual se detalló su peso y dimensiones.

Tabla 2.14 Características de la probeta 1

| <b>Probeta 1</b>          |        |
|---------------------------|--------|
| Peso del material (Kg)    | 1.090  |
| Peso de las probetas (Kg) | 0.898  |
| Ancho (mm)                | 50.00  |
| Espesor (mm)              | 50.00  |
| Longitud (mm)             | 250.00 |

Tabla 2.15 Características de la probeta 2

| <b>Probeta 2</b>          |        |
|---------------------------|--------|
| Peso del material (Kg)    | 1.090  |
| Peso de las probetas (Kg) | 0.924  |
| Ancho (mm)                | 50.00  |
| Espesor (mm)              | 50.00  |
| Longitud (mm)             | 250.00 |

Tabla 2.16 Características de la probeta 3

| <b>Probeta 3</b>          |        |
|---------------------------|--------|
| Peso del material (Kg)    | 1.090  |
| Peso de las probetas (Kg) | 0.949  |
| Ancho (mm)                | 50.00  |
| Espesor (mm)              | 50.00  |
| Longitud (mm)             | 250.00 |

Tabla 2.17 Características de la probeta 4

| <b>Probeta 4</b>          |        |
|---------------------------|--------|
| Peso del material (Kg)    | 1.090  |
| Peso de las probetas (Kg) | 0.990  |
| Ancho (mm)                | 50.00  |
| Espesor (mm)              | 50.00  |
| Longitud (mm)             | 250.00 |

Tabla 2.18 Características de la probeta 5

| <b>Probeta 5</b>          |        |
|---------------------------|--------|
| Peso del material (Kg)    | 1.090  |
| Peso de las probetas (Kg) | 0.947  |
| Ancho (mm)                | 50.00  |
| Espesor (mm)              | 50.00  |
| Longitud (mm)             | 250.00 |

Tabla 2.19 Características de la probeta 6

| <b>Probeta 6</b>          |        |
|---------------------------|--------|
| Peso del material (Kg)    | 1.090  |
| Peso de las probetas (Kg) | 0.931  |
| Ancho (mm)                | 50.00  |
| Espesor (mm)              | 50.00  |
| Longitud (mm)             | 250.00 |

Tabla 2.20 Características de la probeta 7

| <b>Probeta 7</b>          |        |
|---------------------------|--------|
| Peso del material (Kg)    | 1.090  |
| Peso de las probetas (Kg) | 0.979  |
| Ancho (mm)                | 50.00  |
| Espesor (mm)              | 50.00  |
| Longitud (mm)             | 250.00 |

Tabla 2.21 Características de la probeta 8

| <b>Probeta 8</b>          |        |
|---------------------------|--------|
| Peso del material (Kg)    | 1.090  |
| Peso de las probetas (Kg) | 0.910  |
| Ancho (mm)                | 50.00  |
| Espesor (mm)              | 50.00  |
| Longitud (mm)             | 250.00 |

Tabla 2.22 Características de la probeta 9

| <b>Probeta 9</b>          |        |
|---------------------------|--------|
| Peso del material (Kg)    | 1.090  |
| Peso de las probetas (Kg) | 0.964  |
| Ancho (mm)                | 50.00  |
| Espesor (mm)              | 50.00  |
| Longitud (mm)             | 250.00 |

Tabla 2.23 Características de la probeta 10

| <b>Probeta 10</b>         |        |
|---------------------------|--------|
| Peso del material (Kg)    | 1.090  |
| Peso de las probetas (Kg) | 1.020  |
| Ancho (mm)                | 50.00  |
| Espesor (mm)              | 50.00  |
| Longitud (mm)             | 250.00 |

## 2.4. Ejecución experimental en las probetas de PET

Como se mencionó anteriormente el objetivo de este trabajo de investigación es determinar la resistencia al esfuerzo cortante de las probetas de PET para comprobar si la resistencia de este material es igual o similar a distintos tipos de madera: eucalipto, pino y teca utilizados comúnmente en fortificación minera.

Por consiguiente se establecieron las dimensiones de las probetas: 50mm de ancho y 50mm de espesor y 250mm de longitud.



Figura 2.10 Muestras de PET

Se deben tener en cuenta las medidas de seguridad, ya que en el proceso de esta actividad algunas probetas por el impacto se partieron en varias partículas.

A continuación el procedimiento con el que se ejecutaron las muestras:

- Primero se colocó la probeta de manera horizontal dentro de la máquina cortante para aplicar el ensayo al esfuerzo cortante, lo más centrada posible para obtener resultados exactos.
- Luego de ubicar la máquina cortante dentro de la prensa que tiene una capacidad de 50 toneladas que se encuentra en la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió aplicar una fuerza, la misma que incrementa hasta que la probeta falle.



- Finalmente se determinó la carga máxima aplicada, respecto al esfuerzo cortante, este dato se refleja en el monitor de la prensa.
- El mismo procedimiento se realizó con las 10 probetas de PET.

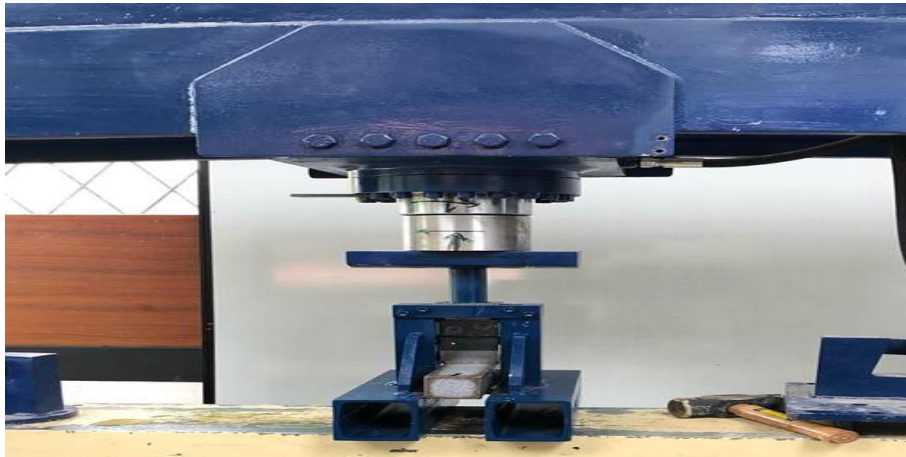


Figura 2.11 Resistencia al esfuerzo cortante



Figura 2.12 Probetas sometidas a ensayo

## 2.5. Descripción de las probetas de madera

La madera es de gran interés en el campo de la ingeniería en minas, para la utilización en la fortificación de las excavaciones mineras, debido a sus excelentes propiedades físicas y mecánicas como: anisotropía, elasticidad, higroscopicidad, densidad, entre otras. Este material es usado frecuentemente por su reducido costo y fácil manipulación, además cumple perfectamente la necesidad de mantener las condiciones de seguridad requeridas en las excavaciones mineras.

Las probetas de madera tienen forma de prisma cuadrangular cortadas en dirección a las fibras naturales del tronco con dimensiones de: 50 mm de ancho, 50 mm de espesor y de 250 mm de longitud. En total se emplearon 15 probetas de los diferentes tipos de madera utilizadas en la fortificación minera: 5 de pino, 5 de eucalipto y 5 de teca.

### 2.5.1. Caracterización de las probetas de madera

#### 2.5.1.1. Pino

En las siguientes tablas se describen las características principales de la probetas de pino para lo cual se detalló el peso inicial que aproximadamente se encuentra en un valor de 0.32 kg, el peso final se determinó posterior a los diferentes tiempos de inmersión en agua en este caso se aplicó 7, 14, 28 y 56 días. Además se definió las dimensiones de las probetas.

Tabla 2.24 Características de la probeta 1

| <b>Probeta 1</b>           |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.316  |
| Peso Final (Kg)            | 0.290  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 0      |

Tabla 2.25 Características de la probeta 2

| <b>Probeta 2</b>           |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.321  |
| Peso Final (Kg)            | 0.446  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 7      |

Tabla 2.26 Características de la probeta 3

| <b>Probeta 3</b>           |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.315  |
| Peso Final (Kg)            | 0.470  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 14     |

Tabla 2.27 Características de la probeta 4

| <b>Probeta 4</b>           |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.319  |
| Peso Final (Kg)            | 0.525  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 28     |

Tabla 2.28 Características de la probeta 5

| <b>Probeta 5</b>           |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.332  |
| Peso Final (Kg)            | 0.619  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 56     |

### 2.5.1.2 Eucalipto

En las siguientes tablas se describen las características principales de las probetas de eucalipto para lo cual se detalló el peso inicial que aproximadamente se encuentra en un valor de 0.63 kg, el peso final se determinó posterior a los diferentes tiempos de inmersión en agua en este caso se aplicó 7, 4, 28 y 56 días. Además se definió las dimensiones de las probetas.

Tabla 2.29 Características de la probeta 6

| <b>Probeta 6</b>           |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.569  |
| Peso Final (Kg)            | 0.557  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 0      |

Tabla 2.30 Características de la probeta 7

| <b>Probeta 7</b>           |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.651  |
| Peso Final (Kg)            | 0.703  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 7      |

Tabla 2.31 Características de la probeta 8

| <b>Probeta 8</b>           |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.654  |
| Peso Final (Kg)            | 0.734  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 14     |

Tabla 2.32 Características de la probeta 9

| <b>Probeta 9</b>           |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.616  |
| Peso Final (Kg)            | 0.744  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 28     |

Tabla 2.33 Características de la probeta 10

| <b>Probeta 10</b>          |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.667  |
| Peso Final (Kg)            | 0.827  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 56     |

### 2.5.1.3 Teca

En las siguientes tablas se describen las características principales de la probetas de teca para lo cual se detalló el peso inicial que aproximadamente se encuentra en un valor de 0.34 kg, el peso final se determinó posterior a los diferentes tiempos de inmersión en agua en este caso se aplicó 7, 4, 28 y 56 días. Además se definió las dimensiones de las probetas.

