



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

**“Caracterización de la Resistencia al Pandeo de las maderas
más utilizadas en fortificación de túneles, bajo diferentes
condiciones de humedad.”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título:
INGENIERO EN MINAS

Autor:
FERNANDA KARINA ENDERICA ORTEGA

Director:
ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA, ECUADOR

2019

DEDICATORIA

A mis padres Soledad Ortega y Hernán Enderica quienes confiaron en mí y supieron desde el inicio de mi vida inculcar buenos valores, apoyándome para poder alcanzar mis sueños que día a día se hacen realidad.

A mis hermanas Andrea Torres y Carla Enderica por ser un apoyo incondicional y ejemplo a seguir.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios que durante este camino supo mantenerme firme y decidida para alcanzar este gran logro.

A mis padres y hermanas que estuvieron en cada paso de mi vida universitaria luchando conmigo e incentivándome para ser mejor todos los días de mi vida.

A mis profesores que formaron parte de este aprendizaje que durante este camino supieron comprenderme, ayudarme e impulsarme para nunca desistir; de manera muy especial agradezco al Ing. Patricio Feijoo y al Ing. Federico Auquilla por su gran enseñanza moral y ética que han dejado en mí, quienes supieron extenderme su mano cuando más lo necesitaba

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
 INTRODUCCIÓN	 1
 CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	 2
1.1 Fortificación en minas.....	2
1.1.1 Tipos de fortificación	3
1.2 Características generales de las maderas usadas en fortificación.....	5
1.3 Propiedades de las maderas usadas en fortificación.....	8
1.3.1 Propiedades mecánicas de las maderas	10
1.3.2 Resistencia al pandeo de las maderas.....	12
1.3.3 Carga crítica de Euler	14
1.3.4 Límites de aplicación de la fórmula de Euler.....	15
1.4 Humedad	17
1.4.1 Factores que afectan la madera.....	18
1.4.2 Cálculo del contenido de humedad	18
1.5 Influencia de la Humedad	19
 CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	 21
2.1 Ubicación geográfica	21
2.2 Clima.....	22
2.3 Geología	23
2.3.1 Geología regional	23
2.3.2 Geología local	24

2.4. Vegetación de la zona	26
----------------------------------	----

CAPÍTULO III: DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

3.1 Descripción de las muestras	29
3.1.1 Características de las muestras.....	29
Eucalipto	29
Pino	31
Teca.....	33
3.2 Descripción de métodos de experimentación.....	35
3.2.1 Ejecución experimental de las muestras	36
3.2.2.- Análisis de muestras	37
3.3 Interpretación de los resultados.....	38
3.3.1.- Tablas de resultados.....	38
3.3.2.- Gráficas de resultados.....	39
3.3.2.1.- Gráficas de contenido de humedad.....	39
3.3.2.2.- Gráficas de contenido de humedad vs esfuerzo máximo.....	41
3.4 Esfuerzo crítico de las probetas.....	42
3.4.1 Fórmulas a utilizar.....	43
3.4.1.1 Esbeltez de probetas.....	43
3.4.1.2.- Determinación del esfuerzo de trabajo mediante fórmulas de AISC.	43
3.4.1.3.- Factor de seguridad.....	44
3.4.1.4.- Gráficas de resultados de Pandeo Inelástico.....	45

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....

BIBLIOGRAFÍA.....

