



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

**“Alternativa del uso del Polietileno de Tereftalato (PET) y
agregados en Fortificación Minera en función de la
Resistencia al Pandeo”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autor:

KARINA NATALY MALLA ORDÓÑEZ

Director:

GIL TARQUINO ÁLVAREZ PACHECO

CUENCA, ECUADOR

2019

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado se lo dedico primeramente a la Virgen María y a Dios por ser mi fuente de fe, confianza y esperanza, por nunca abandonarme y estar junto a mi a lo largo de toda mi carrera universitaria.

A mis ángeles en el cielo (+) (+) (+) por interceder y cuidar siempre de mi.

A mi abuelita Laura, por estar pendiente de cada paso que doy en mi vida.

Y como no, a mis padres Nora y Eudofilio, por ser los forjadores de mis valores y mis principios, por guiar mi camino, por ser mi sustento y mi motivación, por confiar en mi hasta el final.

Karina.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a la Virgen María y a Dios por darme la oportunidad de haber podido emprender una carrera universitaria.

A mis padres Nora y Eudofilio, por darme la mejor herencia de todas: mis estudios, por enseñarme a ser una persona de bien y guiar mi camino siempre.

A toda mi familia, en especial a mi tío Ricardo, por ser mi ayuda a lo largo de mi vida estudiantil.

A la mejor persona que la escuela de Ingeniería en Minas me permitió conocer, mi novio Daniel, por ser mi complemento, por su amor incondicional y su motivación para seguir hasta el final.

A la mejor amiga que la vida me pudo dar, Isabel, por estar en todo momento y por tener siempre una palabra de aliento.

A Kristell, porque iniciamos juntas este largo camino y juntas estamos llegando a la meta, porque compartimos preocupaciones, pero infinitas risas también, por ser una excelente amiga y la mejor compañera de tareas.

A todos mis compañeros de clase, con los cuales compartí momentos que dejaron anécdotas que recordar.

A la escuela de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay y a cada uno de los maestros, que más allá de aquello, se convirtieron en amigos forjadores de mis conocimientos, en especial al Ing. Patricio Feijoo Calle por ser una excelente persona y guía.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera me apoyaron siempre, gracias infinitas.

Karina.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	3
1.1 Fortificación Minera	3
1.1.1 Ademe Provisional.....	4
1.1.2 Ademes de Madera	5
1.1.3 Características Ingenieriles de la Madera usada en las Minas.....	6
1.1.4 Esfuerzos en los Ademes de Madera	8
1.1.5 Diseño de los Ademes de Madera	8
1.2 Pandeo y sus Características	12
1.2.1 Pandeo y Estabilidad.....	14
1.2.2 Carga Crítica	16
1.2.3 Columnas con Extremos Articulados	19
1.2.4 Columna empotrada en la base y libre en la parte superior	20
1.2.5 Columna con los dos extremos empotrados para evitar rotación	21
1.2.6 Columna empotrada en la base y articulada en la parte superior	21
1.2.7 Pandeo Inelástico	23

1.2.8. Pandeo Elástico.....	25
1.3 Ecuación de Euler	26
1.4 Esfuerzo Crítico	27
1.5 Limitaciones de la Fórmula de Euler.....	28
1.5.1 Ecuación de Euler	29
1.5.2 Ecuaciones de AISC (American Institute of Steel Costruction).....	30
1.5.2.1 Relación de Esbeltez.....	31
1.6 Propiedades del Polietileno de Tereftalato (PET)	32
1.6.1 Codificación del Polietileno de Tereftalato (PET)	33
1.6.2 Características Principales	34
1.6.3 ¿Cómo se obtiene el Polietileno de Tereftalato (PET)?.....	35
1.6.4 Polietileno de Tereftalato (PET) Grado Botella	38
1.6.5 Reciclaje del Polietileno de Tereftalato (PET)	39
1.6.6 Tipos de Reciclaje.....	40
1.7 Agregados de la Construcción	43
1.7.1 Granulometría de los Suelos	43
1.7.2 Análisis Granulométrico	44
1.7.3 Tamización	44
1.7.4 Curvas Granulométricas	46
1.7.5 Suelos.....	47
1.7.6 Clasificación de los Suelos	47
CAPÍTULO II: DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN	51
2.1 Preparación del Compuesto Polietileno de Tereftalato (PET) - Arena.....	51
2.2 Análisis granulométrico de la arena perteneciente a la zona de El Tahual	53
2.2.1 Análisis granulométrico de la arena de grano grueso	54
2.2.2 Análisis granulométrico de la arena de grano fino	55

2.3 Descripción de la Fabricación de Muestras o Probetas	58
2.3.1 Dimensión de las Probetas	58
2.3.2 Porcentajes del Compuesto Polietileno de Tereftalato (PET) - Arena	59
2.3.3 Proceso de Ensayos de Fundición del Compuesto Polietileno de Tereftalato (PET) – Arena.....	59
2.3.4 Proceso Definitivo de Fundición del Compuesto Polietileno de Tereftalato (PET) - Arena	62
2.4 Descripción y Caracterización de Muestras	67
2.5 Descripción de Equipos de Experimentación	71
2.6 Ejecución Experimental en las Muestras	74
CAPÍTULO III: RESULTADOS	76
3.1 Análisis de Muestras	76
3.2 Resultados	77
3.3 Interpretación de Resultados.....	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Esquema del diseño de los marcos de madera en un socavón: a) Sistema de Ademe; b) Modelos Estáticos; c) Diagramas de una viga simple – mente apoyada.	9
Figura 1. 2 Refuerzos en el marco de un socavón.	10
Figura 1. 3 Diseño de los cabezales en la frente larga con tres postes.	11
Figura 1. 4 Diseño de los cabezales en la frente larga con cuatro postes.	12
Figura 1. 5 Factores que intervienen en la excentricidad de las cargas en las columnas.	13
Figura 1. 6 Estabilidad de Estructuras.	15
Figura 1. 7 Pandeo de una estructura idealizada que consiste en dos barras rígidas y un resorte rotacional.	15
Figura 1. 8 Pandeo de una estructura idealizada que consiste en dos barras rígidas y un resorte rotacional.	16
Figura 1. 9 Carga crítica.	16
Figura 1. 10 Pandeo de una estructura idealizada que consiste en dos barras rígidas y un resorte rotacional.	17
Figura 1. 11 Diagrama de equilibrio para el pandeo de una estructura idealizada.	18
Figura 1. 12 Bola en equilibrio estable, inestable y neutro.	18
Figura 1. 13 Columna con extremos articulados: (a) columna ideal, (b) forma pandeada y (c) fuerza axial P y momento flexionante M que actúan en una sección transversal.	19
Figura 1. 14 Columna ideal empotrada en la base y libre en la parte superior: (a) columna inicialmente recta, (b) forma pandeada 1, (c) forma pandeada 2 y (d) forma pandeada 3.	20
Figura 1. 15 Pandeo de una columna con sus dos extremos empotrados para evitar rotación.	21
Figura 1. 16 Columna empotrada en la base y articulada en la parte superior.	22
Figura 1. 17 Cargas críticas, longitudes efectivas y factores de longitud efectiva para columnas ideales.	22
Figura 1. 18 Pandeo Inelástico.	24
Figura 1. 19 Pandeo Elástico.	25
Figura 1. 20 Efecto de n en el valor de la carga crítica.	26
Figura 1. 21 El esfuerzo crítico o admisible es el representado por la línea continua. La parte punteada de la curva de Euler no es aplicable.	30

Figura 1. 22 Codificación del Polietileno de Tereftalato (PET).....	33
Figura 2. 1 Curva Granulométrica – Arena de Grano Grueso.	54
Figura 2. 2 Curva Granulométrica - Arena de Grano Fino.....	55
Figura 2. 3 Arena de Interés, Malla N°30 - Tamaño de Partícula de 0,595 mm.	57
Figura 2. 4 Arena de Interés, Malla N°40 - Tamaño de Partícula de 0,420 mm.	57
Figura 2. 5 Arena de Interés, Malla N°50, Tamaño de Partícula de 0,297 mm.....	58
Figura 2. 6 Molde de Acero de Transmisión para Altas Temperaturas.	60
Figura 2. 7 Molde con 640 gramos de Polietileno de Tereftalato (PET).....	60
Figura 2. 8 Muestra con 640 gr. de material.....	61
Figura 2. 9 Muestra con 1024 gr. de material.....	61
Figura 2. 10 Muestra con 1090 gr. de material y presión menor a la necesaria.	62
Figura 2. 11 Muestra con 1090 gr. completamente moldeada.....	62
Figura 2. 12 Pesaje de Polietileno de Tereftalato (PET) - Arena.	63
Figura 2. 13 Recipiente con material dentro del horno.	65
Figura 2. 14 Equipo de Pruebas HUMBOLDT.	71
Figura 2. 15 Placa de sostenimiento de probetas.....	72
Figura 2. 16 Placa de aplicación de carga.....	73
Figura 2. 17 Colocación de soportes y probeta.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Resistencia al pandeo de la madera para minas.....	7
Tabla 1. 2 Datos Técnicos del Polietileno de Tereftalato (PET).....	35
Tabla 1. 3 Tamaños de Tamices.....	45
Tabla 1. 4 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).....	49
Tabla 1. 5 Clasificación de los Suelos según Normas AASHTO M - 145.....	49
Tabla 1. 6 Clasificación de los Suelos según Normas ASTM D – 7263.....	50
Tabla 1. 7 Clasificación de los Suelos según Normas INV - E - 102-07.....	50
Tabla 2. 1 Características y Propiedades del Polietileno de Tereftalato (PET).....	52
Tabla 2. 2 Características y Propiedades de la Arena Andesítica.....	52
Tabla 2. 3 Análisis Granulométrico - Arena de Grano Grueso.....	54
Tabla 2. 4 Material de Interés Seleccionado – Arena de Grano Grueso.....	55
Tabla 2. 5 Análisis Granulométrico - Arena de Grano Fino.....	55
Tabla 2. 6 Material de Interés Seleccionado – Arena de Grano Fino.....	56
Tabla 2. 7 Muestra N°1.....	67
Tabla 2. 8 Muestra N°2.....	68
Tabla 2. 9 Muestra N°3.....	68
Tabla 2. 10 Muestra N°4.....	68
Tabla 2. 11 Muestra N°5.....	69
Tabla 2. 12 Muestra N°6.....	69
Tabla 2. 13 Muestra N°7.....	70
Tabla 2. 14 Muestra N°8.....	70
Tabla 2. 15 Muestra N°9.....	70
Tabla 2. 16 Muestra N°10.....	71

ÍNDICE DE ANEXOS

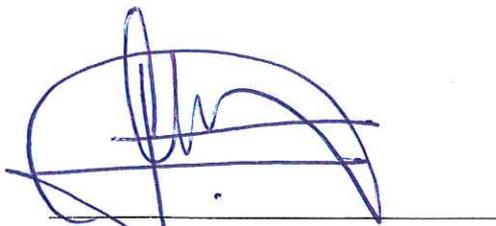
Anexo 1 Propiedades del Polietileno de Tereftalato (PET).....	89
Anexo 2 Propiedades de la Madera	89
Anexo 3 Estructura Química del Polietileno de Tereftalato (PET).	89
Anexo 4 Tamizado de Arena de Grano Grueso y Arena de Grano Fino.	89
Anexo 5 Ejemplificación del pesaje del Polietileno de Tereftalato (PET).	90
Anexo 6 Ejemplificación del pesaje de la Arena.	90
Anexo 7 Colocación de muestras en los soportes y equipo HUMBOLDT.	90
Anexo 8 Muestra N°1 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.	91
Anexo 9 Muestra N°2 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.	91
Anexo 10 Muestra N°3 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.	91
Anexo 11 Muestra N°4 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.	92
Anexo 12 Muestra N°5 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.	92
Anexo 13 Muestra N°6 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.	92
Anexo 14 Muestra N°7 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.	93
Anexo 15 Muestra N°8 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.	93
Anexo 16 Muestra N°9 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.	93
Anexo 17 Muestra N°10 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.	94

**ALTERNATIVA DEL USO DEL POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET) Y
AGREGADOS EN FORTIFICACIÓN MINERA EN FUNCIÓN DE LA
RESISTENCIA AL PANDEO**

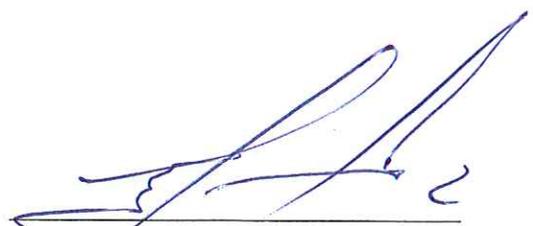
RESUMEN

La finalidad del presente estudio es establecer si el polímero reciclado Polietileno de Tereftalato (PET), en combinación con la arena común de construcción en diferentes porcentajes y distintas granulometrías, es una alternativa al uso de la madera en estructuras de fortificación en minería, esto se determinó a través de ensayos con esfuerzos de pandeo. Para lograrlo fue necesario la fabricación de probetas con proporciones geométricas similares a aquellas empleadas en fortificación minera, además se emplearon diferentes porcentajes de Polietileno de Tereftalato (PET) – arena, mezcla que fue fundida y moldeada en forma de cuerpos paralelepípedos. Dichos ensayos fueron practicados en los laboratorios de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay, los resultados obtenidos determinan la viabilidad de estos materiales para su uso en ademes mineros en función de la resistencia al pandeo.

Palabras Clave: reciclado, PET, arena, minería, pandeo.



Gil Tarquino Álvarez Pacheco
Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela



Karina Nataly Malla Ordóñez

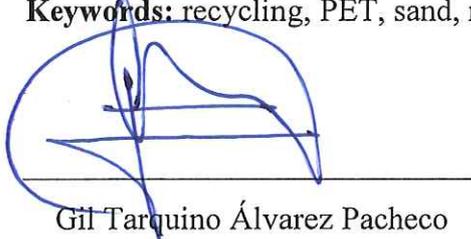
Autor

**ALTERNATIVE TO THE USE OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE
(PET) AND AGGREGATES IN MINERAL FORTIFICATION AS A FUNCTION
OF SAG RESISTANCE**

ABSTRACT

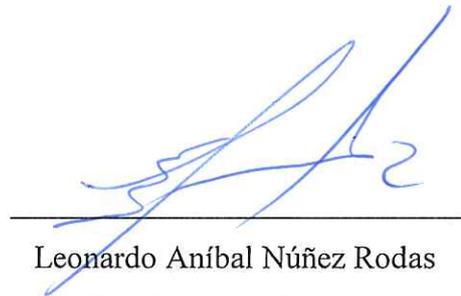
The purpose of this study was to establish if the recycled Polyethylene Terephthalate (PET) polymer, in combination with the common construction sand in different percentages and different granulomeres, is an alternative to the use of wood in mining fortification structures. This alternative was determined through tests with sag efforts. To achieve this, it was necessary to manufacture test pieces with geometrical proportions similar to those used in mining fortification. Different percentages of Terephthalate Polyethylene (PET)-sand were used, this mixture was melted and molded into parallelepiped bodies. These tests were carried out in the laboratories of the Science and Technology Faculty of the University of Azuay. The results obtained showed the viability to use these materials in mining structures according to the sag resistance.

Keywords: recycling, PET, sand, mining, sag.



Gil Tarquino Álvarez Pacheco

Thesis Director



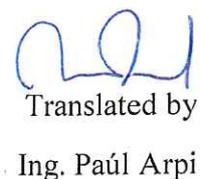
Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Faculty Coordinator



Karina Nataly Malla Ordóñez

Author



Translated by
Ing. Paúl Arpi

Malla Ordóñez Karina Nataly

Trabajo de Titulación

Ing. Gil Tarquino Álvarez Pacheco

Enero, 2019.

**ALTERNATIVA DEL USO DEL POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET) Y
AGREGADOS EN FORTIFICACIÓN MINERA EN FUNCIÓN DE LA
RESISTENCIA AL PANDEO**

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo se ha hecho uso de la fortificación minera clásica, aquella que se realiza con madera, más hoy se busca analizar la factibilidad de una posible fortificación con un material diferente, como lo es la combinación de Polietileno de Tereftalato (PET) y arena común de construcción.

La minería y las actividades extractivas han ocupado uno de los lugares principales en el desarrollo económico de un país, pero conseguir aquello ha involucrado el uso y posterior desecho de materiales, generando proyectos poco sostenibles y sustentables para el medio ambiente, tanto en minería subterránea como en minería a cielo abierto.

Hasta la actualidad, para la fortificación y estabilidad de galerías en minería se han empleado diferentes tipos de madera con características relevantes de resistencia a lo largo del tiempo, pero lo que hoy busca la minería responsable y con visión en el aspecto ambiental, es reducir el uso de la madera optando por materiales reciclables y reutilizables que contribuyan con el medio ambiente.

El elevado uso de la madera a lo largo del tiempo, ha producido un aumento significativo en la demanda de la misma y poca renovación de aquellas áreas en las que se ha intervenido, a más de suelos erosionados y reducción de la fertilidad de los mismos, hasta una destrucción del hábitat, flora y fauna silvestre.

Es por esta razón que nace la iniciativa de buscar alternativas que reemplacen el uso de recursos naturales como lo es la madera, por aquellos que contribuyen con el manejo ambiental. Es así como surge la idea del uso de polímeros sintéticos, provenientes de material reciclado que actúen como materia prima, de manera que al ser combinados con otro tipo de materiales adquiera las mismas o mejores características que la madera.

Se ha iniciado entonces con un estudio de las características y propiedades de los plásticos, dando lugar a la selección de aquel polímero que es producido a partir de plásticos reciclados como lo es el Polietileno de Tereftalato (PET).

El Polietileno de Tereftalato (PET) es muy común entre nosotros y lo tenemos prácticamente en nuestra vida diaria, en forma de envases para bebidas, fundas plásticas o recipientes de alimentos. Este material es completamente reciclable y se espera que, al ser combinado con otro material, proporcione características aceptables en fortificación minera.

El material seleccionado como complemento del Polietileno de Tereftalato (PET) es la arena común de construcción, siendo su consistencia una de sus principales propiedades, su extracción no presenta mayores dificultades y se la puede encontrar en abundancia y a precios accesibles.

En diferentes combinaciones el Polietileno de Tereftalato (PET) y arena común proporcionarán características y propiedades de interés para una posible fortificación minera, pero como en todo estudio, es necesario una serie de ensayos que afirmen lo establecido o demuestren lo contrario, es por esta razón que se ha estudiado la fabricación de probetas con diferentes composiciones las mismas que serán sometidas a un determinado ensayo.

El ensayo que será estudiado es el de pandeo. La carga máxima que resistirá cada probeta ante este tipo de esfuerzo nos llevará a determinar si el uso de Polietileno de Tereftalato (PET) y arena común de construcción es viable en fortificación de túneles mineros.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

El presente estudio busca reemplazar el uso de la madera en fortificación minera por material reciclado con el fin de disminuir el impacto ambiental, siendo fundamental un estudio previo de algunas situaciones a las cuales se encuentra sometida una entibación.

Para el Pandeo, que es el tipo de esfuerzo en el que se va a basar la investigación, es necesario realizar un estudio del mismo y hacer un análisis del posible comportamiento de éste en relación al Polietileno de Tereftalato (PET).

En el caso del Polietileno de Tereftalato (PET), es preciso entender su origen, los diferentes elementos que pueden complementarlo y crearlo, su comportamiento, su codificación, así como también sus particulares características y diferentes clasificaciones.

Todos estos aspectos nos son útiles para la determinación de la factibilidad de una posible fortificación minera con el material planteado y el tipo de esfuerzo establecido.

1.1 Fortificación Minera

Después de abierta una excavación, existe la necesidad de hacer ciertas obras de seguridad o lo que se llama fortificación.

La duración de una fortificación depende de varias circunstancias. Si la adernación se halla en una excavación muy seca y poco ventilada, entonces las maderas se pudren al cabo de poco tiempo, habiendo que renovarlas a menudo. Si la excavación tiene algo de humedad y al mismo tiempo una temperatura elevada, las maderas se eflorocen, dando lugar a la aparición de una especie de hongos que las destruye muy tempranamente; pero si la excavación está seca y corre por ella un aire fresco, en ese caso la entibación puede llegar a durar entre 8 y 10 años. La elevada humedad conserva las maderas y sobre todo si el agua es vitriólica (Bayo, 1839).

De lo dicho se infiere que, para decidir si en una excavación es preferible usar fortificación de madera o de mampostería, hay que tener presente: 1. El costo de cada una de las dos clases de fortificación. 2. El tiempo que dura la entibación en aquella

excavación que se trata de fortificar. 3. El número de años que la excavación debe permanecer abierta (Bayo, 1839).

El diseño de ademes en las minas es un requisito que siempre debe considerar el Ingeniero Minero; es el primer paso para un control efectivo del techo (Bayo, 1839).

Los ademes de madera, aunque obsoletos en algunos países, son todavía un material básico de soporte para muchas minas en donde no se puede usar el acero, debido a costos relativamente más altos o por la dificultad de mecanización o manipulación dentro de una galería. La resistencia de la madera para las minas se estudia con respecto a los esfuerzos de tensión, compresión, flexión, cortante y pandeo; además, se proporcionan datos ingenieriles. En seguida, se evalúan los esfuerzos que actúan en los marcos de madera de los socavones y en los ademes de las frentes largas. Se hace el diseño de los elementos estructurales de los marcos de madera en los túneles y en las frentes largas como son los cabezales, postes, cuñas y ademes auxiliares. Se hace énfasis en los factores económicos, es decir, se diseña con la mínima cantidad posible de material (Bayo, 1839).

1.1.1 Ademe Provisional

Ya se ha estudiado el problema general de los esfuerzos en la roca durante la excavación del túnel. La necesidad de un ademe provisional, es decir, el soporte previo a la colocación del revestimiento permanente, dependerá de los detalles geológicos, o sea: tipo de roca, patrón de las juntas, buzamientos y rumbo, discontinuidades, nivel freático, propiedades de la roca, grado de intemperismo o alteración de la masa rocosa. La necesidad del soporte dependerá además de los factores de la construcción, a saber: tamaño y forma del túnel, dirección de la perforación en relación al buzamiento, métodos y procedimientos de excavación. El ademe provisional del terreno tiene dos objetivos: primero, proporcionar apoyo local a la roca que pudiera desprenderse o desplazarse seriamente y, segundo (que quizá sea el más importante), guiar el desarrollo de la acción natural del arco y conservarla (Bartlett, 1988).

El grado y calidad de este arco depende del estado y naturaleza de la roca y, especialmente, de su compacidad. En términos más simples, los cuales se modifican por la estructura de la roca, es que se forma un arco por encima del techo excavado dejando una zona aproximadamente triangular que podría necesitar un apoyo adicional. Si se deja que el arco tenga relajamiento, la debilidad se podrá extender hacia arriba hasta una

mayor altura, por lo que se hace necesario un mayor soporte. La selección del método de conservación del arco depende de los factores que aparecen en la lista anterior y además de otros factores, como el asentamiento permisible del terreno, la permanencia de la abertura, y la economía del revestimiento (Bartlett, 1988).