Tabla 2.34 Características de la probeta 11

| <b>Probeta 11</b>          |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.348  |
| Peso Final (Kg)            | 0.334  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 0      |

Tabla 2.35 Características de la probeta 12

| <b>Probeta 12</b>          |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.311  |
| Peso Final (Kg)            | 0.398  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 7      |

Tabla 2.36 Características de la probeta 13

| <b>Probeta 13</b>          |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.333  |
| Peso Final (Kg)            | 0.457  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 14     |

Tabla 2.37 Características de la probeta 14

| <b>Probeta 14</b>          |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.337  |
| Peso Final (Kg)            | 0.494  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 28     |

Tabla 2.38 Características de la probeta 15

| <b>Probeta 15</b>          |        |
|----------------------------|--------|
| Peso Inicial (Kg)          | 0.374  |
| Peso Final (Kg)            | 0.540  |
| Ancho (mm)                 | 50.00  |
| Espesor (mm)               | 50.00  |
| Longitud (mm)              | 250.00 |
| Tiempo de inmersión (días) | 56     |

## 2.6. Ejecución experimental en las muestras de madera

Como se mencionó anteriormente el objetivo de este trabajo de investigación es determinar la resistencia de los diferentes tipos de madera y comparar con la resistencia del PET al esfuerzo cortante, para lo cual se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se determinó los tipos de maderas más utilizados en las labores de fortificación que son: eucalipto, pino y teca.
- Por consiguiente se establecieron las dimensiones de las probetas: 50 mm de ancho, 50 mm de espesor 250 mm de longitud.
- Se debe tener conocimiento del peso inicial y final de cada una de las probetas para poder determinar el contenido de humedad por lo cual se establecieron el tiempo de inmersión de las probetas en agua, en el presente trabajo fueron sumergidas por 7, 14, 28 y 56 días.
- Se deben tener en cuenta las medidas de seguridad, ya que en el proceso de esta actividad algunas probetas, al momento de cortarse se partieron en varias partículas.



A continuación el procedimiento con el que se ejecutaron los ensayos para determinar la resistencia al esfuerzo cortante:

- Primero se colocó la probeta de manera horizontal dentro de la cizalla para aplicar el ensayo al esfuerzo cortante, lo más centrada posible para obtener resultados exactos.
- Luego de ubicar la cizalla dentro de la prensa que se encuentra en la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió aplicar una fuerza, la misma que incremento hasta que la probeta falle.
- Finalmente se determinó la resistencia máxima de la probeta, respecto a la fuerza aplicada.
- El mismo ensayo se realizó con las 15 probetas.

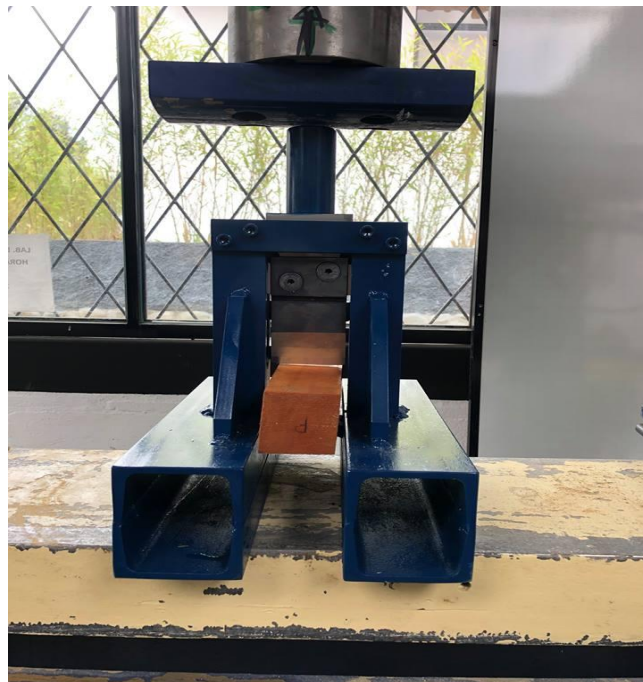


Figura 2.13 Resistencia al esfuerzo cortante



Figura 2.14 Probetas de eucalipto, pino y teca en estado natural



Figura 2.15 Probetas de eucalipto, pino y teca sumergidas 7 días



Figura 2.16 Probetas de eucalipto, pino y teca sumergidas 14 días



Figura 2.17 Probetas de eucalipto, pino y teca sumergidas 28 días



Figura 2.18 Probetas de eucalipto, pino y teca sumergidas 56 días

## CAPÍTULO III

### EVALUACIÓN DE RESULTADOS

El propósito de este análisis es examinar la rigidez y estabilidad mediante la evaluación de la resistencia al esfuerzo cortante en las probetas tanto de PET como de las maderas: eucalipto, pino y teca. Los resultados del ensayo en las maderas se presentan en tablas, figuras y curvas de correlación.

Luego de determinar las cargas máximas de resistencia al cortante de cada tipo de material se establecieron los esfuerzos y se realizó la comparación entre el PET y la madera, para así verificar si el polietileno de tereftalato ya combinado y fundido; es factible y seguro para la utilización en fortificación de minas.

A continuación se detallan los resultados obtenidos de las probetas a cortante en los diferentes tipos de madera: eucalipto, pino y teca, y en el PET.

#### **3.1. Interpretación de resultados**

En el ensayo todas las muestras fueron colocadas en sentido horizontal sometidas a una carga perpendicular al eje de simetría, que actúa sobre la sección de corte, sufriendo una falla por cortante, produciendo fracturas en el momento en que se supera la resistencia máxima.

Para la ejecución de las pruebas a esfuerzo cortante, aparte de considerar la fuerza perpendicular a la dirección de las fibras se toma en cuenta la variación del contenido de humedad en los diferentes tipos maderas: eucalipto, pino y teca; en lo que se refiere al PET -Arena, se modificó los porcentajes del contenido de arena y su granulometría.

A continuación se presentan los resultados de la ejecución del ensayo al esfuerzo cortante.

### 3.2. Tablas de resultados

#### 3.2.1. Resultados del PET

Para las probetas de PET, se tienen 3 mallas: N°50, N°40 y N°30; con diferentes porcentajes de arena: 10%, 20% y 30%.

El comportamiento de la mayoría de las probetas al momento de realizar el ensayo, fue brusco, presentando una fractura total y una superficie uniforme paralela a la fuerza.

Teniendo en cuenta el área de la sección transversal de 2500 mm<sup>2</sup> en base a las dimensiones de la probeta de 50 mm de ancho y 50 mm de espesor, ésta será considerada para el cálculo del esfuerzo cortante ( $\tau$ ).

Tabla 3.1 Resultado de esfuerzos máximos ( $\tau$ ) en MPa del PET

| Muestra PET | Malla | Composición         | Carga máxima aplicada (KN) | $\tau$ (MPa) |
|-------------|-------|---------------------|----------------------------|--------------|
| Probeta 1   | -     | 100% PET - 0% Arena | 14.98                      | 5.99         |
| Probeta 2   | 50    | 90% PET - 10% Arena | 5.69                       | 2.28         |
| Probeta 3   | 50    | 80% PET - 20% Arena | 13.13                      | 5.25         |
| Probeta 4   | 50    | 70% PET - 30% Arena | 10.82                      | 4.33         |
| Probeta 5   | 40    | 90% PET - 10% Arena | 16.58                      | 6.63         |
| Probeta 6   | 40    | 80% PET - 20% Arena | 8.70                       | 3.48         |
| Probeta 7   | 40    | 70% PET - 30% Arena | 14.40                      | 5.76         |
| Probeta 8   | 30    | 90% PET - 10% Arena | 14.09                      | 5.64         |
| Probeta 9   | 30    | 80% PET - 20% Arena | 10.69                      | 4.28         |
| Probeta 10  | 30    | 70% PET - 30% Arena | 12.55                      | 5.02         |

En el caso de las probetas de PET, las muestras N°1 y 5 fueron las que presentaron mayores resistencias de corte  $\tau$  de 5.99 MPa y 6.63 MPa respectivamente. Por lo contrario las muestras N°2 y 6 fueron las que presentaron menores resistencias de corte  $\tau$  de 2.28 MPa y 3.48 MPa respectivamente, como puede observarse en la tabla 3.1.

### 3.2.2. Resultados de la resistencia al esfuerzo cortante de eucalipto

En la tabla 3.2 se detallan los resultados de contenido de humedad en relación a los diferentes tiempos de inmersión, la carga aplicada en el ensayo y los esfuerzos máximos de las probetas de eucalipto. Considerando el área de la sección transversal de 2500 mm<sup>2</sup>.

Tabla 3.2 Resultado de esfuerzos máximos ( $\tau$ ) en MPa del eucalipto

| <b>Madera:<br/>Eucalipto</b> | <b>Contenido de<br/>humedad (%)</b> | <b>Carga máxima<br/>aplicada (KN)</b> | <b><math>\tau</math> (MPa)</b> |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| Probeta 1                    | 2.22                                | 38.04                                 | 15.22                          |
| Probeta 2                    | 38.94                               | 42.65                                 | 17.06                          |
| Probeta 3                    | 49.21                               | 44.44                                 | 17.78                          |
| Probeta 4                    | 64.58                               | 34.39                                 | 13.75                          |
| Probeta 5                    | 86.45                               | 32.53                                 | 13.01                          |

### 3.2.3. Resultados de la resistencia al esfuerzo cortante de pino

En la tabla 3.3 se detallan los resultados de contenido de humedad en relación a los diferentes tiempos de inmersión, la carga aplicada en el ensayo y los esfuerzos máximos de las probetas de pino. Considerando el área de la sección transversal de 2500 mm<sup>2</sup>.