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Fortificación activa.....	4
Figura 1.2.-Fortificación pasiva	4
Figura 1.3.- Fortificación con madera.....	5
Figura 1.4.- Corte de madera y sus componentes	6
Figura 1.5.- Flexión lateral.....	12
Figura 1.6.- Resistencia al Pandeo	13
Figura 1.7.- Carga crítica de Euler	14
Figura 1.8.- Curva de tensión crítica.....	16
Figura 1.9.- Curva de pandeo y modos de fallo	16
Figura 1.10.- Límites de aplicación de la fórmula de Euler.....	17
Figura 1.11.- Influencia de la humedad en la madera	20
Figura 2.1.- Mapa de Ubicación del cantón Camilo Ponce Enríquez	21
Figura 2. 2.- Mapa Bioclimático del Ecuador	22
Figura 2. 3.- Mapa Geológico del Ecuador	24
Figura 2. 5.- Mapa Geológico de Ecuador	25
Figura 2. 6.- Mapa de la cobertura vegetal natural de Camilo Ponce Enríquez.....	27
Figura 2. 7.- Tipo de cobertura vegetal natural y su grado de alteración de Camilo Ponce Enríquez.....	27
Figura 3. 1.- Mediciones de las muestras de madera	29
Figura 3. 2.- Incremento del contenido de humedad del Eucalipto	39
Figura 3. 3.- Incremento de contenido de humedad del Pino	40
Figura 3. 4.- Incremento de contenido de humedad de la Teca	40
Figura 3. 5.- Contenido de humedad vs Esfuerzo máximo Eucalipto.....	41
Figura 3. 6.- Contenido de humedad vs Esfuerzo máximo Pino.....	41
Figura 3. 7.- Contenido de humedad vs Esfuerzo máximo Teca	41
Figura 3. 8.- Pandeo Inelástico del Eucalipto	46
Figura 3. 9.- Pandeo Inelástico del Pino	46
Figura 3. 10.-Pandeo Inelástico del Teca	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.- Resistencia al pandeo de la madera para minas.....	14
Tabla 3. 1 Tabla de tiempo de sumergimiento de las maderas en agua	28
Tabla 3. 2.- Características de la muestra 1	29
Tabla 3. 3.- Características de la muestra 2	30
Tabla 3. 4.- Características de la muestra 3	30
Tabla 3. 5.- Características de la muestra 4	30
Tabla 3. 6.- Características de la muestra 5	31
Tabla 3. 7.- Características de la muestra 6	31
Tabla 3. 8.- Características de la muestra 7	31
Tabla 3. 9.- Características de la muestra 8	32
Tabla 3. 10.- Características de la muestra 9	32
Tabla 3. 11.- Características de la muestra 10	32
Tabla 3. 12.- Características de la muestra 11	33
Tabla 3. 13.- Características de la muestra 12	33
Tabla 3. 14.- Características de la muestra 13	33
Tabla 3. 15.- Características de la muestra 14	34
Tabla 3. 16.- Características de la muestra 15	34
Tabla 3. 17.- Características de la muestra 16	34
Tabla 3. 18.- Características de la muestra 17	35
Tabla 3. 19.- Características de la muestra 18	35
Tabla 3. 20.- Medidas de las muestras de madera.....	36
Tabla 3. 21.- Contenido de humedad en las muestras de Eucalipto.....	36
Tabla 3. 22.- Contenido de humedad en las muestras de Pino.....	37
Tabla 3. 23.- Contenido de humedad en las muestras de Teca	37
Tabla 3. 24.- Muestras de eucalipto. Esfuerzo Máx. vs % humedad	38
Tabla 3. 25.- Muestras de pino. Esfuerzo Máx. vs % de humedad.....	38
Tabla 3. 26.- Muestras de teca. Esfuerzo Máx. vs %de humedad.....	39
Tabla 3. 27.- Esfuerzo crítico del Eucalipto.....	42
Tabla 3. 28.- Esfuerzo crítico del Pino.....	42
Tabla 3. 29.- Esfuerzo crítico de la Teca	42
Tabla 3. 30.-Resultados de λ_o	44
Tabla 3. 31.- Resultados del esfuerzo de trabajo	45

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Probetas naturales sin sumergimiento en agua.....	54
Anexo 2: Probetas una semana sumergidas en agua.....	54
Anexo 3: Probetas dos semanas sumergidas en agua.....	55
Anexo 4: Probetas cuatro semanas sumergidas en agua	55
Anexo 5: Probetas ocho semanas sumergidas en agua	56
Anexo 6: Probetas doce semanas sumergidas en agua.....	56
Anexo 7: Acoples de acero para la máquina Humboldt.....	57