1.1.2 Ademes de Madera

La madera ha sido uno de los materiales más importantes para la construcción de ademes en las operaciones de minería desde hace muchos años atrás, así como lo es también el acero. Además, es usada como material de ademe en minas a pequeña escala, tanto metálicas como no metálicas (Arioğlu, 1987).

La madera es un material de peso ligero, fácilmente transportable y se maneja con facilidad en los ademes. Esto hace que la madera sea un material económico cuando se usa en ademes cuya vida útil es corta (Arioğlu, 1987).

La madera posee tanto ventajas como desventajas, especialmente cuando es usada en minas:

Las ventajas son las siguientes:

- a) Es ligera, fácil de transportar, fácil de procesar, manejable y se coloca fácilmente como ademe en la mina.
- b) Se rompe a lo largo de estructuras fibrosas precisas, dando señales visuales y audibles antes de que falle completamente. Esto ha hecho que los mineros consideren a la madera con una ventaja psicológica sobre el acero.
- c) Las piezas rotas se pueden volver a utilizar para calces, cuñas, rellenos, etc (Arioğlu, 1987).

Las desventajas son las siguientes:

- a) 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.
- b) La humedad tiene un efecto muy marcado en la resistencia.
- c) Muchos hongos afectan a la madera cuando hay condiciones de humedad disminuyendo considerablemente su resistencia.

- d) La madera es un material fácilmente combustible, por lo que el fuego podría propagarse rápidamente por los ademes y producir gases venenosos (Arioğlu, 1987).

1.1.3 Características Ingenieriles de la Madera usada en las Minas

a) Estructura Fibrosa

La madera se compone aproximadamente del 45 al 50% de celulosa, 20 a 25% de lignina, 5% de pectina y 20% de otros materiales. La celulosa 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. Es un polímero tridimensional de unidades de fenilpropano. La pectina es un material gelatinoso y feculento que une las paredes de las células y es muy susceptible a la hinchazón y a la contracción como resultado del contacto con agua (Arioğlu, 1987).

b) Factores que afectan la madera

Agua: El agua es el componente más importante de la madera. Alrededor del 25% del contenido de agua está en las células vivas y el 75% restante en los huecos de las fibras. En condiciones normales (20°C y 80% de humedad relativa), el contenido de agua es cerca del 20%. Se considera seca cualquier madera que tenga menos de esta cantidad de agua; mientras que la que tenga más de 30% de agua se considera húmeda (Arioğlu, 1987).

Defectos de la madera: La madera en su estado natural, tiene muchos defectos causados por las condiciones de su crecimiento, como los singulares nudos que son parte de la fisiología de un árbol, pero que a la hora de extraer madera crean problemas y afectan a la resistencia a la flexión (Arioğlu, 1987).

c) Resistencia de la madera

La madera en las minas está sujeta a flexión cuando se presenta como viga, a compresión al pandeo cuando actúa como columna y a cizallamiento cuando se aplica una fuerza cortante. La resistencia de la madera bajo estas condiciones y los factores que la afectan, se dan en las secciones siguientes:

- ✓ Resistencia a la Tensión: La resistencia máxima de la madera es aquella sometida al esfuerzo de tensión, especialmente cuando ésta es paralela a la estructura fibrosa.

La densidad tiene una relación directamente proporcional con respecto a la resistencia a la tensión.

Por el contrario, la humedad decrece la resistencia a la tensión (Arioğlu, 1987).

- ✓ Resistencia a la Compresión: La máxima resistencia a la compresión desempeña un papel importante en la utilización de la madera. Los diferentes comportamientos de la madera sometida a tensión y compresión pueden darse por su estructura fibrosa. Las fibras bien cementadas y acuñadas soportan esfuerzos a la tensión muy altos; pero sometidas a compresión, probablemente presente un pandeo inicial de las fibras individuales al empezar la ruptura.

La resistencia a la compresión de la madera a lo largo de la fibra se incrementa con la densidad.

El contenido de humedad es el factor más importante en la resistencia a la compresión de la madera (Arioğlu, 1987).

- ✓ Resistencia al Pandeo: Esta resistencia se mide con cargas paralelas a las fibras, en el eje del elemento. Según los investigadores, la resistencia de la madera al pandeo depende de la relación de esbeltez y del módulo de elasticidad en la madera (Arioğlu, 1987).

Tabla 1.1 Resistencia al pandeo de la madera para minas.

Diámetro [d(cm)]	Longitud [l(m)]	Esbeltez $\lambda=4l/d$	Resistencia al		
			flamdeo (kg/cm ²)	Densidad (g/cm ³)	Contenido de Agua (%)
16.1	1.00	24.8	284.0	0.560	20.3
13.2	1.00	30.3	384.3	0.616	21.5
12.7	1.20	37.8	322.1	0.637	19.4
12.5	1.20	38.4	221.7	0.555	23.2
14.2	1.50	42.3	280.7	0.686	21.9
16.5	1.50	36.4	207.0	0.585	24.3
16.5	1.80	43.7	175.2	0.670	25.7
16.0	1.80	45.0	271.3	0.630	22.2
13.5	2.00	59.0	214.5	0.638	21.3
16.1	2.00	49.0	233.9	0.664	24.3

Fuente: Arioğlu, 1987.

La tabla 1.1 proporciona la resistencia al pandeo para los maderos circulares empleados en las minas. En la misma se indica el diámetro y longitud de la madera, así como su esbeltez, resistencia al pandeo, densidad y porcentaje del contenido de agua.

- ✓ 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 sitúa más cerca del lado de la tensión que del lado de la compresión, porque la resistencia a la tensión es mucho más alta que la resistencia a la compresión. El módulo de ruptura se mide cargando una viga en el centro (Arioğlu, 1987).

- ✓ Resistencia al Cortante: La resistencia máxima al cortante de la madera es notablemente más bajo que la resistencia a la tensión. Para elementos de madera sólida, el cortante máximo permisible puede tomarse como el esfuerzo cortante paralelo a la fibra (Arioğlu, 1987).
- ✓ Resistencias Permisibles: Debido a que la madera es un material natural, muchos factores aleatorios afectan su resistencia por lo que se necesita un “factor de seguridad” elevado. El procedimiento óptimo sería probar la resistencia del material a la mano y utilizarlo de acuerdo a las resistencias determinadas (Arioğlu, 1987).

1.1.4 Esfuerzos en los Ademes de Madera

Existen dos tipos en los diseños de ademes de madera:

- a) Los ademes deberán soportar las cargas “con seguridad” (factor de seguridad).
- b) La cantidad de material y de mano de obra se deberá restringir a un mínimo (factor de economía) (Arioğlu, 1987).

Evaluación de los esfuerzos:

- ✓ Bajo condiciones estáticas del techo, la presión del techo, al actuar sobre los ademes, se incrementa con el espesor del manto.
- ✓ Bajo condiciones cambiantes del techo, la presión del techo, al actuar sobre los ademes, es menor en las frentes con rellenos que en las frentes hundidas.
- ✓ Bajo condiciones muy estables del techo y en mantos potentes, se deben usar sistemas de relleno para reducir la presión (Arioğlu, 1987).

1.1.5 Diseño de los Ademes de Madera

- a) Principios de Diseño

El diseño de los sistemas de ademes de madera sigue ciertos pasos. Primero, se hacen esquemas del sistema y se dibujan los modelos estáticos simples. Después se evalúa la presión con diferentes fórmulas. Se calculan los diagramas de momentos, momentos máximos, esfuerzos cortantes máximos y las secciones que están sometidas a estos

momentos y a los cortantes; y se determinan las dimensiones. Si se encuentra que estas dimensiones son demasiado grandes, se hacen modificaciones. Finalmente, se hacen las verificaciones de los esfuerzos permisibles para las dimensiones y para el material (Arioğlu, 1987).

b) Marcos de Madera en los Túneles

El diseño de los marcos en los túneles consiste en encontrar el tamaño apropiado para los cabezales, postes laterales y partes auxiliares como cuñas, revestimiento, etc. En la figura 1.1 se muestra un marco de madera típico de un túnel. Se indican los esfuerzos en los cabezales y en los postes con sus dimensiones apropiadas y se incorporan los diagramas del momento y del esfuerzo cortante. El marco de madera trabaja como una viga simple que se apoya en ambos extremos, con carga uniformemente distribuida (Arioğlu, 1987).

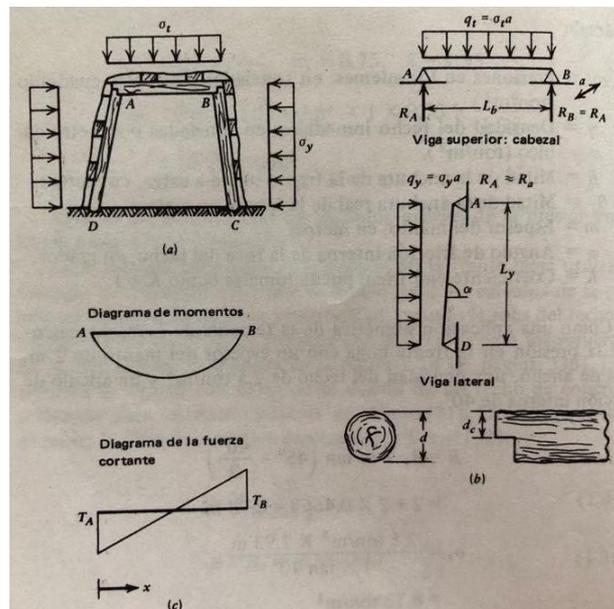


Figura 1. 1 Esquema del diseño de los marcos de madera en un socavón: a) Sistema de Ademe; b) Modelos Estáticos; c) Diagramas de una viga simple – mente apoyada.

Fuente: Arioğlu, 1987.

- ✓ Diseño de los Cabezales de Madera: El cabezal en los ademes de madera está sujeto a flexión (Arioğlu, 1987).
- ✓ Diseño de los Postes Laterales: Los postes laterales de los ademes de madera están sometidos a presiones de los lados y a las reacciones en sus extremos. Por lo tanto, en su diseño, se deberán evaluar los esfuerzos normales de compresión y de flexión. En la práctica, se utilizan para los postes los mismos diámetros que tienen los cabezales. Sin embargo, este diámetro se deberá verificar (Arioğlu, 1987).

- ✓ Diseño de los calces o cuñas: Las cuñas se diseñan de una manera similar a los cabezales. El espaciamiento en condiciones comunes es absolutamente suficiente. Bajo condiciones adversas o variables, se debería hacer un nuevo diseño. Por lo general, los calces que se cortan longitudinalmente de los postes de 12 a 18 cm son adecuados. El diseño se hace suponiendo que el esfuerzo flexionante está bajo el límite de seguridad (Arioğlu, 1987).
- ✓ Aplicación Numérica: Calcule las dimensiones de un marco de madera en un túnel bajo las siguientes condiciones:
 - Anchura del túnel o galería.
 - Altura.
 - Distancia entre los marcos.
 - Esfuerzo permisible de flexión.
 - Esfuerzo cortante permisible.
 - Condiciones de carga (Arioğlu, 1987).

c) Refuerzos en los marcos de los túneles

Los marcos de un túnel ancho, requieren por lo común refuerzos para disminuir el tamaño de los cabezales y de los postes (Arioğlu, 1987).

Se muestran refuerzos típicos en la figura 1.2. Un cabezal con tales refuerzos trabaja como una viga con carga uniformemente repartida y con tres apoyos (Arioğlu, 1987).

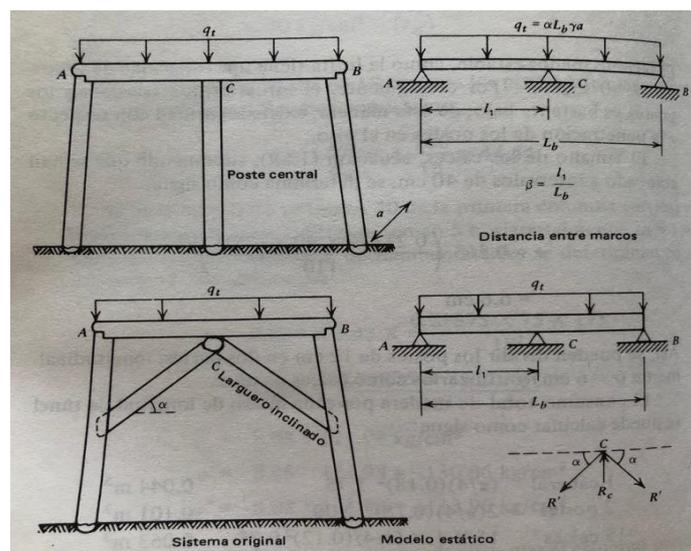


Figura 1. 2 Refuerzos en el marco de un socavón.

Fuente: Arioğlu, 1987

d) Diseño Óptimo

Las dimensiones de los cabezales, postes y cuñas (o calces) se calculan como se indicó en las secciones precedentes. Para la economía del diseño, se debe escoger el tamaño y el espaciamiento adecuados para reducir al mínimo el consumo de la madera, es decir, se debe encontrar el tamaño (diámetro del cabezal) y el espaciamiento que requiera el mínimo volumen de madera (Arioğlu, 1987).

e) Diseño de los Ademes en las Frentes Largas

Los ademes que más frecuentemente se utilizan en las frentes largas son cabezales o travesaños que se colocan paralelamente a la frente con tres o cuatro postes que los soportan, como se indica en la figura 1.3 y 1.4. Se supone que los cabezales trabajan como vidas continuas con carga y que no existe hundimiento en los apoyos (Arioğlu, 1987).

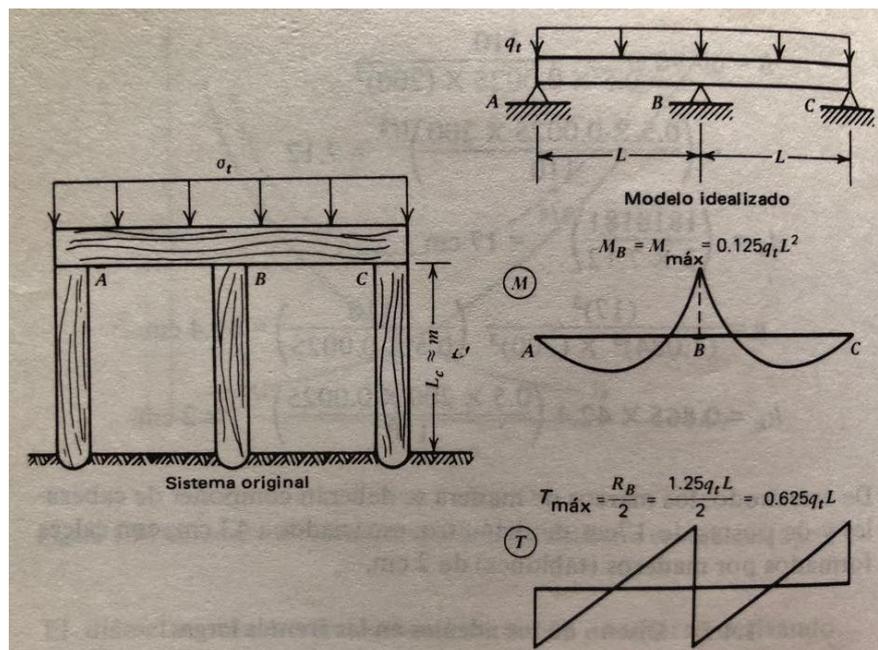


Figura 1.3 Diseño de los cabezales en la frente larga con tres postes.

Fuente: Arioğlu, 1987.

El diseño debe considerar los momentos máximos y evaluar la capacidad del diámetro del cabezal para tomar los momentos de flexión dentro del esfuerzo permisible para la madera. Después se verifican los esfuerzos cortantes y los esfuerzos en el piso o suelo (Arioğlu, 1987).

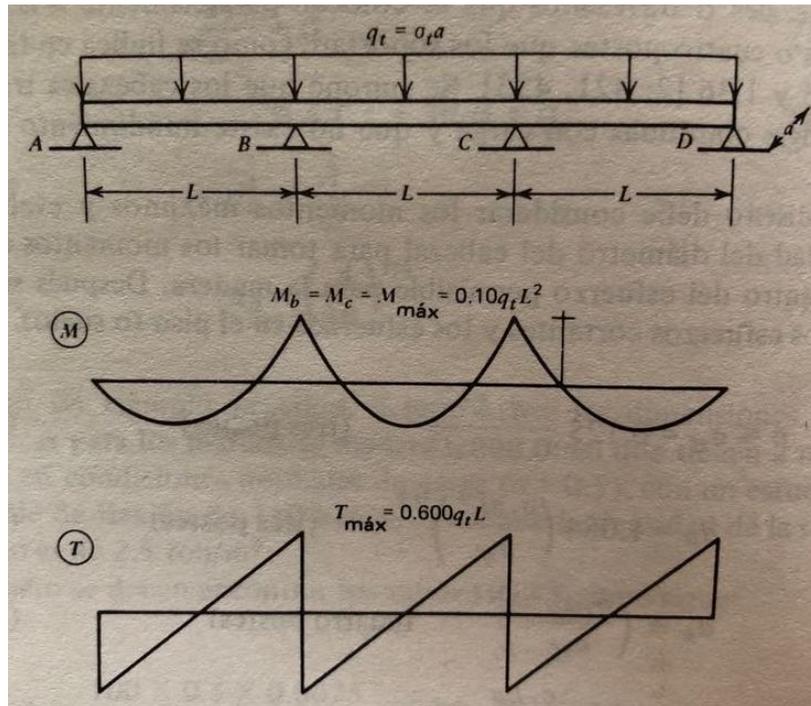


Figura 1. 4 Diseño de los cabezales en la frente larga con cuatro postes.

Fuente: Arioğlu, 1987.

1.2 Pandeo y sus Características

Una columna es un elemento axial sometido a compresión, lo bastante delgado respecto de su longitud, para que bajo la acción de una carga gradualmente creciente se rompa por flexión lateral o pandeo ante una carga mucho menor que la necesaria para romperlo por compresión. Esto se diferencia de un poste corto sometido a compresión, el cual, aunque esté cargado excéntricamente, experimenta una flexión lateral despreciable (Singer, 2008).

Aunque no existe un límite perfectamente definido entre elemento corto y columna, se suele considerar que un elemento a compresión es una columna si su longitud es más de diez veces su dimensión transversal menor. Las columnas se suelen dividir en dos grupos: Largas e intermedias. A veces, los elementos cortos a compresión se consideran como un tercer grupo de las columnas. Las diferencias entre los tres grupos vienen determinadas por su comportamiento. Las columnas largas se rompen por pandeo o flexión lateral; las intermedias, por una combinación de aplastamiento y pandeo, y los postes cortos, por compresión. Examinaremos ahora con detalle estas diferencias (Singer, 2008).

Una columna ideal es un elemento homogéneo, de sección recta constante, inicialmente perpendicular al eje, y sometido a compresión. Sin embargo, las columnas suelen tener

siempre pequeñas imperfecciones de material y de fabricación, así como una inevitable excentricidad accidental en la aplicación de la carga. Todo esto se representa muy exageradamente (figura 1.5). La curva inicial de la columna, junto con la posición de la carga, dan lugar a una excentricidad indeterminada e , con respecto al centro de gravedad en una sección cualquiera $m - n$. El estado de carga en esta sección es similar al de un poste corto cargado excéntricamente, y el esfuerzo resultante está producido por la superposición del esfuerzo directo de compresión y el esfuerzo de flexión o, mejor dicho, por flexión (Singer, 2008).

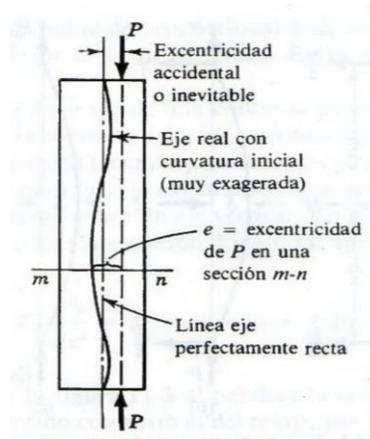


Figura 1. 5 Factores que intervienen en la excentricidad de las cargas en las columnas.

Fuente: Singer, 2008.

Si la excentricidad es pequeña y el elemento es corto, la flexión lateral es despreciable, y el esfuerzo de flexión es insignificante comparado con el esfuerzo de compresión directo. Sin embargo, en un elemento largo, que es mucho más flexible ya que las deflexiones son proporcionales al cubo de la longitud, con un valor relativamente pequeño de la carga P puede producirse un esfuerzo de flexión grande, acompañado de un esfuerzo directo de compresión despreciable. Así, pues, en las dos situaciones extremas, una columna corta soporta fundamentalmente el esfuerzo directo de compresión, y una columna larga está sometida principalmente al esfuerzo de flexión lateral. Cuando aumenta la longitud de una columna disminuye la importancia y efectos del esfuerzo directo de compresión y aumenta correlativamente los del esfuerzo de flexión. Por desgracia, en la zona intermedia no es posible determinar exactamente la forma en que varían estos dos tipos de esfuerzos, o la proporción con la que cada una contribuye al esfuerzo total (Goodno, 2009).

No se ha dado, hasta aquí, criterio alguno de diferenciación entre columnas largas e intermedias, excepto en su forma de trabajar, es decir, la columna larga está sometida

esencialmente a esfuerzos de flexión y la intermedia lo está a esfuerzos de flexión y de compresión directa (Goodno, 2009).

Las estructuras sometidas a carga pueden fallar de diversas maneras, dependiendo del tipo de estructura, de las condiciones de soporte, de los tipos de cargas y de los materiales empleados. Por ejemplo, una viga puede flexionarse de manera excesiva, de tal modo que la estructura ya no puede realizar sus funciones de trabajo. Estos tipos de fallas se evitan diseñando estructuras de forma que los esfuerzos máximos y los desplazamientos máximos permanezcan dentro de límites tolerables. Por tanto, la resistencia y rigidez son factores importantes en el diseño (Goodno, 2009).

Otro tipo de falla es el pandeo. Consideraremos de manera específica el pandeo de columnas, que son elementos estructurales largos y esbeltos, cargados axialmente en compresión. Si un elemento en compresión es relativamente esbelto, se puede flexionar lateralmente y fallar por flexión en vez de fallar por compresión directa del material. Se puede demostrar este comportamiento al comprimir una regla de plástico u otro objeto esbelto. Cuando se tiene flexión lateral, decimos que la columna se ha pandeado. Ante una carga axial creciente, las deflexiones laterales también aumentan y la columna termina por doblarse completamente (Goodno, 2009).