Tabla 3.3 Resultado de esfuerzos máximos ( $\tau$ ) en MPa del pino

| <b>Madera: Pino</b> | <b>Contenido de humedad (%)</b> | <b>Carga máxima aplicada (KN)</b> | <b><math>\tau</math> (MPa)</b> |
|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Probeta 6           | 8.43                            | 21.20                             | 8.48                           |
| Probeta 7           | 7.99                            | 19.21                             | 7.68                           |
| Probeta 8           | 12.23                           | 18.63                             | 7.45                           |
| Probeta 9           | 20.78                           | 23.38                             | 9.35                           |
| Probeta 10          | 23.99                           | 21.46                             | 8.58                           |

### 3.2.4. Resultados de la resistencia al esfuerzo cortante de teca

En la tabla 3.4 se detallan los resultados de contenido de humedad en relación a los diferentes tiempos de inmersión, la carga aplicada en el ensayo y los esfuerzos máximos de las probetas de teca. Considerando el área de la sección transversal de 2500 mm<sup>2</sup>.

Tabla 3.4 Resultado de esfuerzos máximos ( $\tau$ ) en MPa de teca

| <b>Madera: Teca</b> | <b>Contenido de humedad (%)</b> | <b>Carga máxima aplicada (KN)</b> | <b><math>\tau</math> (MPa)</b> |
|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Probeta 11          | 4.02                            | 27.15                             | 10.86                          |
| Probeta 12          | 27.97                           | 19.33                             | 7.73                           |
| Probeta 13          | 37.24                           | 16.40                             | 6.56                           |
| Probeta 14          | 46.59                           | 29.33                             | 11.73                          |
| Probeta 15          | 44.39                           | 27.73                             | 11.09                          |



### 3.2.5. Tabla general de resultados de la resistencia al esfuerzo cortante de las maderas

Los valores finales de la resistencia al esfuerzo cortante máximo y contenido de humedad para las 15 probetas de eucalipto, pino y teca se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 3.5 Resultados finales de eucalipto, pino y teca

| <b>Tipo</b> | <b>Denominación</b> | <b>Contenido de humedad (%)</b> | <b>Carga máxima aplicada (KN)</b> | <b><math>\tau</math> (MPa)</b> |
|-------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Eucalipto   | Probeta 1           | 2.22                            | 38.04                             | 15.22                          |
|             | Probeta 2           | 38.94                           | 42.65                             | 17.06                          |
|             | Probeta 3           | 49.21                           | 44.44                             | 17.78                          |
|             | Probeta 4           | 64.58                           | 34.39                             | 13.75                          |
|             | Probeta 5           | 86.45                           | 32.53                             | 13.01                          |
| Pino        | Probeta 6           | 8.43                            | 21.20                             | 8.48                           |
|             | Probeta 7           | 7.99                            | 19.21                             | 7.68                           |
|             | Probeta 8           | 12.23                           | 18.63                             | 7.45                           |
|             | Probeta 9           | 20.78                           | 23.38                             | 9.35                           |
|             | Probeta 10          | 23.99                           | 21.46                             | 8.58                           |
| Teca        | Probeta 11          | 4.02                            | 27.15                             | 10.86                          |
|             | Probeta 12          | 27.97                           | 19.33                             | 7.73                           |
|             | Probeta 13          | 37.24                           | 16.40                             | 6.56                           |
|             | Probeta 14          | 46.59                           | 29.33                             | 11.73                          |
|             | Probeta 15          | 44.39                           | 27.73                             | 11.09                          |

### 3.3. Gráficas de resultados de la resistencia al esfuerzo cortante

#### 3.3.1. Diagrama de esfuerzo cortante del PET

Como se puede mostrar en la figura 3.1 la probeta N°5 presenta una mayor resistencia de carga, cuya composición es de 90% PET - 10% arena de la malla N°40, razón por la que debería considerarse este porcentaje en posteriores ensayos en la búsqueda de la composición óptima.

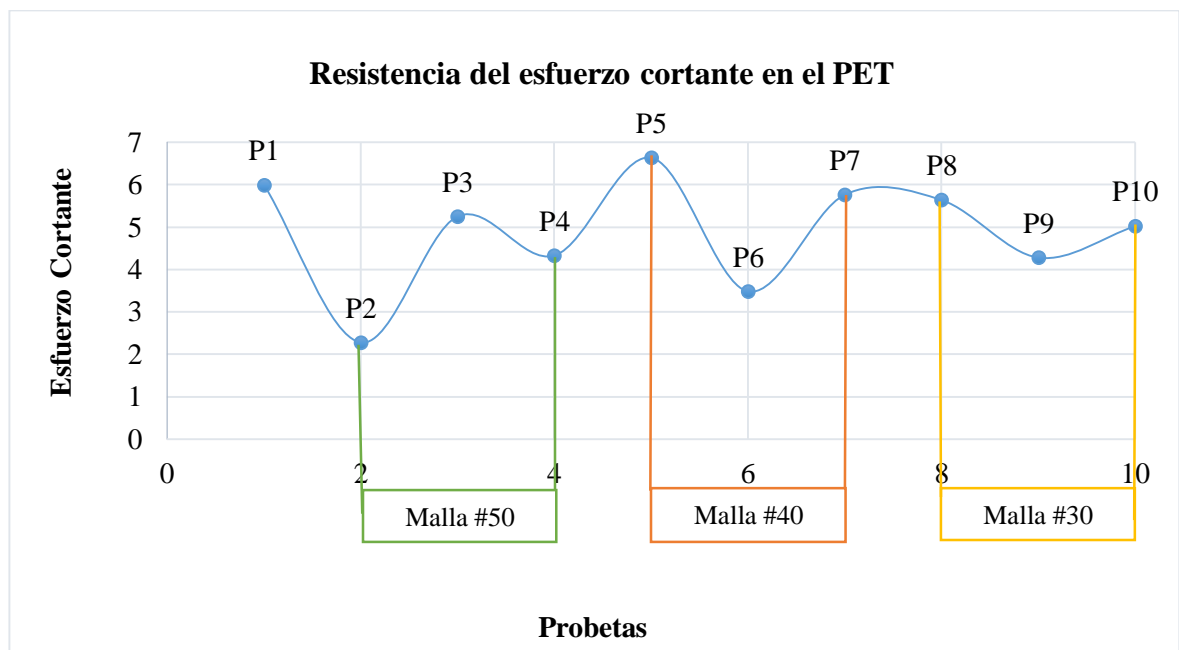


Figura 3.1 Esfuerzo cortante en el PET

No es posible la construcción de la curva como función matemática por variabilidad de los resultados, para lo cual se podría aplicar temas relacionados con la estadística.

Como se puede observar en la figura 3.1, las probetas de la malla N°50 presentan diferentes comportamientos; la resistencia más baja al esfuerzo cortante es de la probeta N° 2 con composición 90% PET – 10% arena, a diferencia de la probeta N° 3 con composición 80% PET – 20% arena, la cual presentó la resistencia más alta.

De igual manera en lo que se refiere a la malla N°40, la probeta N° 5 con 90% PET – 10% arena, presenta mayor resistencia al esfuerzo cortante mientras que la probeta N°6 con 80% PET – 20% arena es la menos resistencia al esfuerzo cortante.

De igual manera en la malla N°30 se puede observar que la probeta N°8 con composición 90% PET – 10% arena, es la que presenta mayor resistencia al esfuerzo cortante, a diferencia de la probeta N° 9 con composición 80% PET – 20% arena, que es la menos resistente.

### 3.3.2. Diagrama de esfuerzo cortante de las maderas

#### 3.3.2.1. Diagrama de esfuerzo cortante del eucalipto

En la siguiente curva se describe el comportamiento de ( $\tau$ ) con diferentes grados de contenido de humedad en el eucalipto.

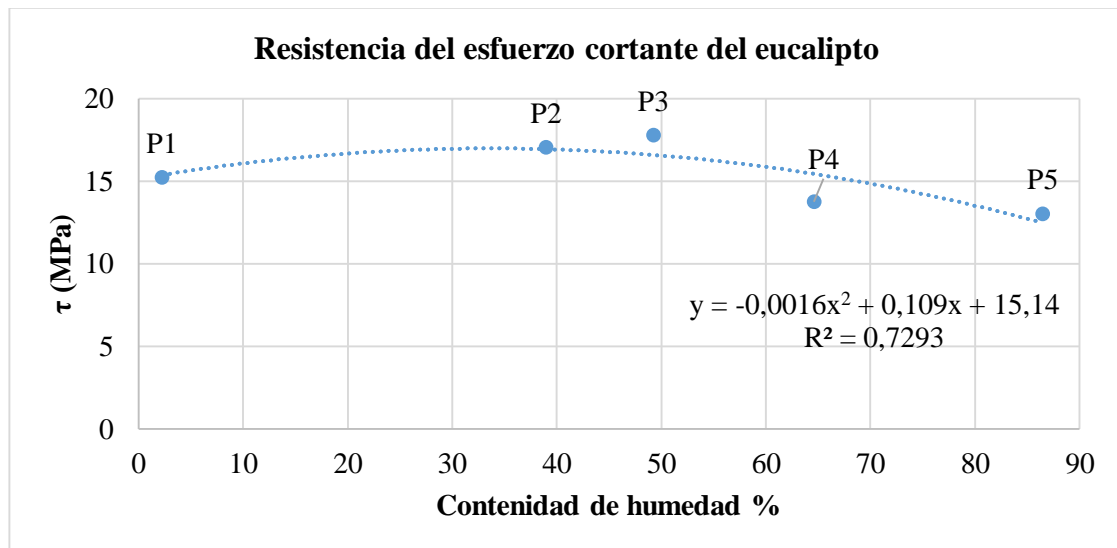


Figura 3.2 Esfuerzo cortante en el eucalipto

Observando que la probeta N°3 de eucalipto con un contenido de humedad del 49.21% es la que presenta una mayor resistencia al esfuerzo cortante con un valor de 17.78 MPa, en este tipo de madera tanto antes y después de 14 días de inmersión, se observa una resistencia menor del esfuerzo cortante.