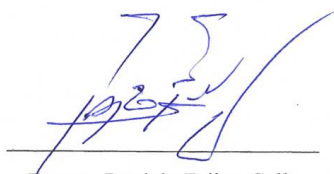
**CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA AL PANDEO DE LAS
MADERAS MÁS UTILIZADAS EN FORTIFICACIÓN DE TÚNELES, BAJO
DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD**

RESUMEN

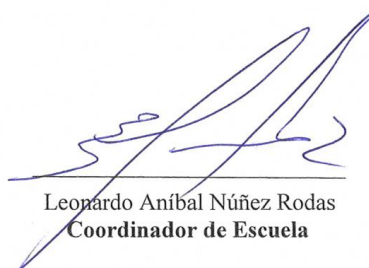
La investigación y análisis de la resistencia al pandeo de la madera más utilizada en fortificación, tiene como finalidad determinar si estos valores cambian bajo distintas condiciones de humedad.

Las probetas utilizadas en este trabajo de investigación se establecieron mediante cálculos y ensayos realizados con anterioridad, con medidas iguales teniendo en cuenta que los cortes de las mismas deberán ser de manera paralela a las fibras de crecimiento; y así determinar si son aptas para el uso seguro de fortificación minera.

Palabras Clave: fortificación, humedad, probetas.



Ernesto Patricio Feijoo Calle
Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela

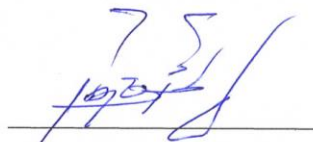

Fernanda Karina Enderica Ortega
Autor

**CHARACTERIZATION OF BUCKLING RESISTANCE IN THE MOST
BROADLY USED WOODS IN FORTIFICATION OF TUNNELS UNDER
DIFFERENT HUMIDITY CONDITIONS**

ABSTRACT

The research and analysis of buckling resistance of the most broadly used woods in fortification aims at determining if these values change under different humidity conditions. The specimens used in this research were established by calculations and tests carried out previously. These specimens had equal measures taking into account that the cuts should be parallel to the growth fibers in order to determine if they are suitable and safe for mining fortification.

Keywords: Fortification, humidity, test tubes.


Ernesto Patricio Feijoo Calle
Thesis Director
Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Faculty Coordinator
Fernanda Karina Enderica Ortega
Author
Translated by
Ing. Paúl Arpi

Enderica Ortega Fernanda Karina

Trabajo de Titulación

Ing. Patricio Ernesto Feijoo Calle

Junio 2019

CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA AL PANDEO DE LAS MADERAS MÁS UTILIZADAS EN FORTIFICACIÓN DE TÚNELES, BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD

INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad extractiva que se viene dando dentro de nuestro país desde hace algunas décadas de manera ilegal, por lo que se trata de que cada día esta sea vista de mejor manera y a su vez la extracción de minerales se realice utilizando la tecnología adecuada para causar un impacto positivo tanto en el ambiente como en la sociedad.

Como se conoce la minería dentro de nuestro país es una de las industrias que cada día tiene mayor crecimiento debido a los importantes aportes que realiza a la economía; sabiendo que genera varias plazas de trabajo tanto primarias como secundarias.

Al ejercer como ingeniero en minas se debe tener en cuenta que es uno de los trabajos que posee una tasa de alto riesgo a accidentes leves y graves; por lo tanto para la seguridad del personal que se encuentre trabajando en mina la fortificación es aquello que soporta al macizo rocoso para evitar desprendimientos o derrumbes del mismo; en este trabajo de investigación lo que se busca es poder determinar mediante análisis técnicos de laboratorio como afecta a las propiedades físicas de las maderas más utilizadas en el cantón Camilo Ponce Enríquez (eucalipto, pino y teca) si éstas son sometidas a sumergimientos en agua en diferentes periodos de tiempo; cuál sería su esfuerzo máximo a soportar aplicando fuerza para la resistencia al pandeo.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Fortificación en minas

La fortificación o sostenimiento de minas es una construcción artificial que se hace en las excavaciones subterráneas para prevenir la destrucción de las rocas circundantes y preservar las dimensiones de la sección transversal. La fortificación de minas, como una obra más de ingeniería, debe satisfacer una serie de exigencias técnicas, productivas y económicas. Es decir, el entibado debe ser simple, fuerte, barato, y efectivo. (Alvarez, 2009)

Para poder tener una amplia idea de lo que se está buscando en este trabajo de investigación debemos considerar que, la fortificación en minería subterránea como plantea Yuver Ramírez debe tener; exigencias técnicas, productivas y económicas:

Exigencias técnicas.