El fenómeno de pandeo no está limitado sólo a columnas, también puede ocurrir en muchos tipos de estructuras y puede adoptar muchas formas (Goodno, 2009).

1.2.1 Pandeo y Estabilidad

Suponga que debe diseñarse una columna AB de longitud L , para soportar una carga P (figura 1.6 a). Imagine que P es una carga axial céntrica y que la columna tiene sus dos extremos articulados. Si el área transversal A de la columna es tal que el valor del esfuerzo en la sección transversal es menor que el valor permisible para el material utilizado y si la deformación cae dentro de las especificaciones dadas, podría concluirse que la columna se ha diseñado bien. Sin embargo, puede suceder que al aplicar la carga la columna se pandee, en lugar de permanecer recta, y se curve repentinamente (figura 1.6 b) (Ferdinand P. Beer, 1982).

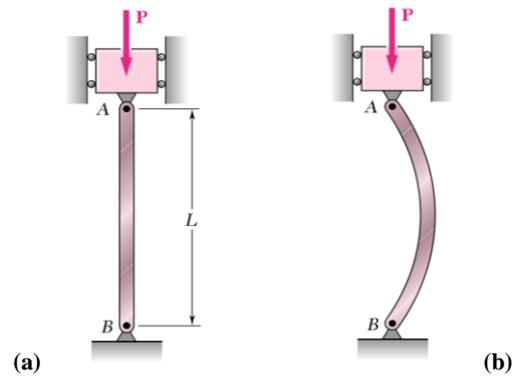


Figura 1. 6 Estabilidad de Estructuras.

Fuente: Ferdinand P. Beer, 1982.

Para ilustrar los conceptos fundamentales de pandeo y estabilidad, analizaremos una estructura idealizada, o modelo de pandeo (Ferdinand P. Beer, 1982).

En la estructura idealizada las dos barras están perfectamente alineadas y la carga axial P tiene su línea de acción a lo largo del eje longitudinal (figura 1.7). En consecuencia, el resorte inicialmente no está sometido a esfuerzo y las barras están en compresión directa (Ferdinand P. Beer, 1982).

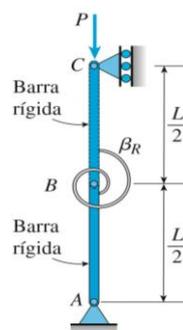


Figura 1. 7 Pandeo de una estructura idealizada que consiste en dos barras rígidas y un resorte rotacional.

Fuente: Goodno, 2009.

Ahora suponga que la estructura es perturbada por alguna fuerza externa que causa que el punto B se mueva una distancia pequeña en sentido lateral (figura 1.8). Las barras rígidas giran ángulos pequeños θ y se desarrolla un momento en el resorte. El sentido de este momento tiende a regresar la estructura a su posición recta original y por tanto se denomina momento restitutivo. Sin embargo, al mismo tiempo la tendencia de la fuerza axial de compresión es aumentar el desplazamiento lateral. Por tanto, estas dos acciones tienen efectos opuestos: el momento restitutivo tiende a disminuir el desplazamiento y la fuerza axial tiene a aumentarlo (Goodno, 2009).

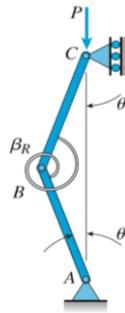


Figura 1. 8 Pandeo de una estructura idealizada que consiste en dos barras rígidas y un resorte rotacional.

Fuente: Goodno, 2009.

A continuación, considere qué sucede cuando se elimina la fuerza perturbadora. Si la fuerza axial P es relativamente pequeña, la acción del momento restitutivo prevalecerá sobre la acción de la fuerza axial y la estructura regresará a su posición inicial recta. En estas condiciones, se dice que la estructura es estable. No obstante, si la carga axial P es grande, el desplazamiento lateral del punto B aumentará y las barras girarán ángulos cada vez mayores hasta que la estructura se colapsa. Ante estas condiciones, la estructura es inestable y falla por pandeo lateral (Goodno, 2009).

1.2.2 Carga Crítica

La carga axial máxima que puede soportar una columna cuando está a punto de pandearse se llama “carga crítica”, P_{cr} (figura 1.9 a). Toda carga adicional hará que la columna se pandee, y en consecuencia se flexione lateralmente, como se indica (figura 1.9 b) (Hibbeler, 2006).

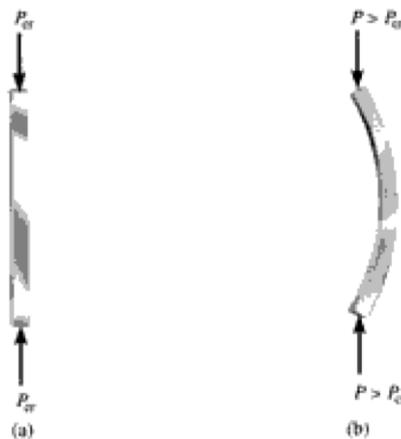


Figura 1. 9 Carga crítica.

Fuente: Hibbeler, 2006.

Podemos determinar la carga crítica de nuestro modelo de pandeo al considerar la estructura en la posición perturbada (figura 1.10) e investigar su equilibrio (Goodno, 2009).

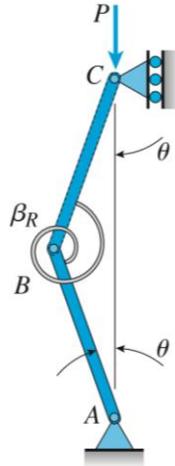


Figura 1. 10 Pandeo de una estructura idealizada que consiste en dos barras rígidas y un resorte rotacional.

Fuente: Goodno, 2009.

La carga crítica es la única para la cual la estructura estará en equilibrio en la posición perturbada. En este valor de la carga, el efecto restitutivo del momento en el resorte coincide con el efecto de pandeo de la carga axial. Por tanto, la carga crítica representa la frontera entre las condiciones estable e inestable. Si la carga axial es menor que P_{cr} , el efecto del momento en el resorte predomina y la estructura regresa a la posición vertical después de una perturbación pequeña; si la carga axial es mayor que P_{cr} , el efecto de la fuerza axial predomina y la estructura se patea:

- ✓ Si $P < P_{cr}$, la estructura es estable.
- ✓ Si $P > P_{cr}$, la estructura es inestable.

La estabilidad de la estructura se incrementa al aumentar su rigidez o disminuir su longitud (Goodno, 2009).

Entonces, asumiendo el comportamiento de la estructura idealizada conforme la carga axial P aumenta desde cero hasta un valor grande (Goodno, 2009).

Cuando la carga axial es menor que la carga crítica ($0 < P < P_{cr}$), la estructura está en equilibrio cuando es perfectamente recta. Debido a que el equilibrio es estable, la

estructura regresa a su posición inicial después de ser perturbada. Por tanto, la estructura está en equilibrio sólo cuando está perfectamente recta ($\theta = 0$) (Goodno, 2009).

Cuando la carga axial es mayor que la carga crítica ($P > P_{cr}$), la estructura aún está en equilibrio cuando $\theta = 0$ (dado que está en compresión directa y no hay momento en el resorte), pero el equilibrio es inestable y no se puede mantener, ya que la perturbación más ligera causará que la estructura se pandee. En el valor de la carga crítica ($P = P_{cr}$), la estructura está en equilibrio aun cuando el punto B esté desplazado lateralmente una cantidad pequeña. En otras palabras, la estructura está en equilibrio para cualquier ángulo pequeño $\Delta\theta$, incluyendo $\theta = 0$. Sin embargo, la estructura ni es estable ni inestable, está en la frontera entre estabilidad e inestabilidad. A esta condición se le refiere como equilibrio neutro. Las tres condiciones de equilibrio para la estructura idealizada se muestran en la gráfica de la carga axial P contra el ángulo de rotación θ (figura 1.11). Las dos líneas, una vertical y la otra horizontal, representan las condiciones de equilibrio. El punto B, donde el diagrama de equilibrio se bifurca, se denomina punto de bifurcación (Goodno, 2009).

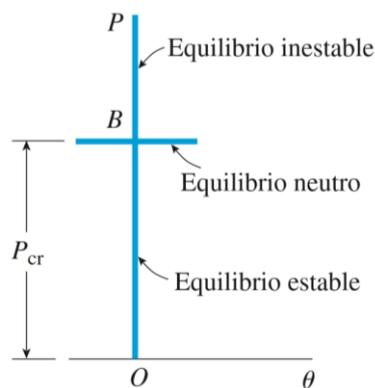


Figura 1. 11 Diagrama de equilibrio para el pandeo de una estructura idealizada.

Fuente: Goodno, 2009.



Figura 1. 12 Bola en equilibrio estable, inestable y neutro.

Fuente: Goodno, 2009.

1.2.3 Columnas con Extremos Articulados

Iniciamos nuestro estudio del comportamiento de la estabilidad de columnas al analizar una columna esbelta con extremos articulados (figura 1.13 a). La columna está cargada por una fuerza vertical P que se aplica en el centroide de la sección transversal. La columna es perfectamente recta y está hecha de material linealmente elástico que sigue la ley de Hooke. Como se supone que la columna no tiene imperfecciones, se llama columna ideal (Goodno, 2009).

Para fines de análisis, establecemos un sistema coordenado con el origen en el soporte A y con el eje x a lo largo del eje longitudinal de la columna. El eje y está dirigido hacia la izquierda en la figura y el eje z (no se muestra) sale del plano de la figura hacia el observador. Suponemos que el plano xy es un plano de simetría de la columna y que cualquier flexión sucede en ese plano (figura 1.13 b) (Goodno, 2009).

Cuando la carga axial P tiene un valor pequeño, la columna permanece perfectamente recta y experimenta compresión axial directa. Los únicos esfuerzos son los de compresión uniforme. La columna está en equilibrio estable, lo cual significa que vuelve a la posición recta después de la perturbación. Por ejemplo, si aplicamos una carga lateral pequeña y ocasionamos que la columna se flexione, la deflexión desaparecerá y la columna retornará a su posición original cuando se elimina la carga lateral (Goodno, 2009).

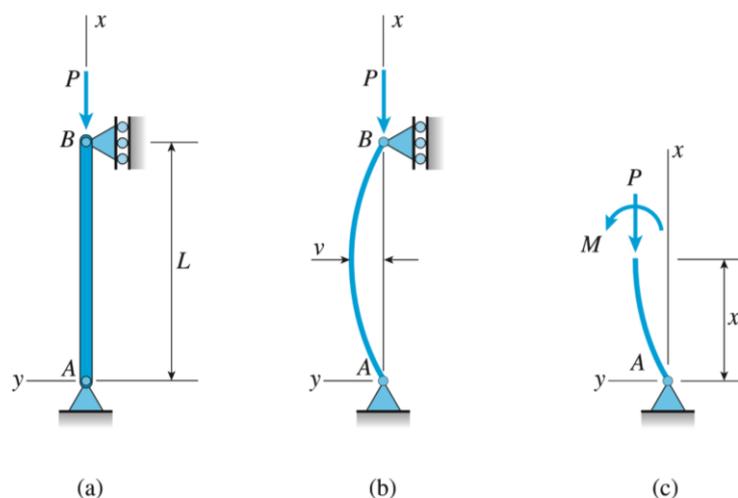


Figura 1. 13 Columna con extremos articulados: (a) columna ideal, (b) forma pandeada y (c) fuerza axial P y momento flexionante M que actúan en una sección transversal.

Fuente: Goodno, 2009.

El equilibrio es inestable, la perturbación mínima imaginable ocasionará que la columna se flexione en sentido lateral. Una vez que esto sucede, las deflexiones aumentarán de inmediato y la columna fallará por pandeo (Goodno, 2009).

El pandeo de una columna articulada se denomina caso fundamental de pandeo de la columna. El tipo de pandeo descrito en esta sección se denomina pandeo de Euler y la carga crítica para una columna ideal elástica a menudo se denomina carga de Euler.

Columnas con otras condiciones de soporte:

El pandeo de una columna con extremos articulados (descrito anteriormente) suele considerarse como el caso más básico de pandeo. Sin embargo, en la práctica encontramos muchas otras condiciones en los extremos, como extremos empotrados, extremos libres y soportes elásticos. Las cargas críticas para columnas con varios tipos de condiciones de soporte se pueden determinar empleando el mismo procedimiento que empleamos al analizar una columna con extremos articulados (Goodno, 2009).

1.2.4 Columna empotrada en la base y libre en la parte superior

El primer caso que consideraremos es una columna ideal que está empotrada en la base, libre en la parte superior y sometida a una carga axial P (figura 1.14 a). La forma flexionada de la columna pandeada también se muestra (figura 1.14 b, c, d) (Goodno, 2009).

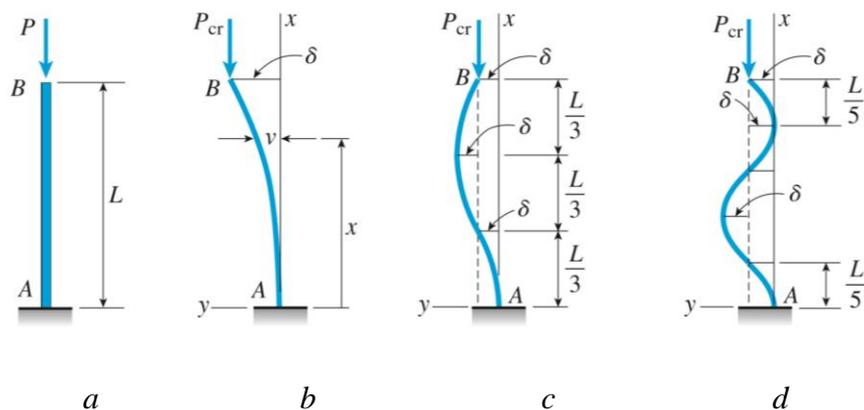


Figura 1. 14 Columna ideal empotrada en la base y libre en la parte superior: (a) columna inicialmente recta, (b) forma pandeada 1, (c) forma pandeada 2 y (d) forma pandeada 3.

Fuente: Goodno, 2009.

1.2.5 Columna con los dos extremos empotrados para evitar rotación

A continuación, consideremos una columna con los dos extremos empotrados para evitar rotación (figura 15 a). Sin embargo, se muestra un bloque rígido que está restringido de tal manera que se evitan la rotación y el desplazamiento horizontal, pero puede ocurrir movimiento vertical (figura 1.15 b). La forma pandeada de la columna en el primer modo se muestra (figura 1.15 c). Observe que la curva de deflexión es simétrica (con pendiente cero en el punto medio) y tiene pendiente cero en los extremos. Dado que se evita la rotación en los extremos, se desarrollan momentos reactivos M_0 en los soportes (Goodno, 2009).

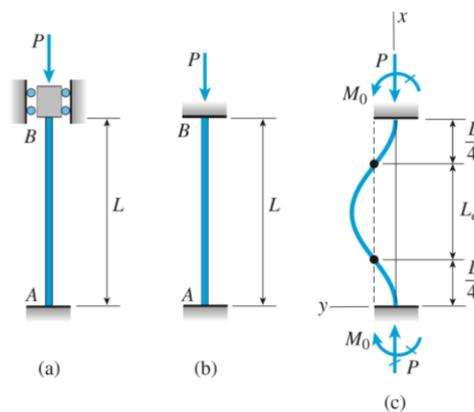


Figura 1. 15 Pandeo de una columna con sus dos extremos empotrados para evitar rotación.

Fuente: Goodno, 2009.

1.2.6 Columna empotrada en la base y articulada en la parte superior

La carga crítica y la forma modal de pandeo para una columna que está empotrada en la base y articulada en la parte superior (figura 1.16 a) se puede determinar al resolver la ecuación diferencial de la curva de deflexión. Cuando la columna se pandea (figura 1.16 b), se genera un momento reactivo M_0 en la base debido a que no puede haber rotación en ese punto. Entonces, del equilibrio de toda la columna, sabemos que debe haber reacciones horizontales R en cada extremo (Goodno, 2009).

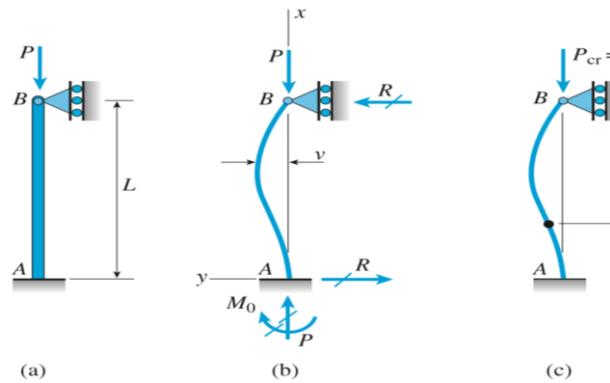


Figura 1. 16 Columna empotrada en la base y articulada en la parte superior.

Fuente: Goodno, 2009.

Limitaciones:

Además del requisito de deflexiones pequeñas, la teoría del pandeo de Euler empleada en esta sección es válida sólo si la columna es perfectamente recta antes de la aplicación de la carga, si la columna y sus soportes no tienen imperfecciones y si la columna está hecha de un material linealmente elástico que sigue la ley de Hooke (Goodno, 2009).

Resumen de maneras de sujeción de columnas:

Las cargas críticas menores y las longitudes efectivas correspondientes para las cuatro columnas que hemos analizado se resumen de la siguiente manera (figura 1.17):

- (a) Columna articulada – articulada.
- (b) Columna empotrada – libre.
- (c) Columna empotrada – empotrada.
- (d) Columna empotrada – articulada (Goodno, 2009).

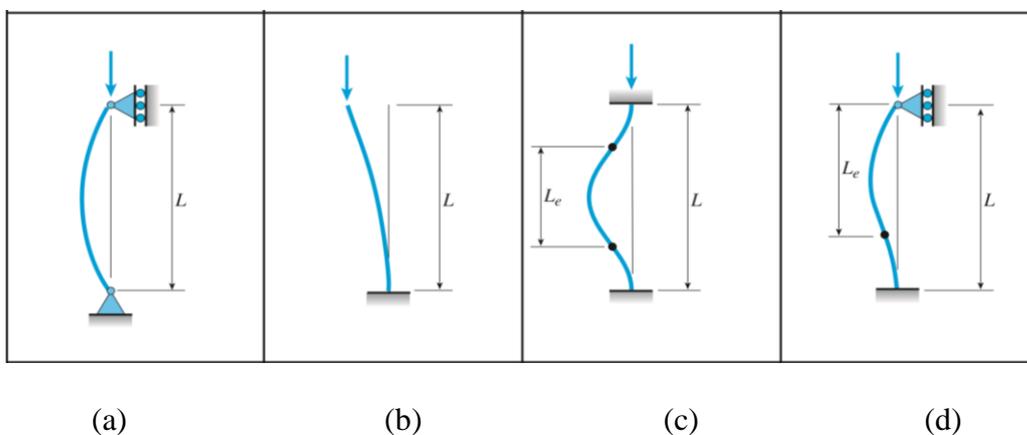


Figura 1. 17 Cargas críticas, longitudes efectivas y factores de longitud efectiva para columnas ideales.

Fuente: Goodno, 2009.

1.2.7 Pandeo Inelástico

Ahora ampliaremos nuestro análisis para incluir el pandeo inelástico, es decir, el pandeo de columnas cuando se sobrepasa el límite de proporcionalidad (Fruendt, 1989).

Las columnas largas con relaciones de esbeltez grandes se pandean a valores bajos del esfuerzo de compresión promedio. Esta condición no se puede mejorar empleando un material con mayor resistencia, debido a que el colapso resulta de inestabilidad de la columna como un todo y no de la falla del propio material. El esfuerzo sólo se puede aumentar reduciendo la relación de esbeltez o empleando un material con un módulo de elasticidad mayor (Fruendt, 1989).

Cuando un elemento en compresión es muy corto, falla por fluencia y aplastamiento del material, y no se implican consideraciones de pandeo o estabilidad. En tal caso, podemos definir un esfuerzo de compresión último como el esfuerzo de falla para el material. Este esfuerzo establece un límite de resistencia para la columna. El límite de resistencia es mucho mayor que el límite de proporcionalidad, dado que representa el esfuerzo último en compresión (Fruendt, 1989).

Entre las regiones de columnas cortas y largas, hay un intervalo de relaciones de esbeltez intermedias demasiado pequeño para que gobierne la estabilidad y demasiado grande para gobiernen las consideraciones de resistencia solas. Una columna de longitud intermedia falla por pandeo inelástico, lo que significa que los esfuerzos máximos están arriba del límite de proporcionalidad cuando ocurre el pandeo. Dado que se sobrepasa el límite de proporcionalidad, la pendiente de la curva esfuerzo - deformación para el material es menor que el módulo de elasticidad; de aquí que la carga crítica para pandeo inelástico siempre sea menor que la carga de Euler (Goodno, 2009).

Una gran variedad de miembros de ingeniería para trabajos de compresión tienen relaciones de esbeltez intermedias y muchos no se pandean hasta después de haber rebasado el límite de proporcionalidad. Sin embargo, hay una importante clase de miembros comprendidos entre los que poseen relaciones de esbeltez muy bajas (robustos o muy gruesos), que fallan por compresión directa sin presentar efectos de pandeo (Goodno, 2009).

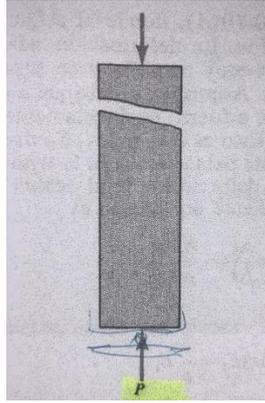


Figura 1. 18 Pandeo Inelástico

Fuente: Edward F. Byars, 1978.

Considérese una columna ideal, que tiene una relación de esbeltez intermedia y extremos articulados, y que ha de ser cargada en pequeños incrementos hasta su carga crítica de pandeo P (Edward F. Byars, 1978).

La ecuación para el pandeo inelástico es la siguiente:

$$P = \frac{\pi^2 E I}{(L)^2}$$

O bien,

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

Donde,

$$I = Ar^2$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Donde,

r = radio de giro (cm).

I = menor momento de inercia.

L/r = relación de esbeltez.

A = área de la sección transversal (cm).

E = módulo de elasticidad.

Esta relación suele llamarse ecuación del módulo referido a la tangente o ecuación de Engesser, por el investigador que la propuso por primera vez (Edward F. Byars, 1978).

1.2.8. Pandeo Elástico

La estabilidad o inestabilidad de una columna, es la relación entre la carga axial de compresión aplicada, P , y la capacidad de restauración elástica de la columna. Si P es suficientemente pequeña tenderá a permanecer recta y estable; en tanto que si P fuera demasiado grande, la columna sería incapaz de permanecer en posición derecha, tenderá a ser inestable y finalmente se pandeará. Se trata ahora de determinar un valor crítico de P que sirva para distinguir una situación estable segura de la situación inestable insegura. Hay varias teorías ampliamente aceptadas que se emplean para determinar este valor crítico, llamado carga teórica de pandeo (Edward F. Byars, 1978).