Se planteó una curva de regresión en base al esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en función del contenido de humedad. La línea de tendencia se ajusta a una ecuación polinómica de segundo orden para lo cual se determinó el mejor coeficiente de correlación, el cual se encuentra en el rango aceptable (0.5 - 1).

A continuación se presenta la ecuación polinómica de la curva de la resistencia al esfuerzo cortante del eucalipto (y), en relación al contenido de humedad (x):

$$y = 15,14 - 0,0016x^2 + 0,109 x$$

$$R^2 = 0,7293$$

### 3.3.2.1. Diagrama de esfuerzo cortante del pino

En la siguiente curva se describe el comportamiento de ( $\tau$ ) en diferentes grados de contenido de humedad.

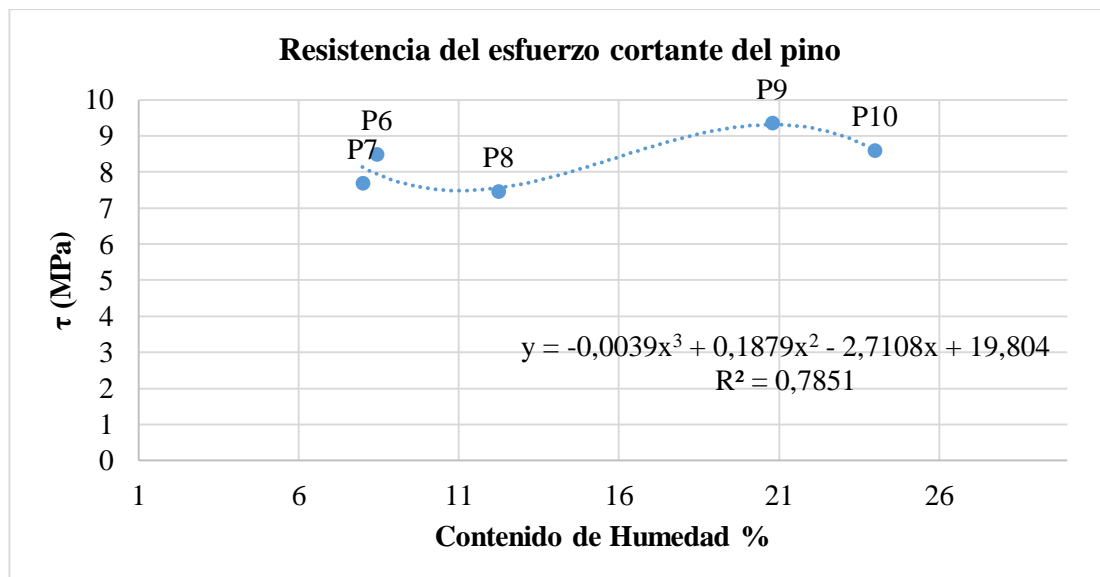


Figura 3.3 Esfuerzo cortante en el pino

La probeta N°9 de pino con un contenido de humedad del 20.78% es la que presenta una mayor resistencia al esfuerzo cortante con un valor de 9.35 MPa, en este tipo de madera tanto antes y después de 28 días de inmersión, se observa una resistencia menor del esfuerzo cortante.

Se planteó una curva de regresión en base al esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en función del contenido de humedad. La línea de tendencia se ajusta a una ecuación polinómica de tercer orden para lo cual se determinó el mejor coeficiente de correlación, el cual se encuentra en el rango aceptable (0.5 - 1).

A continuación se presenta la ecuación polinómica de la curva de la resistencia al esfuerzo cortante del eucalipto (y), en relación al contenido de humedad (x):

$$y = 19,804 - 0,0039x^3 + 0,1879x^2 - 2,7108x$$

$$R^2 = 0,7851$$

En vista del comportamiento irregular en las probetas del pino sería necesario realizar un análisis estadístico considerando: un mayor número de probetas y selección minuciosa en la calidad de este tipo de madera; para así obtener una distribución normal.

### 3.3.2.1. Diagrama de esfuerzo cortante de la teca

En la siguiente curva se describe el comportamiento de ( $\tau$ ) en diferentes grados de contenido de humedad.

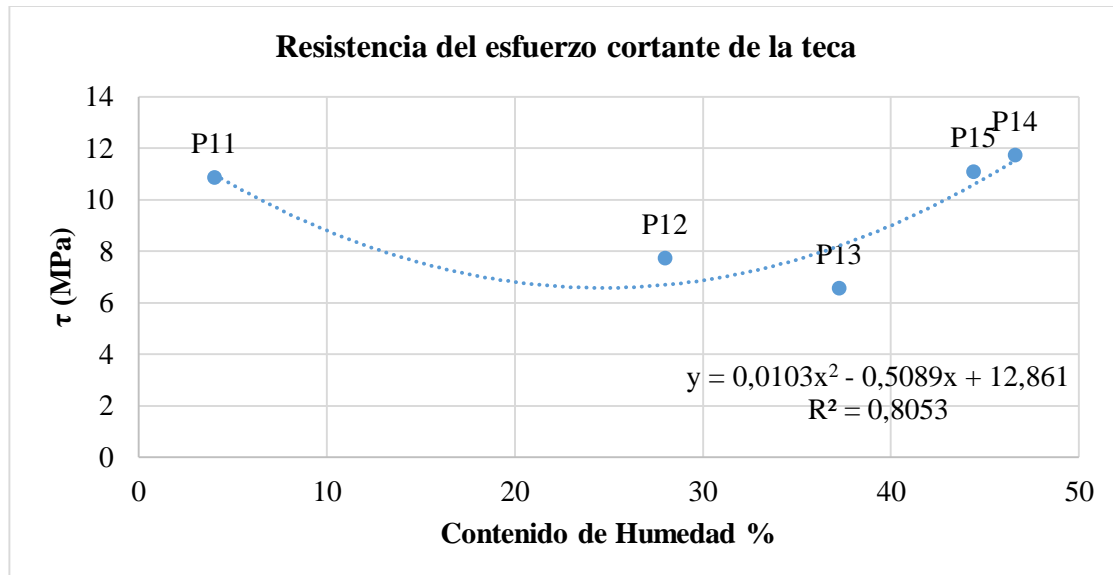


Figura 3.4 Esfuerzo cortante en la teca

La probeta N°14 de teca con un contenido de humedad del 46.59% es la que presenta una mayor resistencia al esfuerzo cortante con un valor de 11.73 MPa, en este tipo de madera tanto antes y después de 28 días de inmersión, se tiene una resistencia menor del esfuerzo cortante.

Se planteó una curva de regresión en base al esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en función del contenido de humedad. La línea de tendencia se ajusta a una ecuación polinómica de segundo orden para lo cual se determinó el mejor coeficiente de correlación, el cual se encuentra en el rango aceptable (0.5 - 1).

A continuación se presenta la ecuación polinómica de la curva de la resistencia al esfuerzo cortante del eucalipto (y), en relación al contenido de humedad (x):

$$y = 12,861 + 0,0103x^2 - 0,5089 x$$
$$R^2 = 0,8053$$

#### **3.4. Comparación de la resistencia al esfuerzo cortante y compresión simple**

Una vez obtenidos todos los valores se realizó una comparación con la resistencia a compresión simple obtenida en estudios anteriores de probetas elaboradas con la misma composición para el PET, de la tesis “Determinación del uso de Plástico PET como alternativa al uso de madera en fortificación minera” de Rodríguez D. Para la madera se tomó como referencia los valores de la resistencia a la compresión simple de la tesis “Alternativa del uso de las maderas en fortificación minera bajo diferentes condiciones de humedad” de Rivera A, considerando los porcentajes del contenido de humedad del presente trabajo ajustando a la curva de  $\tau$  - CH.

### 3.4.1. PET

Los datos de la resistencia a la compresión simple, indicados en la siguiente tabla 3.6 fueron tomados del trabajo de titulación de Daniel Rodríguez Andrade, Universidad del Azuay (2018).

Tabla 3.6 Resultados obtenidos de la resistencia a la compresión simple en el PET

| <b>Probetas de PET</b> | <b>Compresión Simple <math>\sigma</math> (MPa)</b> |
|------------------------|--|
| Muestra #1             | 75.7   |
| Muestra #2             | 75.22  |
| Muestra #3             | 69.36  |
| Muestra #4             | 64.26  |
| Muestra #5             | 65.84  |
| Muestra #6             | 35.86  |
| Muestra #7             | 58.9   |
| Muestra #8             | 47.44  |
| Muestra #9             | 65.75  |
| Muestra #10            | 53.84  |

Fuente: (Rodríguez, 2018)

#### 3.4.1.1. Relación $\tau/\sigma$ en el PET

Con el objetivo de encontrar la relación entre el esfuerzo cortante y la resistencia a la compresión simple, se procedió a calcular la relación  $\tau/\sigma$  y obtener el valor porcentual. De tal manera que se puede obtener el valor de  $\tau$  en la siguiente expresión:

$$\tau = Factor \cdot \sigma$$

En la siguiente tabla se detalla el porcentaje individual de cada probeta con la misma composición de PET, además se calculó el porcentaje promedio.