- Resistente: la fortificación debe ser lo suficientemente resistente para asimilar carga que sobre ella va a actuar.
- Estable: la fortificación debe conservar la forma que se le proyecta aún bajo la acción de las cargas.
- Duradera: su vida de servicio debe estar acorde con la vida de servicio de la excavación.

Exigencias de producción.

- Debe ofrecer la menor resistencia posible al paso del aire.
- Debe ocupar en la excavación el menor espacio posible.
- Debe ser segura ante el peligro de incendio.
- No debe entorpecer los procesos productivos.

Exigencias económicas.

El costo inicial y los gastos de mantenimiento durante el periodo de explotación deben ser mínimos. La mayoría de trabajos de fortificación de las excavaciones mineras son costosos, laboriosos y los menos mecanizados de todos los ciclos del laboreo, por eso es sumamente importante, si es necesario fortificar una excavación elegir correctamente la construcción de la fortificación, la cual no debe ser solamente económica, sino que además asegure las condiciones de trabajo en la excavación, durante el transcurso de todo el plazo de servicio.

Para la fortificación en minería hay que tener en cuenta las condiciones donde se van a trabajar (carga variable con el tiempo, acción de la atmósfera minera, agua subterránea, limitación de espacio, entre otros.), por eso en lo posible debemos emplear materiales lo más ligeros posible, y que ocasionen poco trabajo a la hora de instalar la fortificación; los materiales que se empleen debe poseer alta resistencia, tener un costo no muy alto, ser estables y duraderos.

1.1.1 Tipos de fortificación

De acuerdo con el mecanismo de sostenimiento, se distinguen los siguientes tipos de fortificación:

- **Fortificación activa o reforzamiento:** se orienta a restablecer el equilibrio original de los diferentes esfuerzos y, al mismo tiempo, a modificar estructuralmente la roca para hacerla “auto-soportable”. Los métodos más empleados son el anclaje de rocas (puntuales o repartidas), y las proyecciones neumáticas de hormigón (shotcrete) o mortero.



Figura 1.1.- Fortificación activa

Fuente: (Cahuana, 2014)

- **Fortificación pasiva:** es aquella en que, por razones operacionales y de seguridad, no aplica ninguna carga externa al momento de la instalación y sólo trabaja cuando el macizo rocoso experimenta alguna deformación. Los métodos más empleados son la enmaderación, los marcos metálicos (rígidos, deslizantes o articulados), el hormigón armado (vigas - marco de concreto, mampostería), shotcrete y malla.



Figura 1.2.-Fortificación pasiva

Fuente: (Cahuana, 2014)

- **Fortificación combinada:** es aquella en que, por razones operacionales y de seguridad, combina soportes y refuerzos. Los métodos más empleados son la enmaderación (reforzada con perfiles metálicos), los marcos de acero - pernos de anclaje y shotcrete, el hormigón proyectado (reforzado con cerchas o perfiles metálicos), y el shotcrete con pernos de anclaje y mallas de acero. Los soportes se deben ubicar de manera uniforme, sistemática y a intervalos apropiados.
- **Fortificación con madera:** Es la fortificación más usada a nivel de pequeña minería, debido a su menor costo y facilidad de manejo y colocación.