La siguiente figura muestra la relación entre la carga axial y la deflexión lateral por unidad de longitud para una columna ideal y una columna real para pequeñas deflexiones elásticas unitarias Δ/L (Edward F. Byars, 1978).

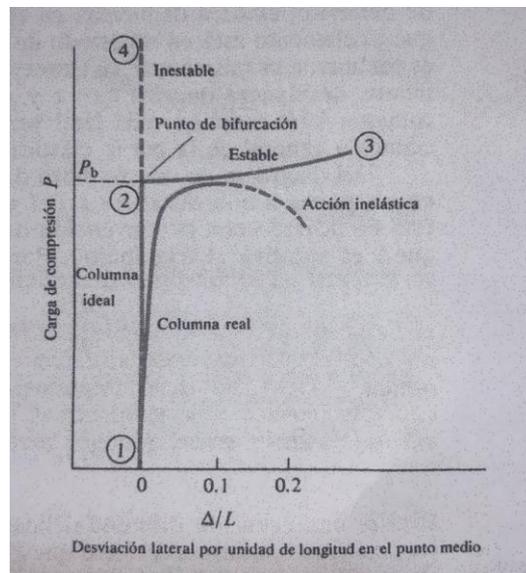


Figura 1. 19 Pandeo Elástico

Fuente: Edward F. Byars, 1978.

Las ecuaciones de estudio para el pandeo inelástico son las siguientes:

$$P = \frac{\pi^2 E (Ar^2)}{L^2} = \frac{\pi^2 EA}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

Donde a es el área transversal de la columna y r su radio de giro con respecto a los ejes de flexión o pandeo.

La ecuación solo es aplicable cuando E es constante, esto es, cuando la carga de pandeo P cauda un esfuerzo axial por debajo del límite de proporcionalidad al comienzo del pandeo. La carga de pandeo por unidad de áreas P/a , depende de la rigidez E del material y de las dimensiones L y r . La relación L/r se define como la relación esbeltez de la columna (Edward F. Byars, 1978).

Se comprenderá entonces que una relación de esbeltez mayor que 200 es para elementos tan delgados, que serán de muy poco uso como miembros estructurales para soportar cargas (Edward F. Byars, 1978).

Elementos con relaciones de esbeltez menores que aproximadamente 30, son tan robustos que tienen poca o ninguna tendencia a pandearse y no se consideran como columnas (Edward F. Byars, 1978).

El AISC considera que el límite superior del pandeo elástico queda definido por un esfuerzo promedio igual al 50% del límite de fluencia (McCormac, 1971).

1.3 Ecuación de Euler

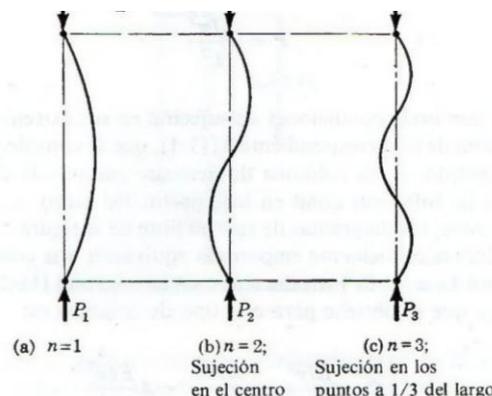


Figura 1. 20 Efecto de n en el valor de la carga crítica.

Fuente: Singer, 2008.

De estas posibles soluciones, la más importante es la (a). Las otras soluciones ocurren para cargas mayores, pero sólo son posibles físicamente si la columna tiene sujeciones laterales en el punto medio o en los tercios del largo, que la obliguen a tomar precisamente esta forma. La carga crítica para la columna articulada en sus extremos, es:

$$P = \frac{EI\pi^2}{L^2}$$

De donde:

P = carga crítica (MPa).

E = módulo de elasticidad (MPa).

I = momento de inercia

L = longitud de la viga (cm) (Singer, 2008).

1.4 Esfuerzo Crítico

El esfuerzo es un medio conveniente para definir el límite de validez de la ecuación de Euler, es útil expresar la ecuación en términos del esfuerzo, en lugar de términos de la carga (Singer, 2008).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad \text{Fórmula de Euler}$$

$$I = Ar^2$$

De donde,

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Sustituimos la carga crítica en la ecuación de esfuerzo crítico.

De donde,

$$\sigma_{cr} = \frac{E\pi^2 r^2}{L^2}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{E\pi^2}{\frac{L^2}{r^2}}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{E\pi^2}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{E\pi^2}{\lambda^2}$$

En donde,

A = área de la sección transversal (cm).

r = radio de giro (cm).

E = módulo de elasticidad (MPa).

λ = relación de esbeltez de la columna, donde L = longitud de la viga y r = radio de giro.

σ_{cr} = esfuerzo crítico en la columna (MPa) (Singer, 2008).

Esta ecuación muestra que el esfuerzo crítico es proporcional al módulo de elasticidad del material e inversamente proporcional al cuadrado de la relación de esbeltez de la columna (Singer, 2008).

1.5 Limitaciones de la Fórmula de Euler

Una columna tiende a pandearse siempre en la dirección en la cual es más flexible. Como la resistencia a la flexión varía en el momento de inercia, el valor de I en la fórmula de Euler es siempre el menor momento de inercia de la sección recta. La tendencia al pandeo tiene lugar, pues, con respecto al eje principal de momento de inercia mínimo de la sección recta (Singer, 2008).

La fórmula de Euler también demuestra que la carga crítica que puede producir el pandeo no depende de la resistencia del material, sino de sus dimensiones y del módulo elástico. Por este motivo, dos barras de idénticas dimensiones, una de acero de alta resistencia y otra de acero suave, se pandearán bajo la misma carga crítica, ya que aunque sus resistencias son muy diferentes tienen prácticamente el mismo módulo elástico. Así, para aumentar la resistencia al pandeo, interesa aumentar lo más posible el momento de inercia

de la sección. Para un área dada, el material debe distribuirse tan lejos como sea posible del centro de gravedad y de tal manera que los momentos de inercia con respecto a los ejes principales sean iguales, o lo más parecidos posible (Singer, 2008).

Para que la fórmula de Euler sea aplicable, el esfuerzo que se produzca en el pandeo no debe exceder al límite de proporcionalidad. Para determinar este esfuerzo, se sustituye en

la fórmula el momento de inercia $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$, donde A es el área de la sección recta y r el

radio de giro mínimo. Para el caso fundamental se tiene:

$$\frac{P}{A} = \frac{E\pi^2}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

Para otros casos, se pondría en lugar de L la longitud efectiva de pandeo de la tabla de la sección anterior (Singer, 2008).

El valor P/A es el esfuerzo medio en la columna cargada con su carga crítica, y se llama esfuerzo crítico. Su límite superior es el esfuerzo en el límite de proporcionalidad. La relación L/r se llama esbeltez mecánica, o simplemente esbeltez, de la columna. Como una columna cargada axialmente tiende a pandearse respecto del eje I mínimo, para hallar la esbeltez de una columna se divide la longitud equivalente o efectiva entre el radio de giro mínimo de la sección recta (Singer, 2008).

Por conveniencia, se definen como columnas largas o muy esbeltas aquellas a las que se puede aplicar la fórmula de Euler. La esbeltez mínima, que fija el límite inferior de aplicación de la fórmula de Euler, se obtiene sustituyendo en la ecuación los valores conocidos del límite de proporcionalidad y del módulo elástico de cada material. Así, pues, el límite mínimo de la esbeltez varía con el material y también con los diferentes tipos dentro de cada material (Singer, 2008).

1.5.1 Ecuación de Euler

Como ejemplo, para un acero que tenga un límite de proporcionalidad de 200 MPa, como $E = 200$ GPa, el límite mínimo de la esbeltez mecánica con el que puede aplicarse la fórmula de Euler es:

$$\left(\frac{L}{r}\right)^2 = \frac{E\pi^2}{\sigma Prop.}$$

$$(L/r)^2 = \frac{(200 \times 10^9)\pi^2}{200 \times 10^6} \approx 10\,000 \text{ o sea, } \frac{L}{r} \approx 100$$

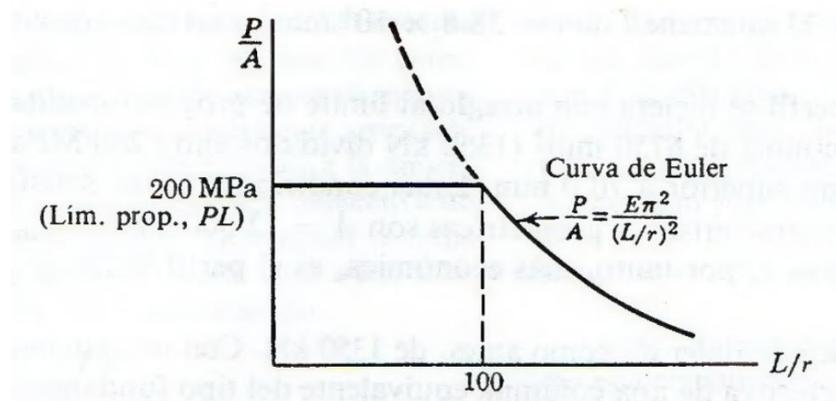


Figura 1. 21 El esfuerzo crítico o admisible es el representado por la línea continua. La parte punteada de la curva de Euler no es aplicable.

Fuente: Singer, 2008.

Por debajo de este valor, como se indica en la figura 1.21, en la parte punteada de la curva de Euler el esfuerzo que daría la carga de Euler excedería al límite de proporcionalidad, por lo que para $L/r < 100$ la fórmula de Euler no es aplicable, y hay que considerar como esfuerzo crítico el límite de proporcionalidad. La curva muestra también que el esfuerzo crítico en una columna disminuye rápidamente cuando aumenta la esbeltez, por lo que, al proyectar una pieza de este tipo, conviene que la esbeltez sea la menor posible (Singer, 2008).

Finalmente, se debe observar que la fórmula de Euler da la carga crítica y no la carga de trabajo. Por ello es preciso dividir la carga crítica entre el correspondiente factor de seguridad, que suele ser de 2 a 3 según el material y las circunstancias, para obtener el valor de la carga admisible (Singer, 2008).

1.5.2 Ecuaciones de AISC (American Institute of Steel Costruction)

El AISC (American Institute of Steel Construction) define el límite entre columnas intermedias y largas como el valor de la relación de esbeltez C_c dado por:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma P_c}}$$

donde E es el módulo de elasticidad (200 GPa para la mayoría de los tipos de acero) y σ_{Pc} es el esfuerzo en el punto de cedencia para el tipo particular de acero empleado (Singer, 2008).

1.5.2.1 Relación de Esbeltez

El AISC considera que el límite superior del pandeo elástico queda definido por un esfuerzo promedio igual al 50% del límite de fluencia (McCormac, 1971).

Para columnas de longitud efectiva L_e y radio de giro mínimo r , el AISC especifica que para $L_e/r > C_c$, el esfuerzo de trabajo, σ_T , está dado por:

$$\sigma_T = \left[1 - \frac{\left(\frac{L_e}{r}\right)^2}{2C^2c} \right] \frac{\sigma_{Pc}}{FS}$$

donde el factor de seguridad, FS , está dado por:

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3\left(\frac{L_e}{r}\right)}{8C_c} - \frac{\left(\frac{L_e}{r}\right)^3}{8C^3c}$$

Obsérvese que el factor de seguridad es 1.92 cuando $L_e/r = C_c$ y disminuye al aumentar la relación de esbeltez.

Para $L_e/r < C_c$, el AISC especifica la fórmula parabólica.

$$\frac{P}{A} = \sigma - C \left(\frac{L_e}{r}\right)^2$$

En la que σ es el esfuerzo en el punto de cedencia y C una constante elegida de forma que la parábola sea tangente a la curva de Euler (McCormac, 1971).

Las expresiones del AISC fueron desarrolladas con el fin de introducir toda la información disponible de las últimas investigaciones, correspondiente al comportamiento de columnas de acero, mismas que se aplicarán como un aproximado para el caso del Polietileno de Tereftalato (PET) (McCormac, 1971).

Los diseños de columnas mediante otras fórmulas, dan miembros notablemente sobrados en la zona de bajo valor de l/r , pero las fórmulas AISC dan diseños razonablemente económicos para todos los valores de l/r (McCormac, 1971).

Las fórmulas de línea recta se pueden idear para que den valores que se acerquen a los resultados de las pruebas, para valores de l/r comprendidos de 50 a 120 (McCormac, 1971).

Otro grupo de fórmulas para columnas bastante sencillas son las fórmulas parabólicas y representan los resultados experimentales en forma bastante buena para columnas cuya esbeltez varía de 0 a 130 ó 140. Estas expresiones parabólicas también son aplicables para columnas axialmente cargadas de acero A36 y con valores l/r que no excedan de 130 (McCormac, 1971).

La expresión de Gordon – Rankine es una fórmula que cuenta con una base teórica clara y da resultados razonablemente cercanos, de acuerdo con las pruebas actuales, para valores de l/r entre 120 y 200 (McCormac, 1971).

1.6 Propiedades del Polietileno de Tereftalato (PET)

Los estudios acerca de las propiedades de los plásticos llegaron a su punto máximo en el año 1953 cuando el químico alemán Karl Ziegler realizó una exhaustiva investigación acerca del polietileno y a su vez su homólogo Giulio Natta desarrolló en 1954 el polipropileno, estos dos tipos de plásticos son los más utilizados en la presente década, en 1963 Karl Ziegler y Giulio Natta compartieron el Premio Nobel de Química por sus estudios y avances en el campo de los polímeros (Fruntdt, 1989).

En la actualidad el plástico que más se utiliza en el embotellamiento, envasado y en distintos materiales es el PET (Polietileno de Tereftalato) que ha suplantado al vidrio y al PVC en el mercado de plásticos para envases (Richardson, 1999).

Existen polímeros termoplásticos que contienen una cadena de constitución mezclada y son comúnmente llamados heteropolímeros como el caso de óxidos, sulfonas y similares, este es el caso del Polietileno de Tereftalato (PET) (Richardson, 1999).

Es el más comúnmente utilizado, está constituido por ácido tereftálico y etilenglicol, mediante un proceso de policondensación pueden obtenerse dos tipos de polímero, de grado textil y grado botella, posee características que lo vuelven transparente, irrompible, liviano, además de evitar el paso de gases (Richardson, 1999).

1.6.1 Codificación del Polietileno de Tereftalato (PET)

En la actualidad se ocupan polímeros termoplásticos o termoestables para diferentes aplicaciones, estos pueden modificar sus propiedades dependiendo del aditivo que se le agregue lo cual da un resultado de más de 100 tipos diferentes de polímeros, es por eso que según el sistema de identificación de plásticos (SPI) el Polietileno de Tereftalato se identifica de la siguiente manera:



Figura 1. 22 Codificación del Polietileno de Tereftalato (PET).

Fuente: Sistema de Identificación Americano, 2008.

Es un polímero termoplástico cuya aplicación se centra en el envase de una gran variedad de líquidos ya sean de consumo o uso humano tales como gaseosas, cervezas, productos lácteos, aceites de vehículos. También es utilizado para fabricar herramientas como cascos de seguridad, tuberías, redes, lonas, etc. Debido a sus características el polietileno de alta densidad puede ser usado en áreas como alcantarillado, minería, materiales eléctricos y electrónicos. Tan solo se recicla el 27% del polietileno producido (Fruendt, 1989).

El Polietileno de Tereftalato (PET) es un tipo de polímero termoplástico de alta calidad creado en la década de 1950 y utilizado para la fabricación de envases transparentes y resistentes desde 1970, es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, específicamente del etileno y paraxileno, que fue descubierto en 1941 por los científicos británicos Whinfield y Dickson (Bercero, 1997).

En la actualidad la producción, fabricación y manufacturación de Polietileno de Tereftalato (PET) se ha expandido y evolucionado a nivel tecnológico logrando colocarse en el primer puesto de los polímeros más utilizados en el mundo, las grandes industrias dedican un gran esfuerzo al perfeccionamiento de maquinaria utilizada en la transformación de estos polímeros, el PET también se ha convertido en uno de los plásticos más reciclados del mundo debido principalmente a su fácil proceso de reciclado

que le permite ser transformado, modelado y utilizado en diferentes aplicaciones (Bercero, 1997).

1.6.2 Características Principales

Se pueden distinguir diversas propiedades y características que hacen del Polietileno de Tereftalato (PET) un material óptimo para casi cualquier aplicación, pero principalmente podemos mencionar que el PET está caracterizado por poseer un peso tan ligero pero al mismo tiempo conservar una resistencia mecánica y una resistencia al impacto muy elevadas, visualmente el PET es transparente en condiciones óptimas, además de poseer también un brillo, su característica más notable es su alto grado de reciclabilidad que permite obtener un plástico de alta calidad mediante los debidos procesos de reciclaje (Villafuerte, 2011).

Entre sus propiedades más destacadas se encuentran:

- ✓ Posee diferentes formas de producción; por soplado, extrusión, inyección.
- ✓ Es una confiable barrera ante los gases externos.
- ✓ Brillo y transparencia.
- ✓ Alto grado de reciclabilidad.
- ✓ Posee muy buenas propiedades mecánicas y químicas (Villafuerte, 2011).

En definitiva, son muchas las ventajas que el Polietileno de Tereftalato (PET) ofrece a diferentes industrias para distintos campos de aplicación, algunas de estas son únicas como su transparencia y termoformabilidad, algunas otras de carácter económico como su costo el cual no ha recibido fluctuaciones en exceso puesto a que al igual que otros polímeros conservan su mismo precio de hace cinco años. Geográficamente el PET puede ser encontrado, procesado, utilizado en distintas regiones como América, Europa, Asia y Sudáfrica (Villafuerte, 2011).

Pero el Polietileno de Tereftalato también posee desventajas que se deben considerar en menor medida, las cuales pueden ser:

- ✓ Secado: Ya sea reciclado o producido de cero, el Polietileno de Tereftalato (PET) debe atravesar un proceso de secado debido a que es un material higroscópico, lo cual le permite absorber la humedad del entorno, de lo contrario se pueden presentar defectos en sus propiedades mecánicas (Villafuerte, 2011).

- ✓ **Temperatura:** El Polietileno de Tereftalato (PET) a pesar de tener una buena resistencia térmica que es capaz de resistir temperaturas superiores a los 230°C no comparte esta propiedad con muchos otros polímeros a los que tienen que añadirse aditivos o aplicar diferentes tipos de termoformado (Villafuerte, 2011).
- ✓ **Costo:** Los precios en los que se encuentran los polímeros y en especial el Polietileno de Tereftalato (PET) no ha sufrido mayores cambios y siguen siendo económicamente rentables, pero en cambio la maquinaria que se utiliza para su producción mediante inyección o soplado han incrementado su costo haciéndolos difícilmente reemplazables o adquiribles (Villafuerte, 2011).
- ✓ **Condiciones Atmosféricas:** Ante la intemperie y bajo condiciones naturales, una gran cantidad de polímeros y en especial el Polietileno de Tereftalato (PET) tienden a amarillarse por efecto de la humedad y los rayos ultravioleta, además de perder otras propiedades (Villafuerte, 2011).

Cabe destacar algunas características y datos técnicos que se han obtenido a través de los años mediante diferentes experimentos para tener un conocimiento técnico sobre este polímero:

- ✓ **Datos Técnicos:**

Tabla 1. 2 Datos Técnicos del Polietileno de Tereftalato (PET).

CARACTERÍSTICAS	
Densidad	1,3 g/cm ³ .
Inflamabilidad	Nula
Resistencia UV	Moderada
Punto de Fusión	260°C - 270°C
Dureza	101 Mohs
Coefficiente de Fricción	0,2 - 0,4
Resistencia a la Tracción	160 MPa - 190 MPa
Módulo de Elasticidad	3000 MPa

Fuente: Frundt, 1989.

1.6.3 ¿Cómo se obtiene el Polietileno de Tereftalato (PET)?

El proceso de producción del Polietileno de Tereftalato se deriva en la combinación de una resina poliéster de etilenglicol y un ácido tereftalático, el PET como tal es un polímero termoplástico con características definidas como su transparencia y utilidad en el embasamiento de alimentos (Villafuerte, 2011).

Además, el Polietileno de Tereftalato (PET) también puede ser producido si se utiliza un dimetil tereftalato en lugar del ácido mencionado, de igual manera estos se polimerizan junto con el etilenglicol y según los aditivos que se utilicen se puede obtener distintas variaciones de PET (Villafuerte, 2011).

El PET atraviesa distintas etapas para su producción desde que se extrae el paraxileno del petróleo crudo para obtener un ácido tereftalático mediante oxidación, la producción del etilenglicol a partir de los derivados que se obtienen del gas natural y hasta las fases finales de “pelletización” en donde se funden las cadenas monoméricas deseadas para este polímero mediante la utilización de extrusoras (Villafuerte, 2011).

✓ Proceso de Polimerización

Esta es la primera etapa que se ejecuta para la obtención de Polietileno de Tereftalato (PET), se parte desde dos compuestos que son un ácido tereftalático obtenido del petróleo o un dimetil tereftalato y un etilenglicol que se extrae del gas natural. El proceso es sumamente complejo, pero se resume a la reacción por esterificación del etilenglicol con el ácido tereftalático o el dimetil tereftalato, de esta reacción se crea un monómero llamado Bis – Beta - hidroxietil-tereftalato, sucesivamente este monómero entra a una fase de policondensación en donde se polimeriza para obtener polietileno de tereftalato (Villafuerte, 2011).

Este proceso resulta muy difícil de explicar debido a las numerosas reacciones químicas que se producen, sin embargo, se puede recalcar que en el proceso de esterificación se tiene como objetivo la eliminación de agua del ácido y metanol del dimetil, en el proceso de policondensación se trabaja en temperaturas iguales o superiores a los 270° centígrados y mediante la adición de catalizadores se puede agilizar este proceso. De la misma manera el etilenglicol se elimina a través de un proceso de vacío aplicado en la autoclave, el glicol restante se reutiliza en un nuevo proceso de fabricación cíclico (Villafuerte, 2011).

Una vez en la autoclave, cuando la mezcla de este polímero alcanza una viscosidad normal o la deseada, es necesario la introducción de nitrógeno al detenerse la reacción pues así se evita un proceso de oxidación del polímero. El polímero mezclado en estado viscoso debe ser procesado a través de maquinaria que ejerce una presión mínima por efecto del nitrógeno presenta en la mezcla y excreta el polímero en forma de fibra o hilo, su enfriamiento consolida el estado sólido del polímero, después de esto y mediante un

proceso de corte, el polímero se granula, tamiza y examina; de esta manera se constata que cumpla con sus características propias en esta etapa como su viscosidad, su estado amorfo y su peso molecular adecuado, una vez concluido esto, el polímero es enviado a su acopio para su siguiente etapa de uso o aplicación (Villafuerte, 2011).