Tabla 3.7 Comparación de resultados con ensayos a la compresión simple del PET

| <b>Probetas</b> | <b>Compresión Simple <math>\sigma</math> (MPa)</b> | <b>Esfuerzo Cortante <math>\tau</math> (MPa)</b> | <b>Relación <math>\tau/\sigma</math> (%)</b> |
|-----------------|--|--|--|
| 1               | 75.7   | 5.99   | 7.9  |
| 2               | 75.22  | 2.28   | 3.0  |
| 3               | 69.36  | 5.25   | 7.6  |
| 4               | 64.26  | 4.33   | 6.7  |
| 5               | 65.84  | 6.63   | 10.1   |
| 6               | 35.86 *  | 3.48   | 9.7  |
| 7               | 58.9   | 5.76   | 9.8  |
| 8               | 47.44 *  | 5.64   | 11.9   |
| 9               | 65.75  | 4.28   | 6.5  |
| 10              | 53.84  | 5.02   | 9.3  |
| <b>Promedio</b> | 66.10  | 4.86   | 7.35   |

\*Valores no considerados en el promedio por estar fuera de distribución normal.

$$FACTOR = \frac{\tau_{promedio}}{\sigma_{promedio}}$$

$$\tau = 0.0735 \sigma$$



En la siguiente figura se presenta la curva ( $\tau - \sigma$ ) Vs (%) PET – arena; la compresión simple es identificada con la letra M, y en el caso del esfuerzo cortante con la letra P, los cuales son determinados en el presente trabajo.

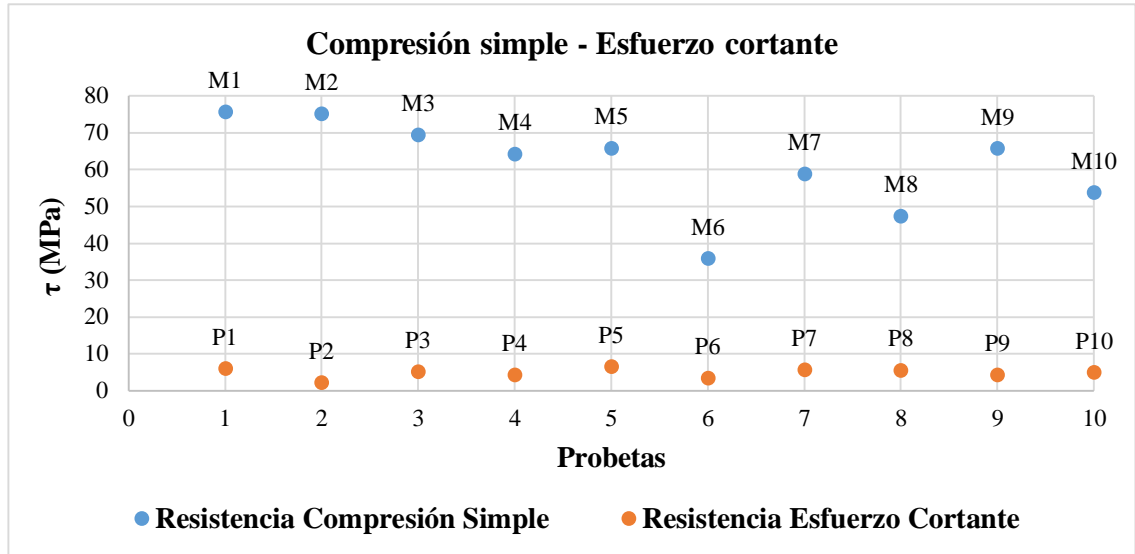


Figura 3.5 Comparación compresión simple y esfuerzo cortante del PET

- Compresión simple probetas (M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9 y M10)
- Esfuerzo cortante probetas (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9 y P10)

En la figura 3.5 se puede apreciar que todos los valores de resistencia a la compresión simple son mayores a la resistencia del esfuerzo cortante en el PET. Se observa que existe una relación entre  $\tau$  y  $\sigma$ , aunque las probetas M6 y M8, están fuera de la distribución normal; razón por la que se eliminaron estos puntos para obtener el  $\sigma$  promedio.

### 3.4.2. Madera

Los datos de la resistencia a la compresión simple para eucalipto, pino y teca, indicados en la siguiente tabla 3.7 fueron tomados del trabajo de titulación de Anaís Rivera Urgilés, Universidad del Azuay (2018).

Tabla 3.8 Resultados obtenidos de la resistencia a la compresión simple en el eucalipto, pino y teca

| <b>Tipo</b> | <b>Probetas de Madera</b> | <b>Compresión Simple <math>\sigma</math> (MPa)</b> |
|-------------|---------------------------|--|
| Eucalipto   | E1                        | 60   |
|             | E2                        | 39.37  |
|             | E3                        | 38.32  |
|             | E4                        | 36.96  |
|             | E5                        | 37.08  |
| Pino        | P1                        | 21.62  |
|             | P2                        | 13.2   |
|             | P3                        | 15.56  |
|             | P4                        | 13.63  |
|             | P5                        | 11.43  |
| Teca        | T1                        | 51.29  |
|             | T2                        | 38.96  |
|             | T3                        | 34.2   |
|             | T4                        | 24.25  |
|             | T5                        | 27.49  |

Fuente: (Rivera, 2018)

En la tabla 3.8 se detallan las probetas de madera, la cuales están clasificadas por la letra inicial de cada tipo de madera y el número según el tiempo de inmersión en agua: estado natural (1), 7 días (2), 14 días (3), 28 días (4) y 56 días la (5).

Dado de que no hay correspondencia en los porcentajes del contenido de humedad descritos en el trabajo de la ingeniera Anaís Rivera y el presente; se tomó los valores del esfuerzo a la compresión simple, aquellos que corresponden a la curva del comportamiento  $\tau$  - CH del presente trabajo.

Tabla 3.9 Probetas de eucalipto, pino y teca

| <b>Tipo</b> | <b>Denominación</b> | <b>Contenido de humedad (CH)</b> | <b>Compresión Simple Corregido (MPa)</b> | <b>Esfuerzo Cortante <math>\tau</math> (MPa)</b> |
|-------------|---------------------|----------------------------------|--|--|
| Eucalipto   | Probeta 1           | 2.22                             | 90                                       | 15.22  |
|             | Probeta 2           | 38.94                            | 32.7                                     | 17.06  |
|             | Probeta 3           | 49.21                            | 30                                       | 17.78  |
|             | Probeta 4           | 64.58                            | 25.4                                     | 13.75  |
|             | Probeta 5           | 86.45                            | 19.5                                     | 13.01  |
| Pino        | Probeta 6           | 8.43                             | 22.6                                     | 8.48   |
|             | Probeta 7           | 7.99                             | 22                                       | 7.68   |
|             | Probeta 8           | 12.23                            | 21.62                                    | 7.45   |
|             | Probeta 9           | 20.78                            | 18.80                                    | 9.35   |
|             | Probeta 10          | 23.99                            | 17.90                                    | 8.58   |
| Teca        | Probeta 11          | 4.02                             | 53.8                                     | 10.86  |
|             | Probeta 12          | 27.97                            | 27.5                                     | 7.73   |
|             | Probeta 13          | 37.24                            | 17.8                                     | 6.56   |
|             | Probeta 14          | 46.59                            | 7.5                                      | 11.73  |
|             | Probeta 15          | 44.39                            | 9.5                                      | 11.09  |

### 3.4.2.1. Relación $\tau/\sigma$ en la madera

Con el objetivo de encontrar la relación entre el esfuerzo cortante y la resistencia a la compresión simple, se procedió a calcular la relación  $\tau/\sigma$  y obtener el valor porcentual.

De tal manera que se puede obtener valor de  $\tau$  en la siguiente expresión:

$$\tau = \text{Factor} \cdot \sigma$$

En la siguiente tabla se detalla el porcentaje individual de cada probeta de madera.

Tabla 3.10 Comparación de resultados con ensayos a la compresión simple del eucalipto, pino y teca

| Tipo      | Denominación | Compresión Simple $\sigma$ (MPa) * | Esfuerzo Cortante $\tau$ (MPa) | Relación $\tau/\sigma$ (%) |
|-----------|--------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Eucalipto | Probeta 1    | 90                                 | 15.22                          | 16.9                       |
|           | Probeta 2    | 32.7                               | 17.06                          | 52.2                       |
|           | Probeta 3    | 30                                 | 17.78                          | 59.3                       |
|           | Probeta 4    | 25.4                               | 13.75                          | 54.1                       |
|           | Probeta 5    | 19.5                               | 13.01                          | 66.7                       |
| Pino      | Probeta 6    | 22.6                               | 8.48                           | 37.5                       |
|           | Probeta 7    | 22                                 | 7.68                           | 34.9                       |
|           | Probeta 8    | 21.62                              | 7.45                           | 34.5                       |
|           | Probeta 9    | 18.80                              | 9.35                           | 49.7                       |
|           | Probeta 10   | 17.90                              | 8.58                           | 47.9                       |
| Teca      | Probeta 11   | 53.8                               | 10.86                          | 20.2                       |
|           | Probeta 12   | 27.5                               | 7.73                           | 28.1                       |
|           | Probeta 13   | 17.8                               | 6.56                           | 36.9                       |
|           | Probeta 14   | 7.5                                | 11.73                          | 156.4                      |
|           | Probeta 15   | 9.5                                | 11.09                          | 116.7                      |

Compresión Simple  $\sigma$  (MPa) \*: Valores corregidos de la curva  $\sigma - CH$ , de los datos de Anaís Rivera.

En función de la especificación de la “*National Desing Specification for Wood Construction*”; se determinan los esfuerzos con el 19% de humedad. Considerando el valor más cercano al 19% de humedad en los 3 tipos de madera, se determinó la relación  $\tau/\sigma$ : eucalipto 16.9%, pino 49.7% y teca 28.1%.

### 3.4.2.1. Eucalipto

En la siguiente figura se presentan las curvas del comportamiento de  $\tau/\sigma$  en función del contenido de humedad.