✓ Proceso de Cristalización

Los procesos de cristalización que atraviesa los polímeros son menos complejos debido a que son de carácter térmico, es decir el polímero se debe tratar a temperaturas que oscilan entre los 130° – 160° centígrados en períodos de tiempo entra 10 minutos a 1 hora dependiendo del tipo de tratamiento térmico que se reciba pues puede ser agitado mecánicamente o mediante un efecto de fluidez continua, esto se hace con el fin de que no se estorben entre sí y el calor se distribuya uniformemente entre todos los granos de Polietileno de Tereftalato (PET) (Villafuerte, 2011).

Químicamente este proceso de tratamiento térmico tiene como finalidad el cambio de la estructura semicristalina del polímero debido a que, después de su policondensación, el polímero presenta una disposición espacial en la que las macromoléculas están desordenadas lo cual confiere una estructura amorfa transparente y mediante un fenómeno físico producido por la acción térmica se obtiene una distribución macromolecular uniforme desordenada que posee características semicristalinas, opacidad y un color blanco lechoso que son propias del PET, de igual manera su densidad cambian con respecto a su estructura, es decir, en su estado amorfo teniendo 1.33 g/cm³ pasa a tener 1.4 g/cm³ en su estado cristalino (Villafuerte, 2011).

✓ Proceso de Polimerización en Estado Sólido o Post Polimerización

En este proceso se ultiman las características del polímero, al haber atravesado las dos anteriores fases, el PET en forma de un grano cristalizado es introducido a un sistema cilíndrico en el cual permanece por tiempos prolongados y en el cual también es sometido a un flujo de nitrógeno a una temperatura por encima de los 200°C (Villafuerte, 2011).

El objetivo de este proceso es el de crear una reacción de posterior a la polimeración de la primera etapa para lograr dos objetivos tales como la eliminación de acetaldehídos producidos en la primera etapa y aumentar los índices de viscosidad mediante el aumento del peso molecular y elevarlas al grado de aplicación que se necesite, ya sea de grado botella como de grado ingenieril. (Villafuerte, 2011).

1.6.4 Polietileno de Tereftalato (PET) Grado Botella

Para que el Polietileno de Tereftalato sea de grado para botella primero sufre un tratamiento previo mediante una serie de procesos que facilitan la transformación y el cambio en su estructura, tales procesos son:

- ✓ Secado: EL PET, en estado de grano semicristalino, es depositado en tolvas de secado que cuentan con un sistema de calefacción que las mantienen en un flujo constante que supera los 150°C por unas aproximadas 4 horas, mediante este proceso se elimina la humedad relativa que un material higroscópico como el PET adquiere del ambiente en el que se encuentre (Rodríguez J. H., 2010)
- ✓ Deshumificación: No es un proceso que afecte directamente al PET, es un proceso secundario de gran importancia debido a que elimina la humedad que se encuentra contenido en el aire, al salir de este proceso de deshumificación, el aire seco ingresa en las tolvas de secado, es necesario la deshumificación del aire debido a que así se evitan condensaciones que afecten la transformación del PET (Rodríguez J. H., 2010).
- ✓ Cristalización: Este proceso es realizado mediante un cristizador que eleva la temperatura del PET por encima de los 100°C agitándolo durante el proceso y de esta manera lo dejará listo para ingresar a las extrusoras de termoformado y convertirse en botellas, cuando el PET ya ha sido extrusionado o utilizado es necesario que sea triturado y vuelva a ingresar en las tolvas de secado (Rodríguez J. H., 2010).

Después de estas tres etapas de preparación, los gránulos de PET están listos para su siguiente proceso de formación, para esto existen diferentes maneras de producir botellas de polietileno, pero dos de las más utilizadas son los Sistemas de Inyección y posterior Soplado y el Sistema de Extrusión y posterior Soplado.

✓ Sistema de Inyección – Soplado

Es uno de los conjuntos de procesos para producción de botellas de PET más utilizados en la industria de los polímeros y básicamente está compuesto por tres etapas que son: inyección, estirado y soplado. Los granos de PET se secan previamente para entrar a un proceso de polimerización en el cual se funden y se inyectan mediante presión a moldes denominados “preformas”, estos no son más que polímeros en forma de tubos a los cuales se les añade una rosca, posterior a esto son enfriadas para luego ser nuevamente calentadas gradualmente en donde mediante la inyección de aire a presión de 40 Kg/cm²

son sopladas e infladas hasta adquirir la forma del molde que se desee (Rodríguez J. H., 2010).

Mediante este sistema de inyección, estirado y soplado se logra obtener y verificar una característica importante del PET, se denomina biorientación y proporciona una resistencia mecánica del polímero y también consigue que las macromoléculas del polímero se distribuyan o estructuren en forma de una red longitudinalmente y paralelamente al eje del molde (Rodríguez J. H., 2010).

✓ Sistema de Extrusión – Soplado

Este sistema de formación es el tradicionalmente utilizado desde hace décadas en la producción de botellas de PET, durante este tiempo ha sido modificado y renovado, pero conserva el mismo principio básico.

Los granos de Polietileno de Tereftalato después de ser procesados en una tolva de secado ingresan a una extrusora en donde un tornillo mecánico que cuenta con una elevada temperatura lo extrusiona en una prensa y lo acumula para después en un solo paso ingresarlo al molde, darle forma y mediante una expulsión ligera permitir el soplado del material polimérico que genera el envase en menos etapas que el sistema de inyección debido a que en este proceso no se necesita producir una “preforma” para dar lugar a un envase (Rodríguez J. H., 2010).

1.6.5 Reciclaje del Polietileno de Tereftalato (PET)

El reciclado de PET es un proceso de reutilización en el cual el material es reacondicionado con el fin de obtener una materia prima que sea nuevamente útil para la producción, estos procesos de reciclaje son parte fundamental en la industria de los polímeros debido a que la mayoría de ellos provienen del petróleo, el cual es un material no renovable (López C. , 2016).

La finalidad del reciclaje de plásticos es el obtener una materia prima que de origen a un nuevo producto el cual contenga las mismas o mejores condiciones sin un exceso de aditivos que un material virgen, para esto los polímeros pueden tener diferentes tipos de reciclaje dependiendo de lo que se necesite obtener o de la finalidad que le den al material (López C. , 2016).

1.6.6 Tipos de Reciclaje

El reciclaje de polímeros es una tarea complicada pues intervienen muchos factores, siendo el más importante el consumo irresponsable, esto se debe a que las industrias que se encargan de producirlo, utilizarlo y comercializarlo muchas veces no tienen un criterio medio ambiental responsable pues no aúpan sus esfuerzos en crear o producir materias primas o productos que tengan un cierto grado de materiales reciclados en su composición, la responsabilidad también recae en el consumidor o las industrias consumidoras debido a que menosprecian los productos reciclados al considerarlos inferiores lo cual es falso pues se mantienen rigurosamente las propiedades mecánicas, térmicas y de diseño al igual que en los materiales vírgenes (López C. , 2016).

Los plásticos se pueden reciclar y reutilizar después de un conjunto de procesos mecánicos o químicos que permitan acondicionarlos nuevamente obteniendo sus mismas propiedades, de esta manera se reduce considerablemente la cantidad de residuos plásticos que se producen a diario, los rellenos sanitarios no se saturan con rapidez debido a que los polímeros ocupan más espacio de lo que pesan, además se ahorran recursos naturales no renovables evitando así más contaminación (López C. , 2016).

Según su método de reciclaje, los plásticos pueden clasificarse de muchas maneras, pero las más importantes son el reciclado químico y mecánico pues ambos buscan plenamente la reutilización (López C. , 2016).

✓ Reciclado Mecánico

El reciclado mecánico es una de las formas de reciclaje más utilizadas en la actualidad debido a su eficacia y a su rentabilidad, esta forma de reciclaje no es más que la transformación de los desechos plásticos en un tipo de granulo plástico que puede ser reutilizado como materia prima de otros productos. Cabe recalcar que este tipo de procesos es más eficiente si se reciclan solo un tipo de plástico específico a la vez y como obligación deben ser polímeros termoplásticos, pues solo ellos pueden ser fusionados, extruidos y moldeados de nuevo (Gorka, 2009).

El reciclado mecánico consta de diferentes etapas para producir materiales reciclados, estas son las principales:

- Acopio: El acopio es la primera y quizás la más importante de las etapas que transcurren los plásticos para su reciclaje pues no depende estrictamente de aquellos

que operan una fábrica de reciclaje, depende de la conciencia de reciclaje del consumidor y de personas intermediarias que se encargan en clasificar los materiales en los basureros o recorriendo calles (Gorka, 2009).

- **Limpieza y Clasificación:** Al llegar de los centros de acopio, los plásticos generalmente se encuentran sucios por su periodo en la intemperie, esto se corrige mediante una limpieza de los plásticos que remueva polvo, papeles, aceites, pegamentos y cualquier tipo de material extraño que contamine al plástico. Este proceso también puede ser mecanizado mediante la intervención de hidrociclones que dentro de su sistema hacen flotar a los plásticos lo cual permite que los contaminantes se depositen en acumuladores, en ningún momento de este proceso, ya sea manual o mecánico, es recomendable utilizar detergentes o limpiadores debido a que se utilizarían grandes cantidades que no se podrían devolver a su cauce esperando su disolución, tampoco convendría un sistema de purificación por su costo así que se desaconseja su uso (Gorka, 2009).
- La clasificación de los plásticos también es una fase muy estricta del reciclaje pues es necesario diferenciar y separar el tipo de plástico que se va a reciclar de otro tipo de componentes o plásticos, esto se vuelve indispensable debido a que otros materiales diferentes al principal pueden afectar las propiedades de la materia prima uniforme producida al ser inmiscibles o incompatibles. Existen diferentes formas de clasificar los plásticos ya sea de forma manual, en la que la mano de obra selecciona y separa los materiales por su transparencia y por propiedades ópticas, y también existen formas mecánicas que pueden basarse en el peso, densidad o gravedad específica (Gorka, 2009).
- **Trituración:** El proceso de molienda o trituración de plásticos tiene como objetivo moler y triturar el plástico para la reducción de su tamaño, esto facilita los siguientes procesos de reciclaje, la trituración de los plásticos dependerá exclusivamente del tamaño de partícula que se desee obtener pues puede variar desde hojuelas de 1 pulgada hasta llegar a polvo de plástico, este proceso relativamente es afectado por el tamaño debido a que si se busca uniformidad en el producto triturado se disminuirá la eficiencia del molino, mientras que si se trituran grandes cantidades pues se tendrá tamaño mayores no uniformes pero con evidencia absoluta (Gorka, 2009).

- Lavado y Secado: Una vez finalizada esta etapa, el material aun poseerá contaminantes iniciales o adquiridos durante la molienda, deben ser removidos mediante un lavado o más dependiendo del tipo de contaminante (Gorka, 2009).
- Posteriormente, las hojuelas de plástico son introducidas a maquinas secadoras de acción centrifuga que extraen los remanentes de humedad por medio de las paredes del equipo, también se pueden utilizar secadoras de aire frio o caliente que circulen por el material. En algunos casos en donde se necesite que el material este completamente seco se pueden utilizar máquinas de secado térmicas que pueden accionarse desde los 100°C hasta los 180°C (Gorka, 2009).
- Extrusión: Llegado a la etapa final, el PET, clasificado, triturado, lavado y secado se dispone para ingresar en una extrusora, que mediante a un tornillo mecánico caliente, funde y homogeniza al plástico para ser termoformado mediante un sistema de fusión, bombeo y presurización que moldea el plástico en forma de hilo el cual es cortado en un granulador mecánico para dar origen a un grano de “pellet” (Gorka, 2009).

Estas son las etapas para un correcto reciclado mecánico, a partir de eso, el material granulado está en perfectas condiciones para ser extruido o inyectado en nuevas piezas que se quiera producir (Gorka, 2009).

✓ Reciclado Químico

Los procesos del reciclaje químico tienen como objetivo el tratamiento de los residuos plásticos por medio de la aplicación de reacciones de polimerización, gasificación y refinación con el fin de romper las moléculas del polímero y así dar origen a nueva materia prima que sirva para la producción de nuevos materiales (Gorka, 2009).

El reciclaje químico fue impulsado por las empresas e industrias petroquímicas con el afán de optimizar sus recursos recuperando parte de ellos mediante el reciclaje de plásticos, con el pasar del tiempo se han desarrollado nuevos métodos que evitan el amplio trabajo de clasificación de polímeros y de igual manera se reproducen materiales de muy buenas características (Gorka, 2009).

En la actualidad se está trabajando en desarrollar métodos que permitan la separación de los componentes básicos de cualquier polímero, así como su el ahorro de gas y petróleo. En la industria del reciclaje químico, los métodos mayormente utilizados son:

- Hidrogenación.

- Gasificación.
- Pirólisis.
- Metanólisis.

Los métodos antes mencionados son los más usados en la actualidad (Gorka, 2009).

1.7 Agregados de la Construcción

En los agregados de la construcción es necesario conocer los aspectos básicos acerca de los suelos, sus características, clasificación y granulometría (M. Casanova, 2004).

1.7.1 Granulometría de los Suelos

Los agregados que componen los suelos son granos de diferente forma y tamaño que pueden ser del tamaño de la mano hasta aquellos que son visibles solamente por medio de un microscopio, la granulometría es un proceso de clasificación y distribución según el tamaño de los granos de un material y sirva principalmente para analizar las propiedades mecánicas de los agregados que se utilicen en construcciones civiles (M. Casanova, 2004).

Cuando se habla de granulometría se puede conceptualizar como un procedimiento ya sea manual o mecánico que tenga como fin la separación o clasificación según el tamaño de partícula de un material, es decir, la medición o gradación de los granos que componen un suelo específico mediante el cual se pueda analizar su composición, origen y propiedades mecánicas y geológicas por medio de una escala de clasificación definida, además de esto, se estudia la proporción en la que un tamaño de partícula se presenta en un material (M. Casanova, 2004).

La importancia del estudio granulométrico radica en la clasificación de los materiales según su tamaño de grano, pero además esto permite una clasificación según el sistema de dispersión que posea el material, por lo general los suelos están constituidos por sistemas de material disperso pues sus granos son de diferente tamaño y forma, estos sistemas se encuentran finamente divididos, aunque actúan de manera distinta en conjunto que en solitario. Estos sistemas pueden presentar de tres maneras que son:

- ✓ Sistemas Granulares: Estos sistemas por lo general presentan distribuciones de tamaño de partícula en torno a los 2 mm. y 0.044 mm.

- ✓ **Sistemas en Polvo:** Los sistemas en polvo se componen de finas partículas que se encuentran entre los 44 micrómetros y los 0.24 micrómetros aproximadamente.
- ✓ **Sistemas Coloidales:** Son solo visibles plenamente mediante un microscopio debido a que su tamaño de partícula oscila entre las centenas y decenas de nanómetros (M. Casanova, 2004).

La mayoría de los agregados que la industria ocupa para la producción de materiales son sistemas dispersos como la arena y grava, la clasificación de los sistemas según el tamaño de su grano es compleja dependiendo de cuanto más disminuya el tamaño de la partícula y cuanto más se desee clasificar los granos (M. Casanova, 2004).

1.7.2 Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico o de granulometría es el conjunto de procesos mediante los cuales se logra la determinación de los tamaños que compone 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 (M. Casanova, 2004).

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 de forma gráfica, mediante graficas de curvatura conocida como “Curva Granulométrica” (M. Casanova, 2004).

1.7.3 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 (M. Casanova, 2004).

Un tamiz es un instrumento metálico por el cual se separa 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 (M. Casanova, 2004).

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

Tabla 1. 3 Tamaños 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: Sistema de Clasificación Internacional de Suelos, 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 (M. Casanova, 2004).

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 a 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 (M. Casanova, 2004).

1.7.4 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 (M. Casanova, 2004).

La grafica 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 (M. Casanova, 2004).

Las representaciones graficas 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.
- ✓ Coeficiente de Uniformidad: Es la relación entre el diámetro correspondiente al 60% y el diámetro efectivo de la curva granulométrica.
- ✓ Coeficiente 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 (M. Casanova, 2004).

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 (M. Casanova, 2004).

1.7.5 Suelos

La capa que compone la superficie terrestre es denominada suelo y está en constante cambio debido a diferentes fenómenos atmosféricos. El suelo está compuesto por materiales orgánicos y minerales (López A. J., 2010).

Los suelos se originan a través de la acumulación de material meteorizado por medio del arrastre de los mismos de una zona a otra, este material es separado de la roca madre, durante este proceso se diferencian las capas que el suelo posee con diferentes espesores, esto depende de varios factores como la intensidad de los factores atmosféricos que intervienen, la resistencia del suelo y el tiempo que dure el proceso (López A. J., 2010).

Para la formación de los suelos es necesario que exista un proceso de meteorización mediante el cual se desintegre y descomponga el manto rocoso, este proceso puede ser diverso dependiendo de su origen, este origen puede ser físico, si es mediante la desintegración mecánica de la forma y tamaño del material por acción de la gravedad, viento, agua o temperatura, puede además ser un proceso químico, cuando se descomponen los materiales que constituyen el suelo en sustancias más simples mediante procesos de oxidación o reducción, carbonatación, disolución o hidrólisis, además, este proceso de meteorización puede ser también biológico por la interacción de seres vivos como hongos que viven en las superficies de los suelos o plantas que crecen en la superficie (López A. J., 2010).

1.7.6 Clasificación de los Suelos

Los sistemas de clasificación de los suelos son diversos pero el más utilizado en los ensayos y análisis es según su composición granulométrica de la fracción inorgánica que se encuentra en el suelo como granos rocosos y minerales. Las características de los suelos y su clasificación dependen del tamaño de partícula y reciben la misma nomenclatura en casi todas las clasificaciones internacionales variando únicamente los tamaños permisibles de una partícula para ser considerada en términos de grava, arena, limo o arcilla (López A. J., 2010).

La clasificación por su composición granulométrica o clase textural son tres fracciones bien definidas que están presentes en distintas proporciones, el porcentaje en el cual estas

facciones estén presentes en un suelo es denominado textura de suelo. Los suelos pueden estar conformados y ser clasificados mediante su tamaño y así se puede separar en:

- ✓ Gravas y Piedras: Son generalmente partículas minerales sólidas cuyo diámetro se establece entre 2 cm. y 7 cm., llegando a ser incluso mayor en el caso de piedras, si predominan en un suelo podría provocar un mal manejo, comportamiento y resistencias características.
- ✓ Tierra Fina: La tierra fina se compone por partículas menores a 2 mm. de diámetro que puede a su vez subdividirse en arena, limo y arcilla (López A. J., 2010).
 - Arena: Son granos minerales en estado sólido cuyo tamaño oscila entre los 2 y 0.02 mm., la arena es el componente más predominante de los suelos y está compuesta principalmente por cuarzo meteorizado, feldespatos y micas. Son visibles y palpables, además, no poseen una capacidad de agregación por lo que siempre se encuentra de manera individual y su principal función es componer la matriz de los suelos. Mediante una determinación por tacto se puede definir como un material que no se adhiere a los dedos, que no es moldeable y se puede vislumbrar sus partículas individuales sin necesidad de un microscopio (López A. J., 2010).
 - Limo: Es una clase de material mineral de tamaño entre 0.02 milímetros y 0.002 milímetros, está compuesto por un material medio fino como el talco, no posee capacidad de agregación, no puede formar estructuras de limos, no se expanden ni contraen y su composición química se asemeja más a la composición de la arena. Si se analiza su comportamiento al tacto se puede definir como un material que se adhiere con facilidad a los dedos dejando una apariencia grasosa, se moldea con dificultad y sus partículas brillan notablemente (López A. J., 2010).
 - Arcilla: Es la fracción que menos se encuentra en los suelos en comparación con las arenas y los limos, la arcilla proviene del fraccionamiento físico de las rocas por medio de una alteración química, su diferenciación se denota por su composición mayormente conformada por minerales originados por procesos de meteorización, posee capacidad de agregación y no se comportan como granos individuales, su tamaño por lo general es menor a dos micrómetros con propiedades físicas y químicas especiales. Se puede determinar mediante el tacto pues característicamente se adhiere bastante y se moldea con facilidad, su superficie es levemente brillante (López A. J., 2010).

El sistema de clasificación de suelos difiere según la norma en la que este aplicado y básicamente clasifica o separa el material en función al tamaño de su grano, de esta manera se tienen distintos tipos de sistemas internacionales, como son:

- ✓ Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS):

Tabla 1. 4 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Nomenclatura	Tamaño Mínimo (mm)	Tamaño Máximo (mm)
Bloques	300	-
Bolos	75	300
Grava	4,76	75
Arena	0,075	4,76
Limo	0,002	0,075
Arcilla	-	0,002

Fuente: Unión Internacional de Ciencias del Suelo (1998).

- ✓ Normas Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO M – 145):

Tabla 1. 5 Clasificación de los Suelos según Normas AASHTO M - 145.

Nomenclatura	Tamaño Mínimo (mm)	Tamaño Máximo (mm)
Bloques	75	-
Grava	2	75
Arena	0,075	2
Limo	0,005	0,075
Arcilla	0,001	0,005

Fuente: Unión Internacional de Ciencias del Suelo (1998).

✓ Normas American Society for Testing and Materials (ASTM D – 7263):

Tabla 1. 6 Clasificación de los Suelos según Normas ASTM D – 7263.

Nomenclatura	Tamaño Mínimo (mm)	Tamaño Máximo (mm)
Grava	4,76	75
Arena Gruesa	2	4,76
Arena Media	0,42	2
Arena Fina	0,075	0,42
Limo	0,005	0,075
Arcilla	0,001	0,005
Coloides	-	0,001

Fuente: Unión Internacional de Ciencias del Suelo (1998).

✓ Normas de Identificación Manual y Visual de Suelos (INV - E – 102-07):

Tabla 1. 7 Clasificación de los Suelos según Normas INV - E - 102-07.

Nomenclatura	Tamaño Mínimo (mm)	Tamaño Máximo (mm)
Fragmentos	300	-
Guijarros	75	300
Grava	4,76	75
Arena	0,075	4,76
Limo	0,002	0,075
Arcilla	-	0,002

Fuente: Unión Internacional de Ciencias del Suelo (1998).

CAPÍTULO II

DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

La finalidad del presente trabajo de investigación es determinar la resistencia máxima al esfuerzo de pandeo al cual pueden llegar piezas fabricadas con materiales puros como el Polietileno de Tereftalato (PET) y compuestos tales como la mezcla del material antes mencionado y arena para la construcción, en este caso; proveniente de la zona del Tahuall.

Cada una de las piezas fueron elaboradas modificando su composición de Polietileno de Tereftalato (PET) y arena común.

La dimensión de las piezas, así como el esfuerzo al cual fueron sometidas, se basan en diferentes parámetros técnicos que serán detallados conforme avance el estudio.

2.1 Preparación del Compuesto Polietileno de Tereftalato (PET) - Arena

Como se ha descrito anteriormente el Polietileno de Tereftalato (PET) posee características exclusivas, propiedades físicas, químicas y mecánicas muy buenas, como son su dureza, peso ligero, resistencia al desgaste, fácil moldeo y adaptación a diferentes aplicaciones, así como también un bajo costo de adquisición y posibilidad de reciclado, beneficiando de esta manera el uso del mismo; es por esta razón que ha sido considerado con gran interés para usos ingenieriles en fortificación minera.

El Polietileno de Tereftalato (PET) es un material plástico que puede ser reciclado mecánicamente en empresas que cuentan con la tecnología y experiencia, para su posterior distribución, razón por la cual conseguirlo es bastante factible.

Para el presente estudio, este material ha sido adquirido en la empresa INMEPLAST de la ciudad de Cuenca.

El Polietileno de Tereftalato al ser un polímero higroscópico, absorbe humedad del ambiente, razón por la cual, fue necesaria una previa deshidratación del material a través de un secador térmico que eleva la temperatura por encima de los 100°C para así eliminar la humedad, esto con el fin de que al fundir la mezcla Polietileno de Tereftalato (PET) - arena, se evite la acumulación de burbujas, no se genere porosidad ni aglutinamiento,

caso contrario esto provocaría que la muestra ya moldeada y solidificada pierda algunas propiedades, por consiguiente, tenga una resistencia y efectividad menor.

Tabla 2. 1 Características y Propiedades del Polietileno de Tereftalato (PET).

POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET)	
Características	
Color	Blanco lechoso
Forma	Granular típica
Densidad	1,3 g/cm ³ .
Peso	Ligero
Propiedades	
Óptica	Cristalino y transparente
Reciclabilidad	Alta
Temperatura de transición vítrea	270°C - 300°C
Granulometría	Uniforme
Resistencia a la Tracción	160 MPa - 190 MPa
Precio de Adquisición	
Precio por Kg.	\$1,65/Kg



Fuente: Empresa INMEPLAST.

En cuanto a la arena empleada, ésta es proveniente de la zona de El Tahuall – El Descanso, provincia del Azuay, formación Biblián, sus afloramientos se dan en los núcleos del anticlinal de Cuenca, sinclinal de Azogues y margen centro sureste de la cuenca.

La litología del terreno se puede definir como 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. La arena que se encuentra en esta región se infiere que deriva de los suelos volcánicos de Llaqueo. Es extraída desde los depósitos del río Sidcay.

Tabla 2. 2 Características y Propiedades de la Arena Andesítica.

ARENA ANDESÍTICA - ZONA "EL TAHUAL"	
Características	
Origen	Ígneo Estrusivo
Composición	Intermedia básica
Forma	Piroclastos
Propiedades	
Densidad	2,42 gr/cm ³
Absorción	5,40%
Porcentaje Finos	Malla N°100: 15%
Granulometría	Discontinua
Calidad Física y Química	Buena como agregado
Precio de Adquisición	
Precio por saco de 30 Kg.	\$1,80/saco



Fuente: bloquescando.com/materiales-de-construccion-la-arena

La arena es un material cuyo costo es económico, tomando en consideración que es apta para la construcción, con gran dureza y compactación, lo cual deriva en que su mezcla con el Polietileno de Tereftalato (PET), también económico, de como resultado una composición accesible económicamente.

2.2 Análisis granulométrico de la arena perteneciente a la zona de El Tahual

El análisis de los dos tipos de arena fue realizado en el laboratorio de la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay con el siguiente procedimiento:

- Preparación física: en primera instancia se colocó la arena dentro de un recipiente de tal manera que sea factible golpearla con el fin de que los conglomerados se destruyan completamente y se liberen los granos contenidos.
- Lavado: con abundante agua y a base de movimientos circulares, la arena fue lavada de tal manera que los limos e impurezas fueron extraídos. Este paso es importante, ya que la arena con demasiadas impurezas tiene un impacto negativo, provocando que tenga menos dureza o que afecte el tiempo de secado.
- Filtrado: una vez lavada completamente la arena, se procedió al proceso de filtrado para la separación de agua y arena.
- Secado: a continuación, fue necesario colocar la arena en recipientes para su posterior secado en hornos termostatos a 100°C de temperatura y por un periodo de tiempo de 3 horas aproximadamente.
- Tamizado: en este punto se hizo uso de tamices de malla N°4, 8, 10, 16, 20, 30, 40, 50 y 100, cada uno superpuesto en completo orden, de mayor a menor según su diámetro de abertura, esto con el fin de que la arena sea perfectamente separada según el diámetro de las partículas y posea uniformidad. Se vertió cantidades de arena previamente pesadas en el conjunto de tamices para luego ubicarlo en el agitador mecánico por un tiempo de 10 minutos.
- Pesaje: una vez separado el material y ubicado en distintos recipientes, se pesó cada porción de arena seleccionada, considerando la tara de los recipientes empleados y el porcentaje de pérdida del material en el proceso de tamización.
- Cálculos: con los resultados obtenidos del pesaje se realizó el análisis granulométrico con su respectiva curva.

Todo el procedimiento antes mencionado se lo hizo tanto como para la arena de grano grueso como fino.

2.2.1 Análisis granulométrico de la arena de grano grueso

Al aplicar el análisis granulométrico por tamizado se puede clasificar los suelos en grava, arena y limo, definir la curva granulométrica y establecer valores de interés para la arena de grano grueso.

Tabla 2. 3 Análisis Granulométrico - Arena de Grano Grueso.

ARENA GRUESA = 15263 g.							
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido Parcial (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	Peso que Pasa (g)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4	4,760	3692	3692	11571	24,19%	24,19%	75,81%
8	2,380	2957	6649	8614	19,37%	43,56%	56,44%
10	2,000	598	7247	8016	3,92%	47,48%	52,52%
16	1,190	1525	8772	6491	9,99%	57,47%	42,53%
20	0,841	990	9762	5501	6,49%	63,96%	36,04%
30	0,595	983	10745	4518	6,44%	70,40%	29,60%
40	0,420	1972	12717	2546	12,92%	83,32%	16,68%
50	0,297	847	13564	1699	5,55%	88,87%	11,13%
100	0,149	1364	14928	335	8,94%	97,81%	2,19%
Fondo		277	15205	58	1,81%	99,62%	0,38%

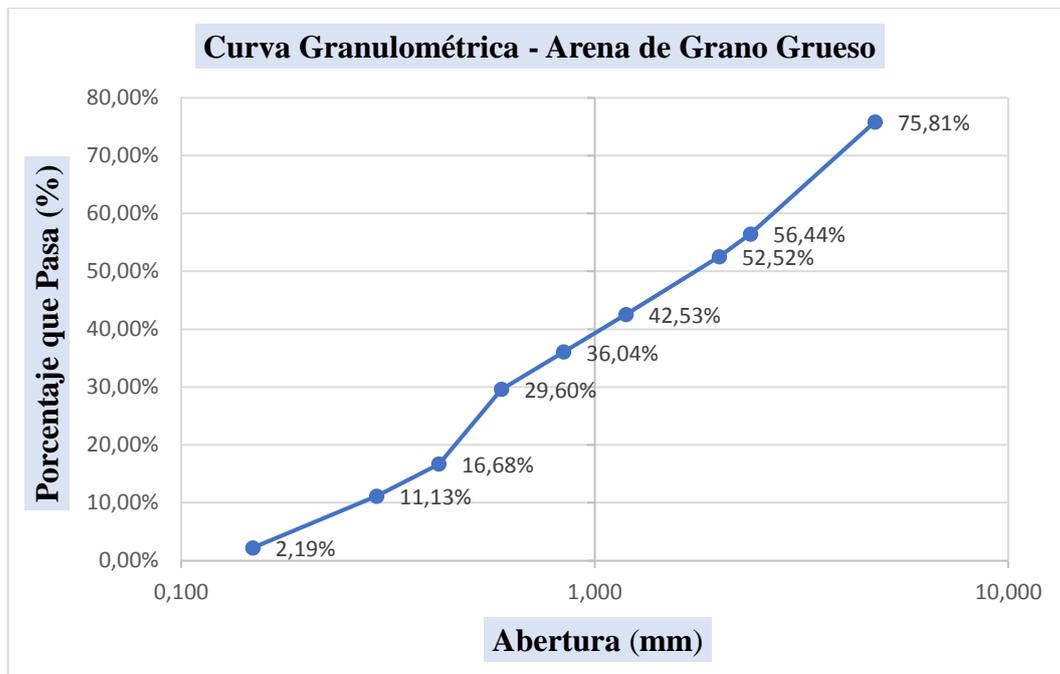


Figura 2. 1 Curva Granulométrica – Arena de Grano Grueso.

Luego de realizado el análisis granulométrico para la arena de grano grueso, se procedió a la selección del material de interés. Se colocó en recipientes diferentes el material retenido en los tamices de malla N° 30, 40 y 50 específicamente, siendo éste el material de interés para la fabricación de las muestras.

Tabla 2. 4 Material de Interés Seleccionado – Arena de Grano Grueso.

MATERIAL DE INTERÉS - ARENA GRUESA								
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido Parcial (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	Peso que Pasa (g)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)	Clasificación (Atterberg, SI)
30	0,595	983	10745	4518	6,44%	70,40%	29,60%	Arena Gruesa
40	0,420	1972	12717	2546	12,92%	83,32%	16,68%	Arena Fina
50	0,297	847	13564	1699	5,55%	88,87%	11,13%	Arena Fina

Este proceso se realiza con el fin de emplear arena de diferente granulometría en cada probeta, para posteriormente hacer una selección de aquella muestra que mejor actúa ante el esfuerzo de pandeo y así establecer cuál es el tamaño de partícula óptimo en el presente estudio.

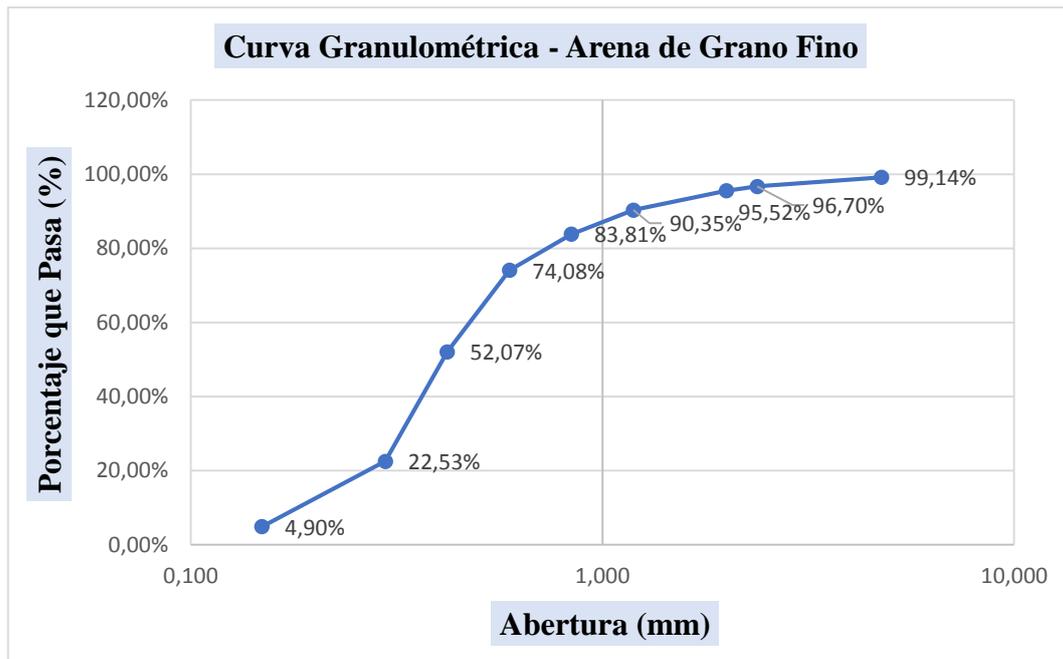
2.2.2 Análisis granulométrico de la arena de grano fino

El procedimiento para el análisis granulométrico de la arena de grano fino es idéntico al anterior y tiene el mismo fin, pues al aplicar el estudio por tamizado se puede clasificar los suelos en grava, arena y limo, definir la curva granulométrica y establecer valores de interés para el caso de la arena de grano fino.

Tabla 2. 5 Análisis Granulométrico - Arena de Grano Fino.

ARENA FINA = 5491 g.							
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido Parcial (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	Peso que Pasa (g)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4	4,760	47	47	5444	0,86%	0,86%	99,14%
8	2,380	134	181	5310	2,44%	3,30%	96,70%
10	2,000	65	246	5245	1,18%	4,48%	95,52%
16	1,190	284	530	4961	5,17%	9,65%	90,35%
20	0,841	359	889	4602	6,54%	16,19%	83,81%
30	0,595	534	1423	4068	9,73%	25,92%	74,08%
40	0,420	1209	2632	2859	22,02%	47,93%	52,07%
50	0,297	1622	4254	1237	29,54%	77,47%	22,53%
100	0,149	968	5222	269	17,63%	95,10%	4,90%
Fondo		246	5468	23	4,48%	99,58%	0,42%

Figura 2. 2 Curva Granulométrica - Arena de Grano Fino.



Luego de realizado el análisis granulométrico para la arena de grano fino, se procedió a la selección del material de interés. Se colocó en recipientes diferentes el material retenido en los tamices de malla N° 30, 40 y 50 específicamente, al igual que para el caso de la arena de grano grueso, siendo éste el material de interés para la fabricación de las muestras.

Tabla 2. 6 Material de Interés Seleccionado – Arena de Grano Fino.

MATERIAL DE INTERÉS - ARENA FINA								
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido Parcial (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	Peso que Pasa (g)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)	Clasificación (Atterberg, SI)
30	0,595	534	1423	4068	9,73%	25,92%	74,08%	Arena Gruesa
40	0,420	1209	2632	2859	22,02%	47,93%	52,07%	Arena Fina
50	0,297	1622	4254	1237	29,54%	77,47%	22,53%	Arena Fina

Al igual que para la arena de grano grueso, este proceso se realiza con el fin de emplear arena de diferente granulometría en cada probeta, para posteriormente hacer una selección de aquella muestra que mejor actúa ante el esfuerzo de pandeo y así establecer cuál es el tamaño de partícula óptimo en el presente estudio.

Se realiza un análisis granulométrico para cada tipo de arena, con el fin de hacer una comparación de la composición que presenta cada una.

Del análisis y curva granulométrica tanto para la arena gruesa como para la arena fina podemos destacar los siguientes aspectos:

- ✓ El material considerado agregado grueso, son en su mayoría cantos rodados pequeños, ya que el diámetro de la partícula de este material es superior a 1 mm.
- ✓ El material de interés considerado agregado fino, presenta una granulometría mucho más uniforme, con un tamaño de partícula alrededor de 0,5 mm, lo que significa que posee gran consistencia y uniformidad.
- ✓ Según su clasificación, en efecto, es material considerado como arena constituida por partículas menores que 4,76 mm y mayores que 0,074 mm, válido para nuestro estudio.



Figura 2. 3 Arena de Interés, Malla N°30 - Tamaño de Partícula de 0,595 mm.



Figura 2. 4 Arena de Interés, Malla N°40 - Tamaño de Partícula de 0,420 mm.



Figura 2. 5 Arena de Interés, Malla N°50, Tamaño de Partícula de 0,297 mm.

2.3 Descripción de la Fabricación de Muestras o Probetas

Para la fabricación de las probetas de acuerdo a su composición fue necesario:

- ✓ La adquisición de Polietileno de Tereftalato (PET) completamente deshidratado.
- ✓ La adquisición de arena tanto gruesa como fina de la zona de El Tahual.

Se debe considerar que el proceso de fabricación de cada una de las muestras se ejecutó después de un periodo de ensayos experimentales que tuvo como objetivo el perfeccionamiento de cada una de las etapas en dicha elaboración.

La composición de la mezcla de cada una de las piezas debió contener un elevado porcentaje de Polietileno de Tereftalato (PET) debido a que su uso como material principal es un motivo para incentivar el reciclaje y dar un nuevo uso a uno de los polímeros más producidos, usados y desechados del consumo diario humano e industrial.

2.3.1 Dimensión de las Probetas

La forma y tamaño de las muestras y de acuerdo al esfuerzo a aplicarse, se determinaron en base a estudios de pandeo anteriormente realizados, estableciendo así la forma de un cuerpo paralelepípedo, con relación y tamaño proporcionales; logrando de esta manera que el esfuerzo aplicado se distribuya.

Cabe mencionar que a más de lo antes mencionado, las dimensiones de las probetas fueron definidas también en relación a los pilates que se usan en fortificación minera, así como también en base a la limitación de hornos de fundición del material empleado.

Las muestras pueden definirse brevemente como cuerpos paralelepípedos cuyas dimensiones fueron: 25 cm de longitud x 5 cm de anchura x 5 cm profundidad.

2.3.2 Porcentajes del Compuesto Polietileno de Tereftalato (PET) - Arena

Se establecieron diferentes porcentajes de cada material en la fabricación de las probetas y determinar así cual es la composición más aceptable ante esfuerzos de pandeo.

Se fijaron entonces los siguientes parámetros para la fusión del Polietileno de Tereftalato (PET) y arena:

- ✓ Relación N°1: 90% Polietileno de Tereftalato (PET) – 10% Arena.
- ✓ Relación N°2: 80% Polietileno de Tereftalato (PET) – 20% Arena.
- ✓ Relación N°3: 70% Polietileno de Tereftalato (PET) – 30% Arena.

Para cada relación se fabricarán tres muestras, cada una con una granulometría diferente, es decir con material de interés de: malla N°30 – tamaño de partícula 0,595 mm, malla N°40 – tamaño de partícula 0,420 mm y malla N°50 – tamaño de partícula 0,297.

Además; se fijó, como comparación, la fabricación de una muestra completamente pura, es decir; 100% Polietileno de Tereftalato (PET).

2.3.3 Proceso de Ensayos de Fundición del Compuesto Polietileno de Tereftalato (PET) – Arena

A continuación se detalla cada uno de los procesos para la fundición y fabricación de muestras:

- a) Para dar la forma y tamaño a cada una de las piezas fue necesaria la construcción de un molde de acero de transmisión para altas temperaturas con las dimensiones definidas para las muestras. Además, el molde contó con un sistema totalmente armable y desarmable para facilidad de extracción de las piezas.



Figura 2. 6 Molde de Acero de Transmisión para Altas Temperaturas.

- b) Ya con el molde construido se procedió a fijar la cantidad de material que ingresará en el mismo.



Figura 2. 7 Molde con 640 gramos de Polietileno de Tereftalato (PET).

- c) Inicialmente, en el molde ingresó un total de 640 gramos de Polietileno de Tereftalato (PET), pero al proceder con la fundición y moldeo de la muestra, dio como resultado un faltante de material, pues la muestra no cumplió con los parámetros de dimensión establecidos.



Figura 2. 8 Muestra con 640 gr. de material.

d) Para el segundo intento se consideró que el material faltante equivalía aproximadamente al 60% (384 gramos) más de lo inicialmente calculado, es decir; a un total de 1024 gramos, pero luego de la fundición y moldeo, dio como resultado un nuevo faltante de material, ya que una vez más no se cumplió con las dimensiones fijadas, pero esta vez el material faltante fue relativamente menor.



Figura 2. 9 Muestra con 1024 gr. de material.

e) Para el tercer intento los resultados deseados estuvieron cerca ya que, con 1090 gramos de material puesto a fundición, estuvo próximo el completo moldeo de la muestra pero, en esta ocasión, la presión que se aplicó al molde fue menor a la necesaria.



Figura 2. 10 Muestra con 1090 gr. de material y presión menor a la necesaria.

- f) Se procedió a fabricar la siguiente muestra con el mismo pesaje anterior, es decir, 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.



Figura 2. 11 Muestra con 1090 gr. completamente moldeada.

2.3.4 Proceso Definitivo de Fundición del Compuesto Polietileno de Tereftalato (PET) - Arena

Ya con los resultados deseados y el pesaje de 1090 gramos definido para el molde, se procedió a la fabricación de cada una de las muestras con su diferente composición, para lo cual se detalla el proceso requerido a continuación:

- a) Pesaje de Materiales

La muestra N°1 fue fabricada al 100% de Polietileno de Tereftalato, es decir; pura completamente, lo que significa que fue elaborada con 1090 gramos de este material.

Para las otras nueve muestras, se tomaron en consideración las relaciones establecidas con los tres tipos de granulometría o partícula de interés.

Para la muestra N°2, relación 90% Polietileno de Tereftalato (PET) – 10% Arena, fueron necesarios 980 gramos de polímero y 110 gramos de arena con tamaño de partícula de 0,595 mm.

Para la muestra N°6, relación 80% Polietileno de Tereftalato (PET) – 20% Arena, fueron necesarios 871 gramos de polímero y 219 gramos de arena con tamaño de partícula de 0,420 mm.

Para la muestra N°10, relación 70% Polietileno de Tereftalato (PET) – 10% Arena, fueron necesarios 763 gramos de polímero y 327 gramos de arena con tamaño de partícula de 0,297 mm.

Al realizar la suma de las dos cantidades de material para cada una de las muestras, obtenemos un total de 1090 gramos, cantidad necesaria para obtener una pieza perfectamente moldeada.

El mismo procedimiento lo repetimos con las otras seis muestras, considerando cada una de las relaciones y granulometría.



Figura 2. 12 Pesaje de Polietileno de Tereftalato (PET) - Arena.

Una vez realizados cada uno de los pesajes, se combinaron los materiales, intentando una mezcla uniforme, lista para el proceso de fundición.

b) Calentamiento de Hornos

Para la elaboración de muestras, fue necesario el uso de hornos con temperaturas elevadas, los mismos que fueron facilitados por la empresa INMEPLAST.

Se emplearon dos hornos, el primero con una temperatura de 350°C que sirvió para la completa fundición del material. El segundo con una temperatura de 100°C que fue usado para el enfriamiento de las muestras, ya que estas no pueden ser expuestas directamente al ambiente pues el cambio repentino de temperatura provoca el rompimiento de las piezas.

c) Primera Fundición del Material

Para este proceso fue necesario el uso de un recipiente de metal templado, resistente a elevadas temperaturas, el cual fue colocado dentro del horno para un previo calentamiento durante 7 minutos aproximadamente.

Para la fundición del material, es necesario iniciar con una temperatura del horno a 300°C la cual irá aumentando conforme avance el proceso.

Se depositó en el recipiente previamente calentado la primera mezcla, se la introdujo al horno a 300°C y cada 5 minutos se aumentó la temperatura 10°C más hasta alcanzar los 350°C necesarios para conseguir la temperatura de transición vítrea que permite al Polietileno de Tereftalato (PET) polimerizarse y encapsular cada grano de arena, logrando así la completa fundición del material.