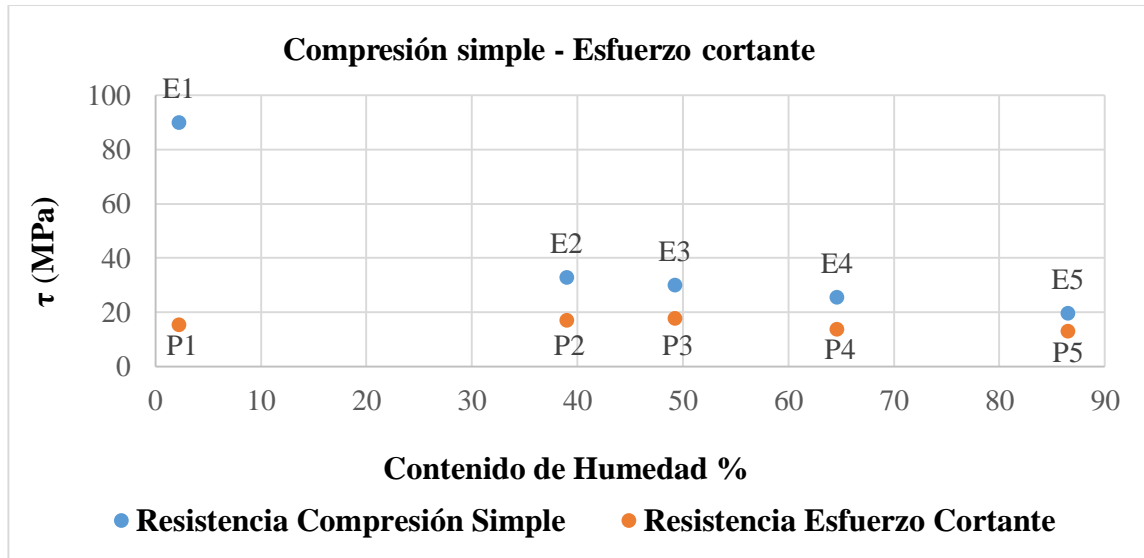


Figura 3.6 Comparación entre compresión simple y esfuerzo cortante del eucalipto

- Compresión simple probetas (E1, E2, E3, E4 y E5)
- Esfuerzo cortante probetas (P1, P2, P3, P4 y P5)

En la figura 3.6 se puede apreciar que todos los valores de resistencia a la compresión simple son mayores a la resistencia del esfuerzo cortante del eucalipto, en base a los diferentes porcentajes del contenido de humedad. Además se observa que para el eucalipto en estado natural con un 2.22% del contenido de humedad, la relación  $\tau/\sigma$  presenta un valor de 16.9%. A medida que aumenta el contenido de humedad, se determina que el rango entre la compresión simple y el esfuerzo cortante disminuye. Por ejemplo en el caso de la probeta N° 5 la cual presenta un elevado contenido de humedad, presenta una relación de un 66.7%.

### 3.4.2.2. Pino

En la siguiente figura se presentan las curvas del comportamiento de  $\tau/\sigma$  en función del contenido de humedad.

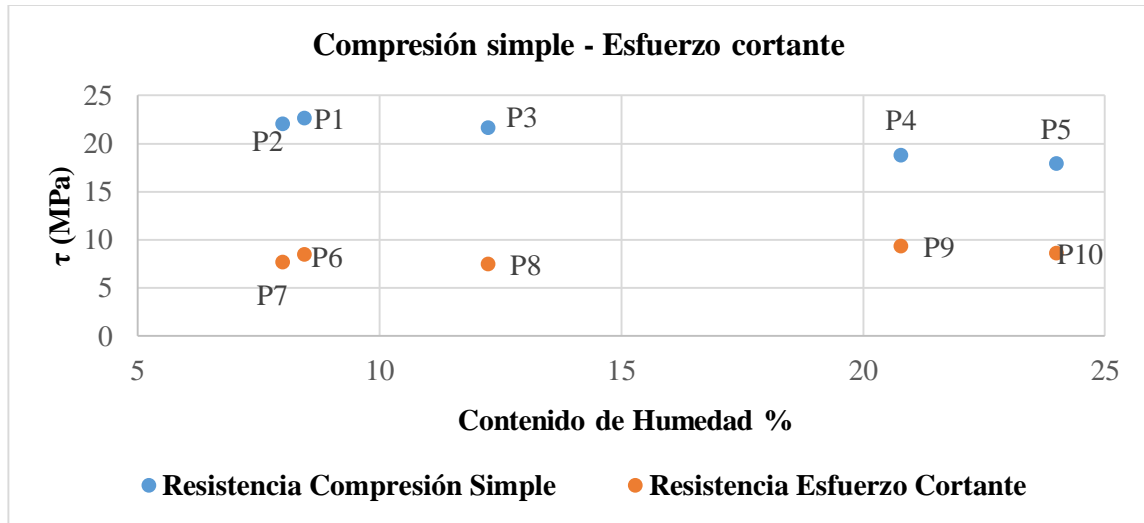


Figura 3.7 Comparación entre compresión simple y esfuerzo cortante del pino

- Compresión simple probetas (P1, P2, P3, P4 y P5)
- Esfuerzo cortante probetas (P6, P7, P8, P9 y P10)

En la figura 3.7 se puede apreciar que todos los valores de resistencia a la compresión simple son mayores a la resistencia del esfuerzo cortante del pino, en base a los diferentes porcentajes del contenido de humedad. Además se observa que para el pino en estado natural con un 8.43% del contenido de humedad, la relación  $\tau/\sigma$  presenta un valor de 37.5%. A medida que el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en relación al aumento del contenido de humedad, la compresión simple y el esfuerzo cortante permanecen en un rango de diferencia similar. Por ejemplo, en la probeta N°10 presenta una relación de 47.9%.

### 3.4.2.3. Teca

En la siguiente figura se presentan las curvas del comportamiento de  $\tau/\sigma$  en función del contenido de humedad.

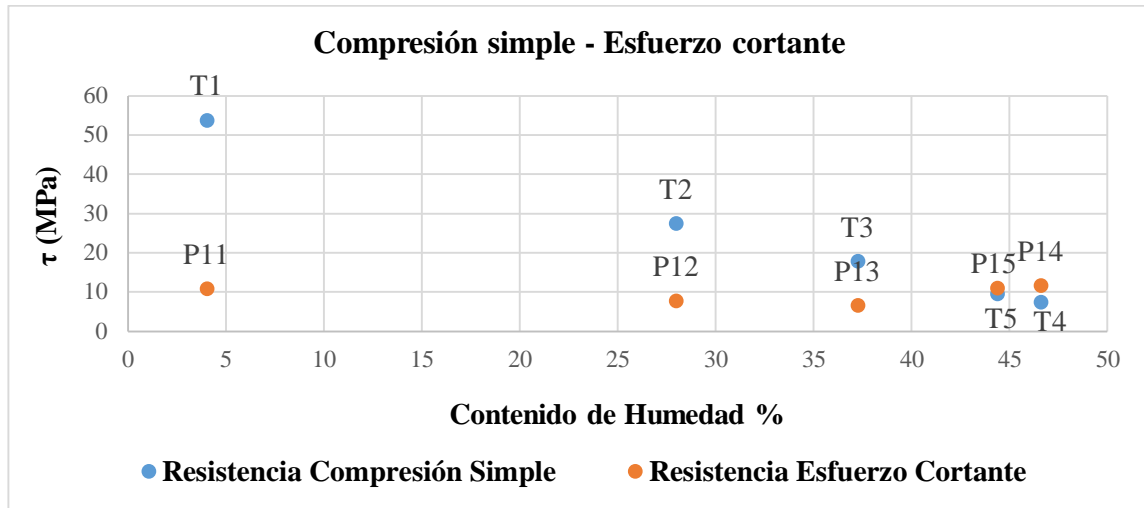


Figura 3.8 Comparación entre compresión simple y esfuerzo cortante de la teca

- Compresión simple probetas (T1, T2, T3, T4 y T5)
- Esfuerzo cortante probetas (P11, P12, P13, P14 y P15)

En la figura 3.8 se puede apreciar que todos los valores de resistencia a la compresión simple son mayores a la resistencia del esfuerzo cortante de la teca, en base a los diferentes porcentajes del contenido de humedad. Además se observa que para la teca en estado natural con un 4.02% del contenido de humedad, la relación  $\tau/\sigma$  presenta un valor de 20.2%. A medida que aumenta el contenido de humedad, se determina que el rango entre el esfuerzo cortante y compresión simple disminuye. Por ejemplo en el caso de la probeta N° 14 la cual presenta un elevado contenido de humedad, presenta una relación de un 156.4%.

### 3.5. Análisis de resultados

#### 3.5.1. Evaluación del $\tau$ entre maderas

Con la finalidad de comparar el esfuerzo cortante entre los 3 tipos de madera, se consideró el tiempo de inmersión en agua y no el contenido de humedad. En la siguiente tabla se presentan los valores de resistencia al esfuerzo cortante en los distintos tipos de madera, en relación al mismo porcentaje del contenido de humedad. Para lo cual se utilizó las funciones matemáticas obtenidas anteriormente.

Tabla 3.9 Resistencia al esfuerzo cortante con los mismos contenidos de humedad

| Contenido de Humedad (%) | Resistencia al Esfuerzo Cortante $\tau$ (MPa) |         |       |
|--------------------------|---|---------|-------|
|                          | Eucalipto                                     | Pino    | Teca  |
| 2                        | 15,35   | 15,10 * | 11,88 |
| 8                        | 15,91   | 8,15    | 9,45  |
| 14                       | 16,35   | 7,98    | 7,76  |
| 20                       | 16,68   | 9,55    | 6,80  |
| 26                       | 16,89   | 7,80    | 6,59  |
| 32                       | 16,99   | -       | 7,12  |
| 38                       | 16,97   | -       | 8,40  |
| 44                       | 16,84   | -       | 10,41 |
| 50                       | 16,59   | -       | 13,17 |
| 56                       | 16,23   | -       | -     |
| 62                       | 15,75   | -       | -     |
| 68                       | 15,15   | -       | -     |
| 74                       | 14,44   | -       | -     |
| 80                       | 13,62   | -       | -     |
| 86                       | 12,68   | -       | -     |
| 92                       | 11,63   | -       | -     |

(\*)Valor no considerado en la trayectoria. (-) No existen valores de resistencia al esfuerzo cortante para esos contenidos de humedad, debido a que se saturan.