Este proceso toma un tiempo aproximado de 24 minutos, pero durante este periodo es necesario extraer el recipiente del horno de 3 a 4 veces con el fin de mezclar y lograr una uniforme fundición del material, facilitando así la polimerización. Se evita también pérdidas excesivas de material debido a la adhesión del mismo en las paredes del recipiente, además; se impide que la mezcla se quemé y pierda propiedades.

Teóricamente la temperatura de fusión o transición vítrea del Polietileno de Tereftalato (PET), se encuentra alrededor de los 260°C y 273°C, pero al estar contenido en un recipiente en el cual el calor se aplica con mayor eficacia en las zonas exteriores a comparación de las zonas interiores, es necesario controlar con un pirómetro digital la temperatura interior y proceder a mezclar manualmente cada que sea necesario, esto ayuda a polimerizar y distribuir el calor. Para lograr la efectividad del proceso se experimentó con el horno a varias temperaturas y tiempos de exposición llegando a ser los 350°C la temperatura óptima para que el calor pueda llegar a todas las zonas del material y se logre una polimerización satisfactoria.

Es importante resaltar que todo el proceso se debe llevar a cabo con suma precaución y responsabilidad, además de hacerlo en el menor tiempo posible pues el material se enfría rápidamente y adquiere dureza.

Es preciso el uso de guantes resistentes al calor para la manipulación del recipiente, pinzas que faciliten el sostenimiento del mismo y mascarillas, debido a que los vapores que se desprenden durante la fundición de estos materiales, son bastante dañinos.



Figura 2. 13 Recipiente con material dentro del horno.

d) Moldeado del Material

Para continuar con la forma de las piezas fue necesario el previo calentamiento del molde a 350°C. También fue importante el uso de un agente desmoldante, el cual fue rociado en las paredes del molde para así evitar que el material se adhiriera a las paredes del mismo (Rodríguez D. , 2018).

Una vez alcanzada una satisfactoria polimerización en la cual se han encerrado y mezclado perfectamente los componentes, se procedió a vaciar el material ya fundido dentro del molde previamente calentado. Este proceso se realizó con ayuda de espátulas para evitar pérdidas excesivas de material y guantes para manipular el recipiente que contiene la mezcla.

Ya con el material dentro del molde se procedió a cubrirlo con la tapa del mismo para luego colocarlo en una prensa simple, con el fin de que al hacer presión se rellenen todos los espacios posibles y adquiriera la forma requerida.

e) Desmolde de la Muestra

Empleando guantes para la manipulación del material y molde aún calientes, se procedió a desarmarlo, extrayendo así la muestra perfectamente moldeada.

En este punto es necesaria la revisión física de las piezas con el fin de identificar o descartar posibles grietas o fisuras que comprometan la estructura y resistencia de la muestra.

f) Enfriamiento por Etapas

En esta etapa de fabricación de muestras o probetas es importante la termodinámica con la que actúan las piezas, es por esta razón que el enfriamiento por etapas es crucial ya que se evita el fenómeno termodinámico conocido como choque térmico, mismo que debilita las estructuras si no son enfriadas adecuadamente.

Durante el proceso de fundición del material se alcanzan temperaturas por encima de los 300°C, lo que significa que las muestras al ser expuestas al ambiente sufren un enfriamiento repentino e inmediato, cambiando bruscamente de temperatura, este cambio es denominado “choque térmico” y al no ser controlado provoca el fisuramiento o rompimiento inmediato de las piezas, pues en el interior de las muestras aún se mantienen elevadas temperaturas.

Para evitar este choque térmico, fue necesaria una disminución sistemática de la temperatura de las muestras, dividida en 4 fases de enfriamiento.

- a) Luego de extraída la muestra del molde, esta fue introducida de manera inmediata en el segundo horno a 100°C.
- b) Después de aproximadamente 20 minutos se disminuyó la temperatura del horno a 50°C.
- c) Consiguientemente y luego de otros 20 minutos, llegar a 10°C fue necesario. Esta tercera etapa es la más prolongada, pues es fundamental que la muestra permanezca a esta temperatura durante 1 hora aproximadamente.
- d) Finalmente, y luego de este periodo, se extrajo por completo la muestra del molde para dejarla a temperatura ambiente durante 12 horas.

Este proceso garantizó un enfriamiento equilibrado de cada una de las piezas, llegando así a los resultados requeridos de fabricación de muestras.

Cabe recalcar que la limitación en las medidas de las probetas fue uno de los factores que intervinieron en su fabricación, ya que no se contó con hornos de tamaños acordes a las medidas que se establecen en la norma, es por eso que hubo una reducción de sus medidas, tratando de acoplarlas a los hornos disponibles.

Es importante recalcar que las dimensiones de las muestras fueron obtenidas en relación a las dimensiones de las estructuras de fortificación que se usan en las minas.

2.4 Descripción y Caracterización de Muestras

Teniendo un total de 10 piezas, con un dimensionamiento de 25 cm de longitud, 5 cm de anchura y 5 cm de profundidad, procedemos a detallar cada una de ellas con las siguientes características:

- ✓ Muestra N°1: Es necesario hacer un énfasis en esta muestra dando a conocer que su composición es completamente pura, es decir, fabricada únicamente con Polietileno de Tereftalato (PET).

Tabla 2. 7 Muestra N°1

MUESTRA N°1	
Porcentaje	
PET	100%
Arena	0%
Peso	
PET	1090 gr.
Arena	gr.



- ✓ Muestra N°2: Fabricada con una composición de 90% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 10% de arena de 0,595 mm de tamaño y malla N°30.

Tabla 2. 8 Muestra N°2

MUESTRA N°2	
Porcentaje	
PET	90%
Arena	10%
Peso	
PET	980 gr.
Arena	110 gr.
Tamiz	
N°	30
Tamaño	0,595 mm.



- ✓ Muestra N°3: Elaborada con una composición de 80% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 20% de arena de 0,595 mm de tamaño y malla N°30.

Tabla 2. 9 Muestra N°3

MUESTRA N°3	
Porcentaje	
PET	80%
Arena	20%
Peso	
PET	871 gr.
Arena	219 gr.
Tamiz	
N°	30
Tamaño	0,595 mm.



- ✓ Muestra N°4: Construida con una composición de 70% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 30% de arena de 0,595 mm de tamaño y malla N°30.

Tabla 2. 10 Muestra N°4

MUESTRA N°4	
Porcentaje	
PET	70%
Arena	30%
Peso	
PET	763 gr.
Arena	327 gr.
Tamiz	
N°	30
Tamaño	0,595 mm.



- ✓ Muestra N°5: Fabricada con una composición de 90% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 10% de arena de 0,420 mm de tamaño y malla N°40.

Tabla 2. 11 Muestra N°5

MUESTRA N°5	
Porcentaje	
PET	90%
Arena	10%
Peso	
PET	980 gr.
Arena	110 gr.
Tamiz	
N°	40
Tamaño	0,420 mm.



- ✓ Muestra N°6: Elaborada con una composición de 80% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 20% de arena de 0,420 mm de tamaño y malla N°40.

Tabla 2. 12 Muestra N°6

MUESTRA N°6	
Porcentaje	
PET	80%
Arena	20%
Peso	
PET	871 gr.
Arena	219 gr.
Tamiz	
N°	40
Tamaño	0,420 mm.



- ✓ Muestra N°7: Construida con una composición de 70% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 30% de arena de 0,420 mm de tamaño y malla N°40.

Tabla 2. 13 Muestra N°7

MUESTRA N°7	
Porcentaje	
PET	70%
Arena	30%
Peso	
PET	763 gr.
Arena	327 gr.
Tamiz	
N°	40
Tamaño	0,420 mm.



- ✓ Muestra N°8: Fabricada con una composición de 90% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 10% de arena de 0,297 mm de tamaño y malla N°50.

Tabla 2. 14 Muestra N°8

MUESTRA N°8	
Porcentaje	
PET	90%
Arena	10%
Peso	
PET	980 gr.
Arena	110 gr.
Tamiz	
N°	50
Tamaño	0,297 mm.



- ✓ Muestra N°9: Elaborada con una composición de 80% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 20% de arena de 0,297 mm de tamaño y malla N°50.

Tabla 2. 15 Muestra N°9

MUESTRA N°9	
Porcentaje	
PET	80%
Arena	20%
Peso	
PET	871 gr.
Arena	219 gr.
Tamiz	
N°	50
Tamaño	0,297 mm.



- ✓ Muestra N°10: Construida con una composición de 70% de Polietileno de Tereftalato (PET) y 30% de arena de 0,297 mm de tamaño y malla N°50.

Tabla 2. 16 Muestra N°10

MUESTRA N°10	
Porcentaje	
PET	70%
Arena	30%
Peso	
PET	763 gr.
Arena	327 gr.
Tamiz	
N°	50
Tamaño	0,297 mm.



2.5 Descripción de Equipos de Experimentación

- El procedimiento experimental se aplicó en el Equipo de Pruebas HUMBOLDT perteneciente a la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay.



Figura 2. 14 Equipo de Pruebas HUMBOLDT.

Características:

- ✓ Part. No.: PE17N-TEST-60916
- ✓ Modelo: A
- ✓ 8800 PSI / 605 BAR.
- ✓ No. de Serie: 2207AM85747
- ✓ Capacidad de la carga de aplastamiento: 50000 Kilogramos de fuerza.

b) Pero, el uso de la máquina HUMBOLDT para el ensayo no fue lo único necesario, pues al tratarse de un procedimiento experimental de pandeo, se determinó el requerimiento de la fabricación de soportes que ayuden a cumplir exitosamente con los ensayos, para lo cual fue necesario:

- ✓ 2 placas de sostenimiento de probetas
- ✓ 2 placas de aplicación de carga
- ✓ 2 esferas de acero

Con las siguientes medidas y espesores:

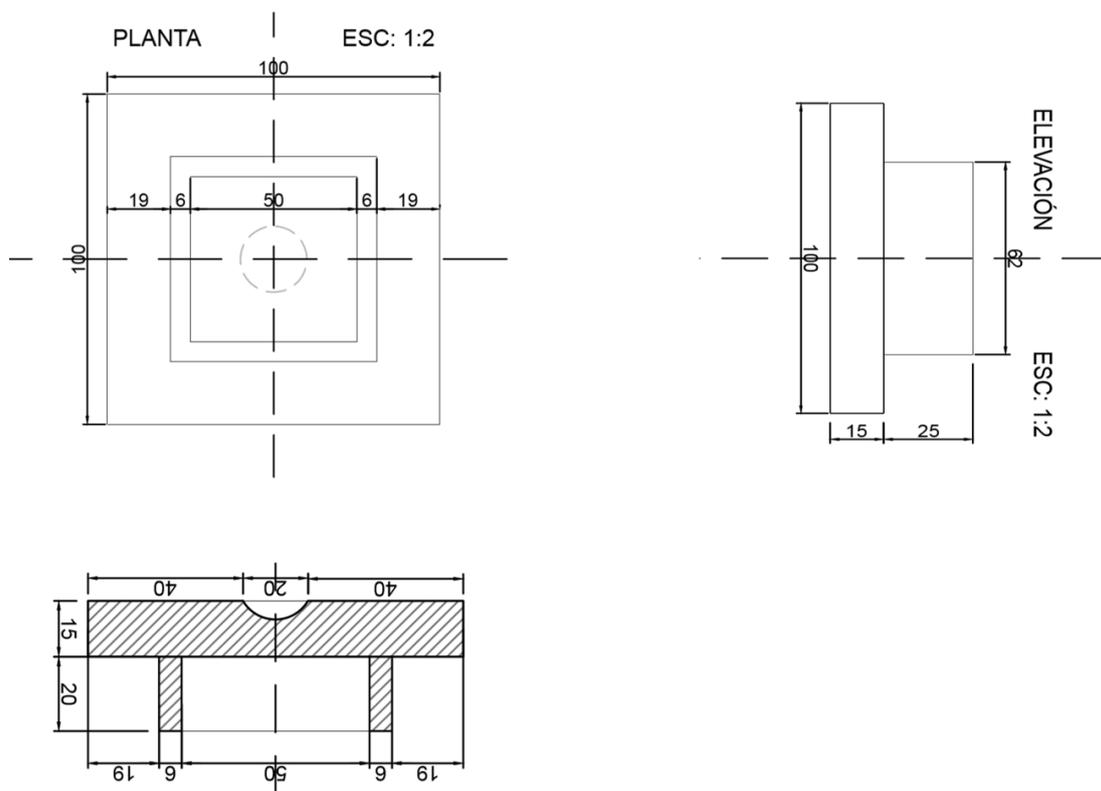


Figura 2. 15 Placa de sostenimiento de probetas.

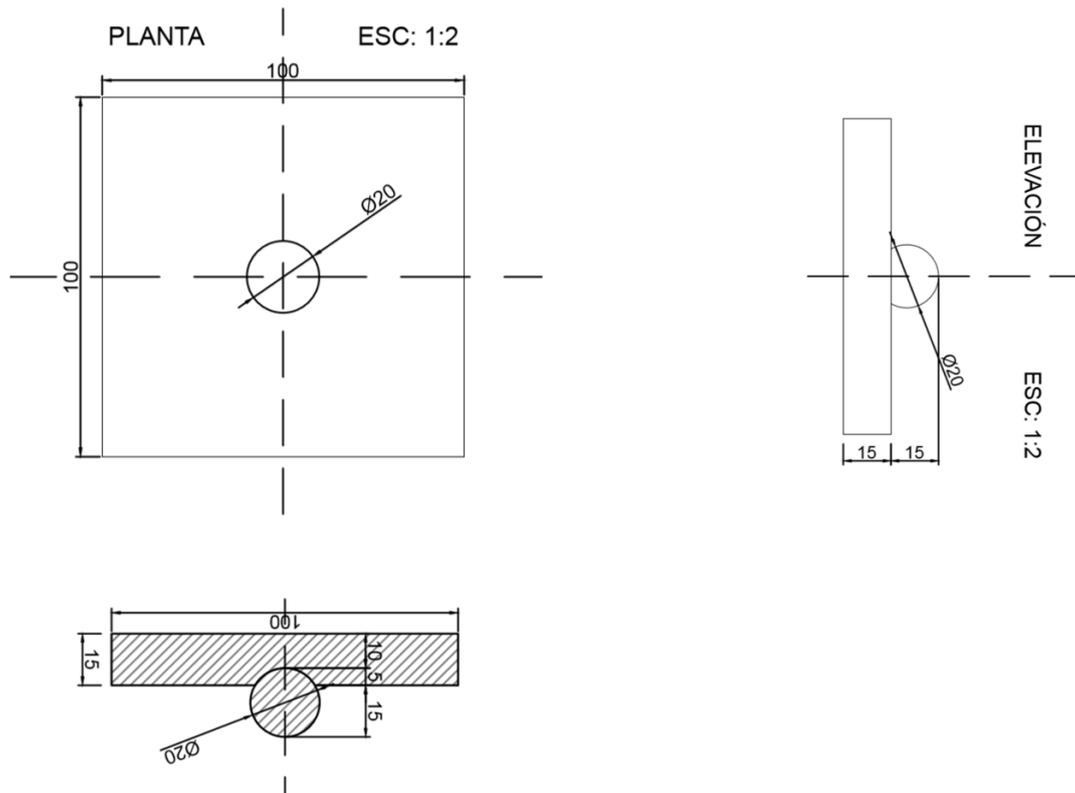


Figura 2. 16 Placa de aplicación de carga.

Estos soportes ayudaron a que la prueba cumpla con el esfuerzo de pandeo, ya que sin ellos el sometimiento sería prácticamente a esfuerzo de compresión simple.

Dichos apoyos fueron fabricados con acero de 6 mm de espesor para las paredes, mientras que las bases de los dos soportes donde se apoyaron estas paredes fueron de 10 mm de espesor.

En estas bases se construyeron 4 paredes de 15 mm de altura para cada uno de los lados, con una anchura de 50 mm de manera que las probetas ingresen sin dificultad alguna, pero estén netamente ajustadas. Se fabricaron dos bases con idénticas características, tanto para la parte superior como inferior de las probetas.

A lado reverso de las dos bases se elaboraron hendiduras con una profundidad de 5 mm en las cuales ingresaron esferas de 20 mm de diámetro.

Sobre estas esferas, fue necesario el montaje de una placa para la parte superior e inferior de las probetas, las 2 fueron construidas con acero de 10 mm de espesor, pero en uno de sus reversos también fue necesaria la elaboración de hendiduras de 5 mm de profundidad, esto con el fin de que cubra la base con la esfera respectivamente colocada.



Figura 2. 17 Colocación de soportes y probeta.

Lo que el conjunto de apoyos logra es que las probetas no se inclinen hacia ninguno de los lados y se de una libre rotación de los elementos, además de que las esferas mantienen un equilibrio en cada uno de los cuerpos expuestos a sometimiento de pandeo.

Las condiciones de apoyo influyen en el valor de la carga crítica, por lo que para el ensayo fue necesario contar con estos dispositivos de apoyo o soporte que simulen las diferentes maneras en las que se apoyan las probetas sometidas a esfuerzos.

2.6 Ejecución Experimental en las Muestras

Las muestras fabricadas fueron probadas con el fin de obtener el esfuerzo que cada una de ellas es capaz de resistir al pandeo y así inferir si ésta fuerza es equiparable a otros materiales usados en fortificación minera.

El procedimiento fue el siguiente:

- a) Inicialmente, se colocó la probeta en los apoyos de doble articulación, empleando el conjunto total de soportes.
- b) A continuación, se procedió a ubicar la probeta con los respectivos apoyos dentro del Equipo de Pruebas HUMBOLDT, en este punto la precisión es necesaria, pues se la debe colocar lo más centrada posible con el fin de que la probeta esté completamente vertical.

- c) Luego de asegurar el equipo con la probeta ya ubicada adecuadamente, se procedió a someterla a carga, la misma que va a ir aumentando progresivamente hasta que la probeta falle. En este punto se verifica que el esfuerzo de pandeo se esté cumpliendo y que las muestras se mantengan en su lugar. Se debe considerar la seguridad personal, pues el material empleado en algunos casos estalló.
- d) Finalmente, y una vez que la probeta excedió su capacidad de resistencia al esfuerzo de pandeo, se determinó la carga de falla, la misma que se lee en el monitor de control del equipo de pruebas.

El mismo procedimiento se repitió para cada una de las 10 probetas.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

La pérdida de la estabilidad de las columnas ocurre debido a que la carga externa alcanza el valor de la carga crítica, esto es lo que se conoce como pandeo.

La finalidad de este análisis es probar la estabilidad y dureza, mediante la resistencia al pandeo y si es factible o no considerar la utilización del Polietileno de Tereftalato (PET), reciclado, fundido y combinado con arena común en diferentes porcentajes.

3.1 Análisis de Muestras

De los resultados obtenidos se expresa lo siguiente:

Tabla 3. 1 Análisis de Muestras.

MUESTRA	COMPOSICIÓN	CARGA MÁXIMA DE RESISTENCIA AL PANDEO (Kgf)	CARGA MÁXIMA DE RESISTENCIA AL PANDEO (N)	OBSERVACIONES
Muestra N°1	100% PET - 0% Arena	14176	139019,78	Fracturas horizontales y verticales leves y escasas. Porosidad casi nula. Sin rotura total.
Muestra N°2	90% PET - 10% Arena (N°30 - 0,595 mm.)	17910	175638	Baja porosidad. Rotura total, brusca y con estallido.
Muestra N°3	80% PET - 20% Arena (N°30 - 0,595 mm.)	15980	156711,07	Baja porosidad. Rotura total, brusca y con estallido.
Muestra N°4	70% PET - 30% Arena (N°30 - 0,595 mm.)	13786	135195,17	Fracturas leves e internas. Sin rotura total.
Muestra N°5	90% PET - 10% Arena (N°40 - 0,420 mm.)	16351	160349,35	Baja porosidad. Rotura parcial, con estallido suave.
Muestra N°6	80% PET - 20% Arena (N°40 - 0,420 mm.)	19068	186994,16	Baja porosidad. Rotura total, brusca y con estallido.
Muestra N°7	70% PET - 30% Arena (N°40 - 0,420 mm.)	9754	95654,55	Fracturas leves e internas. Sin rotura total.
Muestra N°8	90% PET - 10% Arena (N°50 - 0,297 mm.)	7009	68735,16	Baja porosidad. Rotura total, brusca y con estallido.
Muestra N°9	80% PET - 20% Arena (N°50 - 0,297 mm.)	8262	81022,96	Baja porosidad. Rotura parcial, con estallido suave.
Muestra N°10	70% PET - 30% Arena (N°50 - 0,297 mm.)	6721	65910,83	Baja porosidad. Rotura parcial, con estallido suave.

Haciendo un análisis global del conjunto de muestras y una vez que estas se fracturaron completamente, se observó baja porosidad, con rotura total en unas y fracturas leves e internas, sin rotura total en otras. El pandeo de la mayoría de las probetas alcanzó la carga crítica exactamente en la mitad de ellas, esto se comprobó a través de la observación detenida durante el ensayo, sin embargo queda abierto a un posterior análisis.

Cabe recalcar también que el rompimiento de las muestras en su mayoría fue bastante brusco y con estallido fuerte, mientras que la rotura de aquellas muestras que no presentaron rompimiento total, apenas se escuchó el fracturamiento.

3.2 Resultados

De los ensayos y análisis antes realizados se seleccionaron 6 muestras que definieron los resultados, las mismas que son:

Tabla 3. 2 Tabla de Resultados – Conjunto N°1

MUESTRA	COMPOSICIÓN	CARGA MÁXIMA DE RESISTENCIA AL PANDEO (Kgf)	CARGA MÁXIMA DE RESISTENCIA AL PANDEO (N)	OBSERVACIONES
Muestra N°6	80% PET - 20% Arena (N°40 - 0,420 mm.)	19068	186994,16	Baja porosidad. Rotura total, brusca y con estallido.
Muestra N°2	90% PET - 10% Arena (N°30 - 0,595 mm.)	17910	175638	Baja porosidad. Rotura total, brusca y con estallido.
Muestra N°5	90% PET - 10% Arena (N°40 - 0,420 mm.)	16351	160349,35	Baja porosidad. Rotura parcial, con estallido suave.

De éstas 3 primeras muestras se enfatiza que son las más resistentes, con una carga máxima de hasta 186994,16 N, pero de los ensayos practicados se destaca también su rotura, ya que fue total, bastante brusca y con estallido fuerte.

Tabla 3. 3 Tabla de Resultados - Conjunto N°2

MUESTRA	COMPOSICIÓN	CARGA MÁXIMA DE RESISTENCIA AL PANDEO (Kgf)	CARGA MÁXIMA DE RESISTENCIA AL PANDEO (N)	OBSERVACIONES
Muestra N°1	100% PET - 0% Arena	14176	139019,78	Fracturas horizontales y verticales Porosidad casi nula. Sin rotura total.
Muestra N°4	70% PET - 30% Arena (N°30 - 0,595 mm.)	13786	135195,17	Fracturas leves e internas. Sin rotura total.
Muestra N°7	70% PET - 30% Arena (N°40 - 0,420 mm.)	9754	95654,55	Fracturas leves e internas. Sin rotura total.

De éstas otras 3 muestras se destacan las fracturas leves e internas y sin rotura total y brusca, presentan una resistencia menor, pero no muy lejana de aquellas de máxima resistencia.

3.3 Interpretación de Resultados

Durante el proceso de ensayo de probetas sometidas a esfuerzo de pandeo se apreciaron algunas situaciones a ser consideradas pues no dejan de ser importantes para nuestro estudio, sin embargo, el enfoque en este punto es la información recopilada acerca del comportamiento de cada una de las probetas al soportar una carga.

Para la selección de las probetas específicamente analizadas se consideraron factores que son de interés.

Para el caso de las Muestras N°6 y 2, si bien fueron las más resistentes del conjunto de probetas con cargas máximas de resistencia de 186,99 kN y 175,64 kN respectivamente y presentaron baja porosidad, no se puede omitir su comportamiento ante la rotura de la mismas, ya que éste fue totalmente brusco y con un estallido bastante fuerte, lo cual en fortificación minera no sería favorable, pues ante una falla lo que se espera es que la rotura sea lenta y por etapas, más no brusca e inmediata, de ser así se comprometería toda la estructura de fortificación, siendo imposible el reemplazo de aquellos cuerpos fracturados.

La Muestra N°5 fue la tercera probeta con mayor capacidad de resistencia y carga máxima de 160,35 kN, presenta baja porosidad, la rotura fue parcial y el estallido leve, lo cual sería favorable para una fortificación, pues la resistencia ante una carga si bien no es la más alta tiene también sus características de rotura, razones que ayudarían al posible reemplazo del cuerpo fracturado.

Por otro lado, están también las Muestras N°1, 4 y 7 con resistencia máxima de carga de 139,02 kN, 135,20 kN y 95,65 kN respectivamente, las mismas que fueron consideradas como aquellas muestras con resistencia media de carga y con un aspecto favorable ya que no presentaron rotura total, se observaron únicamente fracturas leves y escasas, pudiendo así ser consideradas en fortificación minera.

3.4. Esfuerzo Crítico del Polietileno de Tereftalato (PET)

Para establecer el esfuerzo crítico de falla del Polietileno de Tereftalato (PET), fue necesario el análisis e interpretación de ecuaciones que ayudaron a la determinación de dichos valores, para posteriormente continuar con el cálculo y estudio de los esfuerzos soportados por cada probeta y definir así el tipo de esfuerzo realmente aplicado.

Datos requeridos:

$$E_{PET} = 3000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Pc} = 50 \text{ MPa (asumiendo el 80% de la resistencia a la rotura)}$$

Cálculos requeridos:

$$r = a/\sqrt{12}$$

$$r = 5\text{cm}/\sqrt{12}$$

$$r = 1,44 \text{ cm.}$$

Donde,

$$a = \text{lado}$$

El radio de giro de la columna es de 1,44 cm.

$$\lambda = le/r$$

$$\lambda = \frac{25\text{cm}}{1,44\text{cm}}$$

$$\lambda = 17,36$$

El grado de esbeltez de acuerdo a la longitud de la columna es de 17,36.

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_{Pc}}}$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 * 3000\text{MPa}}{50\text{MPa}}}$$

$$C_c = 34,41$$

La relación de esbeltez C_c según la resistencia a la rotura del Polietileno de Tereftalato (PET) es de 34,41.

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3\left(\frac{Le}{r}\right)}{8Cc} - \frac{(Le/r)^3}{8Cc^3}$$

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3(17,36)}{8 \cdot 34,41} - \frac{(17,36)^3}{8(34,41)^3}$$

$$FS = 1,83$$

El factor de seguridad según la AISC (American Institute of Steel Construction) es de 1,83.

$$\sigma_T = \left[1 - \frac{(Le/r)^2}{2Cc^2}\right] * \frac{\sigma_{PC}}{FS}$$

$$\sigma_T = \left[1 - \frac{(17,36)^2}{2(34,41)^2}\right] * \frac{50 \text{ MPa}}{1,83}$$

$$\sigma_T = 23,84 \text{ MPa}$$

Tenemos entonces como resultado un esfuerzo de trabajo de 23,84 MPa, ubicándonos así en una posición de pandeo inelástico.

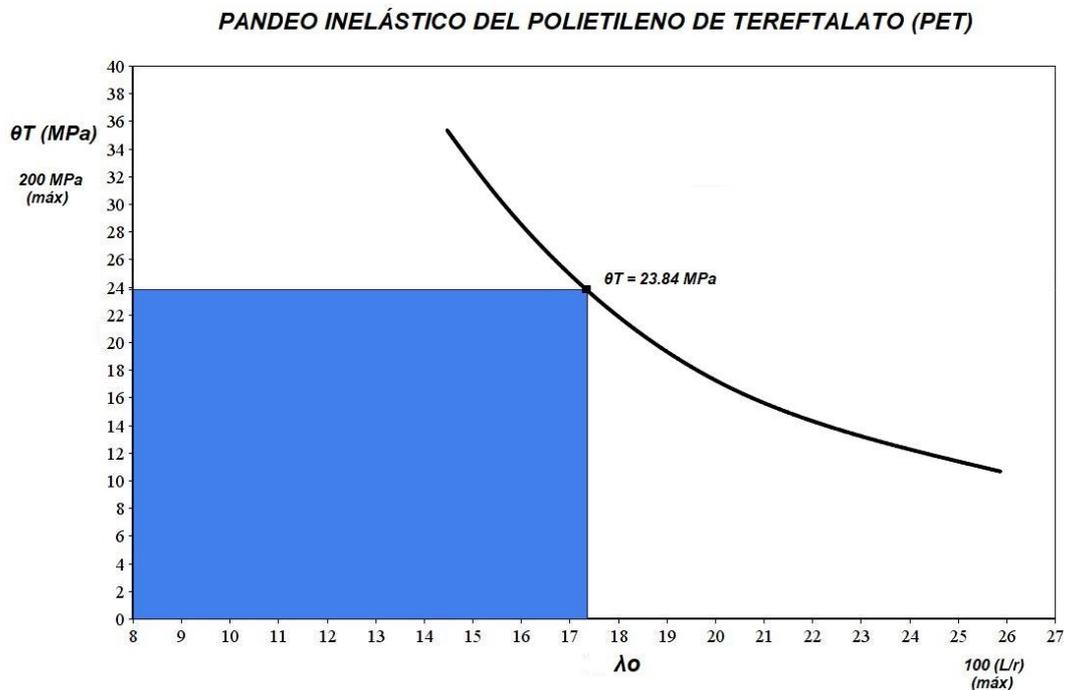


Figura 3. 1 Pandeo Inelástico del Polietileno de Tereftalato (PET).

La sección coloreada indica que se presenta un pandeo inelástico con respecto al Polietileno de Tereftalato (PET).

3.4. Esfuerzo Crítico de las Probetas

El esfuerzo crítico que presenta cada una de las probetas sometidas a esfuerzos de pandeo es el siguiente:

Tabla 3. 4 Esfuerzo Crítico de las Probetas.

MUESTRA	CARGA MÁXIMA DE RESISTENCIA AL PANDEO (kN)	ESFUERZO CRÍTICO (P/A → MPa)
Muestra N°1	139,02	55,61
Muestra N°2	175,64	70,26
Muestra N°3	156,71	62,68
Muestra N°4	135,20	54,08
Muestra N°5	160,35	64,14
Muestra N°6	186,99	74,8
Muestra N°7	98,65	38,26
Muestra N°8	68,74	27,49
Muestra N°9	81,02	32,41
Muestra N°10	65,91	26,36

De los resultados mostrados en la tabla 3.4 podemos deducir que al presentarse valores menores en comparación al esfuerzo de trabajo del Polietileno de Tereftalato (PET), no se da un sometimiento de pandeo como tal, los resultados conducen a que los ensayos realizados fueron de compresión simple más que de pandeo.

3.4.1 Comparación Compresión - Pandeo

Haciendo una comparación con estudios anteriores de ensayos de resistencia a la compresión simple de probetas fabricadas con la misma composición, verificamos lo antes mencionado y tenemos lo siguiente:

Tabla 3. 5 Comparación de resultados con ensayos a la Compresión Simple.

MUESTRA	* RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)	ESFUERZO CRÍTICO (P/A → MPa)
Muestra N°1	75,71	55,61
Muestra N°2	47,45	70,26
Muestra N°3	65,76	62,68
Muestra N°4	53,84	54,08
Muestra N°5	65,85	64,14
Muestra N°6	35,87	74,8
Muestra N°7	58,91	38,26
Muestra N°8	75,22	27,49
Muestra N°9	69,37	32,41
Muestra N°10	64,27	26,36

* Los valores de resistencia a la compresión simple expresados en la tabla 3.5 fueron tomados de la tesis de grado de Daniel Rodríguez Andrade, Universidad del Azuay.

Como se puede apreciar, en la tabla 3.5 se exponen resultados de ensayos anteriores con sometimiento de probetas a compresión simple y se puede deducir que los valores obtenidos en el estudio actual, al estar muy próximos a los del estudio anterior, se inclinan a ensayos de compresión y no de pandeo como tal.

En el cálculo de los elementos comprimidos y en la comprobación de la inestabilidad de la pieza sometida a pandeo, influye decisivamente el módulo de elasticidad. El valor relativamente bajo de este módulo reduce la resistencia a la compresión en piezas esbeltas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Durante este estudio no solo se determinó la resistencia de carga máxima que alcanzó cada probeta, sino también las propiedades, beneficios y características del polímero Polietileno de Tereftalato (PET) y arena común de construcción, de lo cual podemos hacer énfasis y destacar lo siguiente:

- ✓ Si bien las Muestras N°6 y 2 son las más resistentes al esfuerzo de pandeo de 74,80 MPa y 70,26 MPa respectivamente, no son las óptimas a ser consideradas en fortificación minera, ya que su rotura fue brusca y repentina. Pero, lo que se puede destacar es que el agregado de arena de malla N°40, tamaño 0,420 mm. y malla N°30, tamaño 0,595 mm. respectivamente juega un papel muy importante, pues hace de las mezclas 80% PET – 20% Arena y 90% PET – 10% Arena un material notoriamente más resistente, dando paso a una estabilidad estructural sobresaliente.
- ✓ Por otro lado, las Muestras N°4 y 7 con un esfuerzo de pandeo de 54,08 MPa y 38,26 MPa, si bien no tuvieron una rotura total, presentaron una resistencia media al esfuerzo de pandeo en comparación a otros resultados obtenidos, en este caso una vez más la arena de malla N°30, tamaño 0,595 mm. y malla N°40, tamaño 0,420 mm. fue la empleada en las mezclas con los mismos porcentajes de material, es decir 70% PET – 30% Arena para ambos casos, lo que nos lleva a definir que el agregado con estas características da como resultado una composición más consistente y resistente.
- ✓ Una de las muestras que proporcionó un resultado positivo es la Muestra N°1, con esfuerzo de pandeo de 55,61 MPa, esta probeta destacó indudablemente pues fue fabricada con composición 100% PET – 0% Arena, es decir, fue totalmente pura, no presentó rotura total, únicamente leves y escasas fracturas, lo que nos lleva a precisar que el polímero Polietileno de Tereftalato (PET) indudablemente es un material que proporciona rigidez y resistencia en comparación con aquellas obtenidas del material compuesto.
- ✓ Finalmente, la Muestra N°5 con un esfuerzo de pandeo de 64,14 MPa, es la que mejores resultados proporcionó y la que más destacó de acuerdo a sus características pues la relación resistencia – defromación fue bastante aceptable. Esta probeta fue fabricada con composición 90% PET – 10% Arena de malla N°40, tamaño 0,420 mm. Si bien la resistencia de la misma no fue la más alta, se pudo destacar una resistencia

media con rotura parcial y estallido suave, características que en conjunto se complementan de manera positiva, pues al presentarse una falla en una posible estructura de fortificación fabricada con ésta composición, es importante que ésta se dé lentamente y por etapas, de manera que sea factible el reemplazo de aquellos cuerpos fracasados, es por eso que ésta composición sería la más aceptable en condiciones de resistencia al esfuerzo de pandeo.

- ✓ El esfuerzo que se obtuvo luego de los cálculos respectivos con las ecuaciones de la AISC (American Institute of Steel Construction) y de acuerdo a comparaciones con estudios anteriores de ensayos de compresión en el mismo material, conduce entonces a determinar que más que un esfuerzo de pandeo, el material empleado presenta esfuerzo de compresión simple, pues los valores están más cercanos a este tipo de ensayo.
- ✓ Los elementos fabricados con este material compuesto no se pueden considerar como columnas, ya que al tener una relación de esbeltez menor que 30, es tan robusto que cuenta con poca o ninguna tendencia a pandearse, es decir, los pilotes en minería no actúan ante esfuerzos de pandeo, más bien el esfuerzo al que responden es al de compresión simple.
- ✓ Es importante mencionar el proceso de fabricación de las probetas, ya que manipularlas correctamente, homogenizar las mezclas en su totalidad y la presión que se ejerce sobre las mismas al moldearlas, son puntos claves para su óptimo desempeño en cuanto a capacidad de resistencia.

Es necesario resaltar que el polímero empleado en este estudio es relativamente económico y contribuye positivamente con el medio ambiente, su duración en fortificación podría ser de hasta 20 años en comparación con aquellas fortificaciones clásicas de madera que duran entre 8 y 10 años, por lo que dejarlo abierto para posteriores estudios con otro tipo de ensayos es necesario.

Recomendaciones

- ✓ Si bien la resistencia al esfuerzo de pandeo de la mezcla Polietileno de Tereftalato (PET) y arena, en diferentes composiciones, proporcionan resultados exitosos y bastante buenos, es necesario el análisis de otros tipos de esfuerzos que permitan hacer una comparación de respuestas ante tales esfuerzos, pero con las mismas características de composición y tamaño en cuanto a fabricación de probetas.
- ✓ Se puede afirmar que la resistencia al esfuerzo de pandeo que soportan estas composiciones y materiales es baja en comparación a otros materiales, pero sin duda alguna, esto se puede modificar a través de innovación en diseño. Una de las opciones que mejoraría la fabricación de estas probetas sería la manipulación y fundición de materiales, como por ejemplo el uso de un horno rotatorio. Lo que se lograría con esta opción es que la mezcla se homogenice de mejor manera y se reduzca la intervención humana durante el proceso, garantizando así una producción más técnica, con menos contacto, ya que este tipo de polímero emite ciertos gases tóxicos, razón por la cual es indispensable el uso de equipos de protección personal.
- ✓ No se descarta la posibilidad de agregar elementos que proporcionen flexibilidad al compuesto, lo que haría que estos materiales sean quizás más resistentes a este tipo de esfuerzos.
- ✓ Este tipo de polímero que se ha estudiado si bien es inflamable, puede también ser controlado a través de la adición de retardantes de flama que consigan convertir al polímero en un material que no combustione.
- ✓ El ensayo de resistencia de las diferentes probetas demostró que el Polietileno de Tereftalato (PET) y arena de construcción proporcionan estabilidad y consistencia, razón por la cual es importante considerar que el uso de cada uno de los materiales debe ser en proporciones determinadas, de tal manera que no resten las propiedades y características de cada uno de ellos pero que a su vez brinden resistencia ante roturas o fallos.
- ✓ El uso de agentes desmoldantes ayuda a formar una barrera física que permite un desmoldado perfecto para la mayoría de aplicaciones de prefabricado, es por eso que pueden ser de gran ayuda para facilitar la salida o extracción del elemento.
- ✓ Establecer un estudio de fiabilidad de las estructuras que advierta la posible rotura de las mismas, con la finalidad de buscar reemplazos inmediatos a los cuerpos o elementos afectados.

- ✓ Generar una matriz experimental más desarrollada, con porcentajes diferentes de Polietileno de Tereftalato (PET) y arena, a los ya estudiados y ensayados.
- ✓ Es importante también mencionar el cuidado personal que debe existir tanto en la etapa de fabricación de probetas como en la fase de ensayos, pues en la primera se manejan elevadas temperaturas y materiales tóxicos y en la segunda, el material se fractura brusca, repentinamente y con gran dispersión de energía de deformación.

BIBLIOGRAFÍA

- Arioğlu, C. B.-E. (1987). Diseño de Ademes en Minas. Limusa S.A.
- Bartlett, T. M.-J. (1988). Túneles. Planeación, diseño y construcción. Limusa S.A.
- Bayo, J. E. (1839). Elementos de Laboreo de Minas. Madrid.
- Bercero, R. G.-G. (1997). Los Plásticos y el Tratamiento de sus Residuos. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Edward F. Byars, R. D. (1978). Mecánica de Cuerpos Deformables. Nueva York, E.U.A.: Educational Publishers.
- Ferdinand P. Beer, J. T.-D. (1982). Mecánica de Materiales. McGraw - Hill / Interamericana Editores S.A.
- Frundt, G. (1989). Iniciación a la Química de los Plásticos. Barcelona: Hanser.
- Goodno, J. M.-B. (2009). Mecánica de Materiales. Cengage Learning Editores, S.A.
- Gorka, C. G. (2009). Proyecto de Diseño e Implementación de Planta para Reciclado Mecánico de PET.
- Hibbeler, R. C. (2006). Mecánica de Materiales. México: Pearson Educación.
- López, A. J. (2010). Manual de Edafología. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- López, C. (2016). Reciclado de Plástico PET para Obtención de Fibra Textil.
- M. Casanova, W. V. (2004). Guía de Edafología. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- McCormac, J. C. (1971). Diseño de Estructuras Metálicas. México: Editorial, registro número 663.
- Modernos, R. (1990). Ciencia y Tecnología de los Materiales Plásticos. Madrid: CSIC.
- Pavel M., H. S. (2017). Procedimiento para Realizar los Ensayos a Pandeo. Ciencias Holguín.
- Richardson, L. . (1999). Industria del Plástico. Paraninfo.

Rodríguez, D. (2018). Determinación del Uso de Plástico PET como Alternativa al Uso de Madera en Fortificación Minera. Cuenca: Universidad del Azuay.

Rodríguez, J. H.-J. (2010). Estudio de Factibilidad para Reciclar Envases Plásticos de PET en la ciudad de Guayaquil.

Salazar, M. C.-W.-W.-O. (2004). Guía de Edafología. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Singer, P. . (2008). Resistencia de Materiales. Alfaomega Grupo Editor S.A.

Villafuerte, A. Q.-E. (2011). Planta de Reciclado Polietilentereftalato. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.

ANEXOS

Anexo 1 Propiedades del Polietileno de Tereftalato (PET).

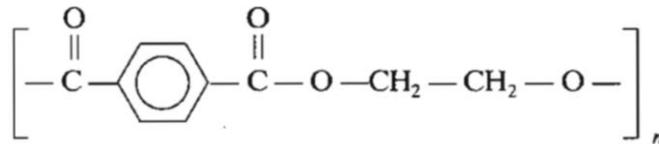
Nombre	Estado	Densidad (g/cm3)	Módulo elástico a tracción [ksi(Gpa)]	Resistencia a la rotura (%)	Elongación a la rotura (%)	Tg (°C)	Tm (°C)	Conductividad térmica (W/m-K)	Resistencia eléctrica (Ω-m)	Coefficiente de dilatación [(°C) ⁻¹ ·10 ⁻⁶
Poli (tereftalato de etilo)	0-30% cristalino	1,29 - 1,40	400 - 600 (2,76 - 4,14)	7,0 - 10,5 (48 - 72)	30 - 300	73 - 80	245 - 265	0,14	10 ¹²	65

Fuente: Callister.

Anexo 2 Propiedades de la Madera

Especie (madera)	País/ Región de origen	Peso especif. kg/m3	E Kg/cm2	Coeficientes de trabajo						Obs.
				Tracción kg/cm2	Compresión		Flexión kg/cm2	Corte		
					// a las fibras kg/cm2	Normal a las fibras kg/cm2		// a las fibras kg/cm2	Normal a las fibras kg/cm2	
Pino Tea	Extranjero	780	90000	90	50	20	100	15	30 - 40	Pino Oregon
Pino Spruce	Extranjero	500	75000	70	45	15	70	8	40	Pino Brasil
Roble	Extranjero	800	140000	100	80	35	100	15	70	
Cedro	Paraguay / Argentina	700	102000	50	50	20	50	10	45	
Tipa	Argentina	690	120000	100	60	30	100	13	50	
Alamo	Argentina	400	80000	40	15	10	40	7	12	Sauce, Alerce
Curupay Colorado	Argentina	1100	150000	120	100	40	120	18	80	Duración bajo agua
Curupay Negro	Argentina	1100	134000	100	75	38	100	23	70	Duración bajo agua
Curupay Blanco	Argentina	900	136000	100	60	20	100	20	50	Poca duración
Cohihué	Argentina	620	102000	40	30	5	40	10	25	Obras de taller
Guayacan Negro	Argentina	1150	37000	75	35	55	75	20	45	Duración bajo agua y tierra

Anexo 3 Estructura Química del Polietileno de Tereftalato (PET).



Fuente: Callister.

Anexo 4 Tamizado de Arena de Grano Grueso y Arena de Grano Fino.



Anexo 5 Ejemplificación del pesaje del Polietileno de Tereftalato (PET).



Anexo 6 Ejemplificación del pesaje de la Arena.



Anexo 7 Colocación de muestras en los soportes y equipo HUMBOLDT.



Anexo 8 Muestra N°1 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.



Anexo 9 Muestra N°2 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.



Anexo 10 Muestra N°3 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.



Anexo 11 Muestra N°4 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.



Anexo 12 Muestra N°5 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.



Anexo 13 Muestra N°6 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.



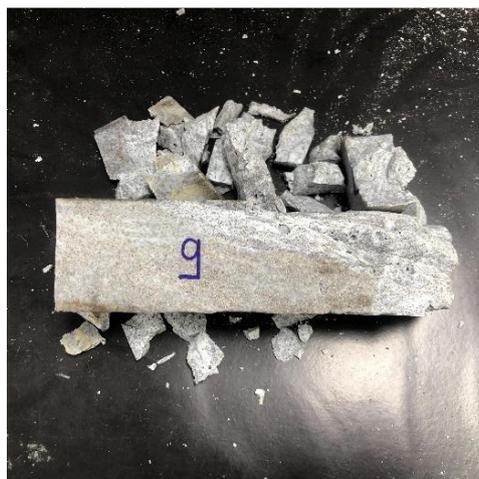
Anexo 14 Muestra N°7 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.



Anexo 15 Muestra N°8 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.



Anexo 16 Muestra N°9 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.



Anexo 17 Muestra N°10 después del sometimiento a esfuerzo de Pandeo.