Eucalipto: En base al rango de los porcentajes del contenido de humedad establecidos, se puede apreciar en la tabla 3.11 que el eucalipto inicialmente presenta valores bajos de resistencia al esfuerzo cortante, conforme aumenta la humedad tiende a incrementar su



valor de  $\tau$  y posteriormente llega a su punto de saturación lo cual ocasiona que el valor de  $\tau$  empiece a disminuir.

Pino: La resistencia al esfuerzo cortante para el pino se puede observar en la tabla 3.11, que conforme aumenta el contenido de humedad los valores de  $\tau$  se mantienen similares a diferencia del eucalipto.

Teca: Los valores de resistencia al esfuerzo cortante de la teca presentan un comportamiento singular: inicialmente es alta, después disminuye y continúa esta secuencia, solamente hasta el contenido de humedad obtenido en el presente trabajo.

Como se puede observar en la tabla 3.11, la resistencia al esfuerzo cortante del eucalipto para cada uno de los porcentajes establecidos, es mayor en comparación con el pino y la teca, ya que presentan una diferencia notable en sus valores. Para lo cual se determinó lo siguiente:

$$\tau \text{ Eucalipto} > \tau \text{ Teca} > \tau \text{ Pino}$$

Se logró determinar que el eucalipto es más resistente al esfuerzo cortante que la teca en un rango del contenido de humedad entre 2 – 50 %.

Como se puede precisar en la tabla 3.11 los valores de  $\tau$  para el pino son inferiores a la teca para un rango del contenido de humedad entre 8 -26 %.

### **3.5.2. Evaluación entre $\tau$ PET y $\tau$ madera.**

La resistencia al esfuerzo cortante en los distintos tipos de madera presenta resistencias superiores que en las probetas del PET. A pesar de que mientras avanza el tiempo de inmersión en agua, la resistencia disminuye en las maderas, debido a que incrementa el contenido de humedad.

La madera siempre presenta mayor resistencia al esfuerzo cortante a comparación del PET. Se observan los siguientes resultados máximos de  $\tau$ : PET 5.99 MPa y 17.78 MPa para la madera de tipo eucalipto.

$$\tau_{\text{PET}} < \tau_{\text{madera}}$$

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones:

- Una vez realizados los ensayos en todas las probetas, tanto de madera como de PET, se determinó que la resistencia de las probetas de PET tienen menos resistencia al esfuerzo cortante que las probetas de madera, sin embargo ambos materiales tienen menores resistencias al esfuerzo cortante que otros materiales tales como el acero y aluminio.
- La resistencia al esfuerzo cortante en la madera, disminuye a medida que avanza el tiempo de inmersión en el agua, es decir con el incremento de contenido de humedad.
- Luego de comparar los resultados en los distintos tipos de maderas, en base a los mismos contenidos de humedad, se determinó que  $\tau_{\text{Eucalipto}} > \tau_{\text{Teca}} > \tau_{\text{Pino}}$ .
- El coeficiente de correlación  $R^2$  que se determina entre el esfuerzo cortante y el contenido de humedad, para todas las maderas, indica que los valores obtenidos de  $R^2$  se encuentran dentro del rango aceptable entre 0.5 – 1. El eucalipto y la teca presentó una ecuación polinómica de segundo orden y el pino una ecuación polinómica de tercer orden.
- La diferencia entre el esfuerzo cortante y la compresión simple, para las maderas, disminuye a medida que se incrementa el porcentaje del contenido de humedad; por ejemplo, para el eucalipto con un 2.2% de humedad, el  $\tau$  corresponde a un valor de 16.9% del esfuerzo a la compresión simple; mientras que con un 86.45% de humedad, el  $\tau$  corresponde a un valor de 66.7% del esfuerzo a la compresión simple.
- El accesorio construido para la ejecución del ensayo al esfuerzo cortante, cumplió con los requerimientos necesarios para adaptarse a las dimensiones de la prensa y de las probetas, lo cual permitió alcanzar el objetivo del presente trabajo con éxito.

**Recomendaciones:**

- Al momento de realizar la fundición de las muestras de PET, se recomienda observar las normas de seguridad industrial, ya que su elaboración requiere contacto con altas temperaturas, además de ser un material que emana gases.
- Se debe tener en cuenta que una vez concluida la fundición de las probetas compuestas por PET y arena, el cambio de temperatura es un factor muy importante; razón por la que se debe tener un enfriamiento controlado, puesto que el shock térmico produce fracturas o fisuras en las probetas.
- Cuando se obtienen las probetas de madera, estas deben permanecer en un lugar con temperatura y humedad constante, para evitar alteraciones a su estado natural.
- Conforme se analizaron los resultados de las probetas de pino, lo idóneo sería realizar el ensayo con una mayor cantidad, para poder obtener un mejor coeficiente de correlación en las curvas de resistencia al esfuerzo cortante – humedad, y que se ajuste a los rangos óptimos.
- Para el proceso de obtención de la madera que va a ser utilizada para fortificación minera, ésta deberá cumplir un adecuado control de calidad, considerando los factores más importantes como densidad, defectos naturales, patrón veta básico y contenido de humedad.

## BIBLIOGRAFIA

- Bernal, J. (1999). Técnica de medición de deformación aplicado al diseño mecánico con deformímetros eléctricos. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Recuperado de: <http://eprints.uanl.mx/665/1/1020126377.PDF>
- Cordoba, R. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. Kurú: Revista Forestal, 2(5), 1-5. Recuperado de: <file:///C:/Users/pc/Downloads/Dialnet-ConceptosBasicosSobreElSecadoDeLaMadera-5123396.pdf>
- El sector de los plásticos - Estadísticas, (2001). Barcelona – España. Centro Español de Plásticos. Departamento técnico. Recuperado de: <https://cep-plasticos.com/es/search/node/pet>
- González, E. y Alloza, A. (2011). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos: Determinación de la granulometría de las partículas. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/353519708/tema02-granulometria>
- Jiménez, J. (2011). Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no destructivas. Madrid - España. Recuperado de: [http://oa.upm.es/36492/1/PFC\\_JAIME\\_DE\\_LA\\_MATA\\_JIMENEZ.pdf](http://oa.upm.es/36492/1/PFC_JAIME_DE_LA_MATA_JIMENEZ.pdf)
- Kollmann, F y Cote, W. (1968). *Principles of Wood Science and Technology*, Vol 1, Solid Wood, Springer – Verlag, Berlin.
- Laza, J., Pérez, L. y Ruiz, L. (2014). Propiedades de los polímeros en estado sólido. Universidad de País Vasco. Bilbao – España. Recuperado de: [https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/8679/mod\\_resource/content/1/Tema\\_2\\_Conformaciones\\_de\\_las\\_cadenas\\_polimericas.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/8679/mod_resource/content/1/Tema_2_Conformaciones_de_las_cadenas_polimericas.pdf)
- Mansilla, L. y Ruiz, M. (2009). Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster. Ingeniería Industrial, (27), 123-137. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3374/337428493008.pdf>

- National Desing Specification for Wood Construction* (2015). Recuperado de: <https://www.awc.org/pdf/codes-standards/publications/nds/AWC-NDS2015-ViewOnly-1603.pdf>
- Nutsch, W. (2007). *Tecnología de la madera y del mueble*. Málaga – España. Reverté. Recuperado de: <https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/>
- Ortiz, L. (Tercera edición). (2007). *Resistencia de materiales*. Madrid, España: McGraw-Hill. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/304480975/Luis-Ortiz-Berrocal-Resistencia-De-Materiales-pdf>
- Parker, H. (Segunda Edición) (1995). *Ingeniería aplicada para arquitectos y constructores*. Distrito Federal - México, Editorial Limusa S.A. de C.V.
- Pytel, A y Singer, F. (2006). *Resistencia de Materiales*. Ciudad de México - México, Alfaomega Grupo Editorial. S.A. de C.V.
- Quito, A. y Villafuerte, E. (2011). *Planta de reciclado Polietilentereftalato*. Guayaquil – Ecuador. Universidad de Guayaquil. Recuperado de: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/4681/1/T176.pdf>
- Ramirez, Y. (2009). *Diseño y evaluación de los ademes de madera, en la empresa C.I CARMINALES en el municipio de Fredonia*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín - Colombia. Recuperado de: <file:///C:/Users/pc/Downloads/FORTIFICACION%20CON%20MADERA%20Y%20HUMEDAD%20.%20RODRIGUEZ%20-UNAL.pdf>
- Richardson, T. y Lokensgard, E. (1999). *Industria del plástico*. Paraninfo. Recuperado de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>
- Rivera, A. (2018). *Alternativas del uso de maderas en fortificación minera bajo diferentes condiciones de humedad*. Universidad del Azuay. Cuenca – Ecuador. Recuperado de: <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8341/1/14062.pdf>
- Rodríguez, D. (2018). *Determinación del uso de plástico PET como alternativa al uso de madera en fortificación minera*. Universidad del Azuay. Cuenca – Ecuador, Recuperado de: <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/7816/1/13614.pdf>

- Sánchez, N. (2013). Granulometría de suelos. Recuperado de: <https://civilgeeks.com/2013/11/25/granulometria-suelos-ing-nestor-luis-sanchez/>
- Senageomin (2012). Guía de Operación para la pequeña minería. Chile.
- (2002). Guía metodológica de seguridad para sistemas de fortificación y acuñadura.
- Unión Internacional de Ciencias del Suelo, I. (2011). Sistema de Clasificación Internacional de Suelos. WRB
- Vignote, S. y Martínez, I. (1995). Tecnología de la madera. México. Mundi – Prensa.  
Recuperado de: [https://books.google.com.ec/books?id=JnsFcOqCzwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&outp#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=JnsFcOqCzwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&outp#v=onepage&q&f=false)
- Wood Handbook. (1955). U.S. *Dept of Agriculture. Forest Service, Forest Products Laboratory*, No 72.
- Yépez, F y Albuja, A (Primera Edición) (2015). Guía práctica para el diseño de estructuras de madera de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015. Quito – Ecuador.

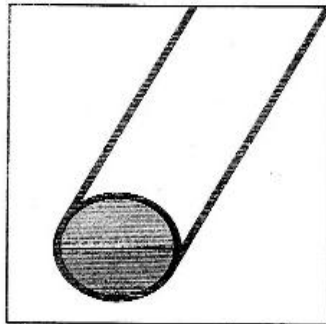
**ANEXOS**



Anexo 1 Descripción de aceros ASSAB – SKF



**ACEROS ASSAB - SKF GRADO MAQUINARIAS**  
**SKF 356 A = ASSAB 705**



**EQUIVALENTE Aprox.**  
 AISI/SAE 4337  
 WERKSTOFF 6511-6582  
 DIN 36CrNiMo4  
 B S FN 24- LN 25  
 SIS 254T

**ANALISIS APROXIMADOS**

|           | C     | Si    | Mn   | Cr   | Ni   | Mo    |
|-----------|-------|-------|------|------|------|-------|
| ASSAB 705 | 0.36% | 0.3%  | 0.7% | 1.4% | 1.4% | 0.20% |
| SKF 356 A | 0.36% | 0.25% | 0.7% | 1.4% | 1.4% | 0.20% |

**PROPIEDADES MECANICAS**

|                                |                                      |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| Resistencia a la tracción (Rm) | 90 - 110 Kgs/mm <sup>2</sup>         |
| Alargamiento a 5 mm            | 12%                                  |
| Límite de cedencia (Rp0.2)     | 70 Kgs/mm <sup>2</sup>               |
| Resistencia al impacto KU      | Aprox. 30 J (6 Kgm/cm <sup>2</sup> ) |
| Dureza con que se entrega      | 270 - 330 Brinell                    |

**TRATAMIENTO TERMICO**

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| Recocido suave         | 690 - 720°C |
| Relievado de tensiones | 525 - 650°C |
| Temple                 | 830 - 860°C |
| Revenido               | 550 - 675°C |
| Enfriamiento en aceite |             |

**SKF 356 A = ASSAB 705** Es un acero bonificado al cromo niquel, fabricado bajo el proceso M y R de SKF que consiste en fundición y refinado del acero (melting and refining) con lo cual se consigue un acero muy puro y con poca escoria, debido a su alta resistencia a la fatiga, se puede utilizar en piezas que estén sometidas a grandes esfuerzos, y desgaste.

**APLICACIONES:** Fabricación de pieza de máquina, piñones, ejes, pernos, etc.  
**IDENTIFICACION:** Extremo azul y dorado.

| REDONDO |         |             | REDONDO |          |             | REDONDO |          |             |
|---------|---------|-------------|---------|----------|-------------|---------|----------|-------------|
| MM      | PULGADA | APROX. KG/M | MM      | PULGADA  | APROX. KG/M | MM      | PULGADA  | APROX. KG/M |
| 6       | 1/4"    | 0.25        | 35      | 1-3/8"   | 7.55        | 91.4    | 3-9/16"  | 52          |
| 8       | 5/16"   | 0.39        | 38      | 1-1/2"   | 8.95        | 95      | 3-3/4"   | 56          |
| 10      | 3/8"    | 0.62        | 40      | 1-9/16"  | 10.5        | 102     | 4"       | 66.1        |
| 12      | 7/16"   | 0.90        | 45      | 1-3/4"   | 12.5        | 105     | 4-1/8"   | 68          |
| 14      | 9/16"   | 1.26        | 50      | 2"       | 15.8        | 115     | 4-17/32" | 81          |
| 16      | 5/8"    | 1.58        | 55      | 2-3/16"  | 19          | 127     | 5"       | 101         |
| 18      | 11/16"  | 1.90        | 60      | 2-3/8"   | 22.4        | 135     | 5-5/16"  | 114         |
| 20      | 25/32"  | 2.50        | 65      | 2-9/16"  | 26          | 143     | 5-5/8"   | 125         |
| 22      | 7/8"    | 3.10        | 70      | 2-3/4"   | 30          | 153     | 6"       | 147         |
| 25      | 1"      | 3.98        | 75      | 2-15/16" | 35          | 160     | 6-5/16"  | 160         |
| 28      | 1-1/8"  | 5.01        | 81.4    | 3-3/16"  | 41          | 180     | 7-3/32"  | 202         |
| 32      | 1-1/4"  | 6.31        | 85      | 3-11/32" | 45          | 204     | 8"       | 259         |
|         |         |             |         |          |             | 250     | 9-27/32" | 300         |

NOTA: Hasta 180 mm. inclusive SKF 356-A. 204 y 250 mm. ASSAB 705

**IVAN BOHMAN C.A.**

Anexo 2 Cadena polimérica del Poliéster (PET)

TABLA 15-11 Unidades funcionales y aplicaciones de termoestables seleccionados

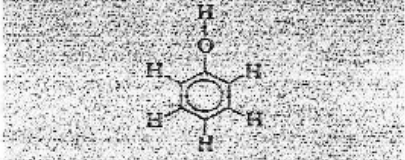
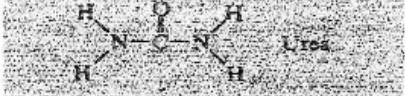

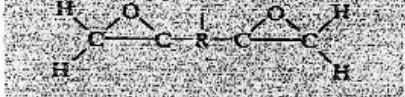

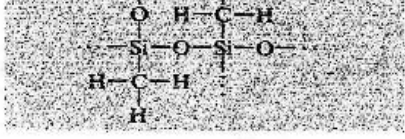
| Polímero    | Unidades funcionales   | Aplicaciones típicas  |
|-------------|--|---|
| Fenólicos   |       | Adhesivos, recubrimientos laminados   |
| Aminas      |  Urea | Adhesivos, utensilios de cocina, moldes eléctricos  |
| Poliésteres |       | Moldes eléctricos, laminados decorativos, matriz en compuestos reforzados con fibra de vidrio |
| Epóxicos    |       | Adhesivos, moldes eléctricos, matrices para materiales compuestos                             |
| Uretanos    |      | Fibras, recubrimientos, espumas, aislamiento  |
| Silicona    |     | Adhesivos, juntas, selladores   |

TABLA 15-12 Propiedades de polímeros termoestables típicos

|             | Resistencia a la tensión (psi) | Elongación (%) | Módulo de elasticidad (psi) | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Fenólicos   | 9,000                          | 2              | 1300                        | 1.27                          |
| Aminas      | 10,000                         | 1              | 1600                        | 1.50                          |
| Poliésteres | 13,000                         | 3              | 650                         | 1.28                          |
| Epóxicos    | 15,000                         | 6              | 500                         | 1.25                          |
| Uretanos    | 10,000                         | 6              |                             | 1.30                          |
| Siliconas   | 4,000                          | 0              | 1200                        | 1.55                          |

Anexo 3 Medición del peso de las probetas sumergidas en agua



Anexo 4 Proceso de tamización



Anexo 5 Fundición de PET y arena



Anexo 6 Molde para probetas de PET



Anexo 7 Proceso de vaciado del material al molde



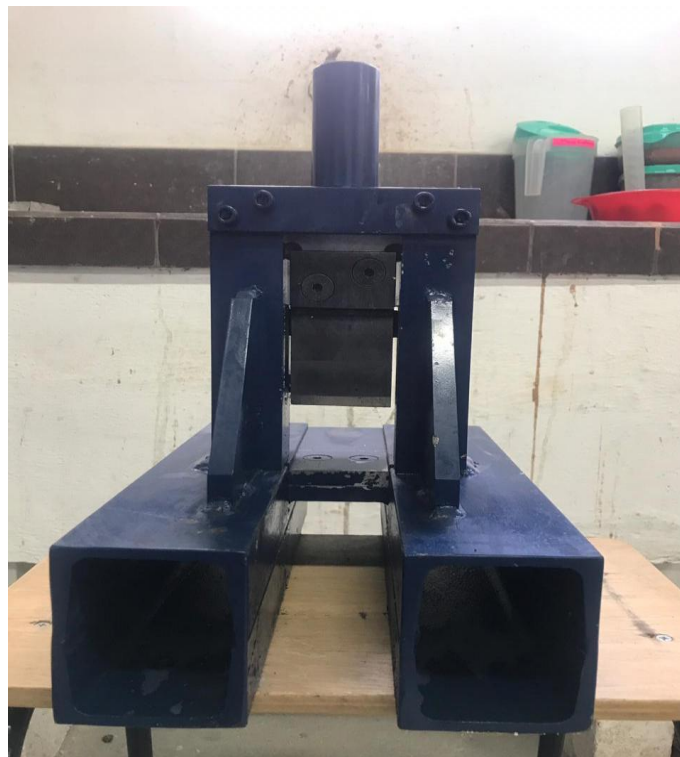
Anexo 8 Molde con el material fundido



Anexo 9 Prensa hidráulica



Anexo 10 Accesorio para ensayo al esfuerzo cortante



Anexo 11 Pruebas de resistencia al esfuerzo cortante en el PET



Anexo 12 Pruebas de resistencia al esfuerzo cortante en las maderas