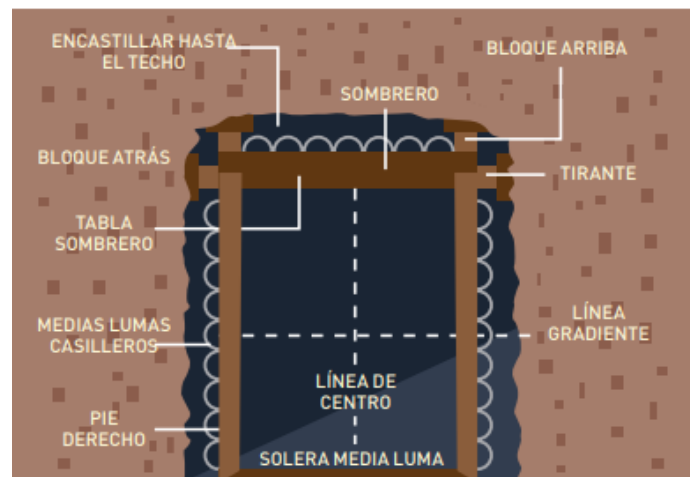


Figura 1.3.- Fortificación con madera

Fuente: (SONAMI, 2013)

1.2 Características generales de las maderas usadas en fortificación

La madera es una materia que como cualquier ser vivo está compuesta íntegramente por células (unidas mediante una membrana de lignina) que le proporcionan las diferentes propiedades físico-químicas, formando además la unidad básica de su constitución. Las células de la madera son elementos complejos que se encuentran formados por dos tipos de componentes (Primarios y Secundarios), y cuyas cantidades varían según el tipo de árbol de que se trate. Los elementos llamados primarios, están compuestos por celulosa que es un

polisacárido que forma las paredes de las células de la madera, estas células se llaman fibras, y la lignina es una sustancia cementante de la madera, el cual es un polímero 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. Los elementos llamados secundarios son importantes impregnaciones, extrañas a la propia pared celular. (Alvarez, 2009)

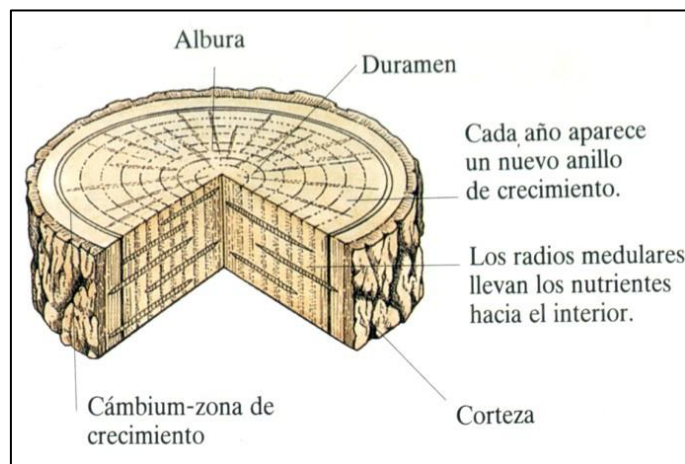


Figura 1.4.- Corte de madera y sus componentes

Fuente: (Visual, 2019)

Según Y. Ramírez los ademes de madera, son todavía un material básico de soporte para muchas minas en donde no se utiliza el acero, generalmente por aspectos económicos. La resistencia de la madera para las minas se estudia principalmente con respecto a los esfuerzos de tensión, compresión, flexión y esfuerzo cortante. La madera es un material de peso ligero, fácilmente transportable y que se maneja con facilidad en los sistemas de ademes. Un caso específico es el roble que tiene una densidad promedio de 0.73 g/cm^3 y una resistencia a la flexión de 1200 kg/cm^2 , es 11 veces más ligera, pero 2 veces más frágil que el acero. Esto hace que la madera sea un material económico cuando se usa en ademes o fortificaciones cuya vida útil sea corta.

Debido a su anisotropía, desde el punto de vista físico y mecánico en el estudio de una probeta, debe considerarse tres direcciones principales:

- Axial: paralelo al eje del árbol.
- Radial: perpendicular a la anterior y cortando el eje del árbol.
- Tangencial: normal a las dos anteriores

Variaciones de las propiedades de la madera

Los factores que condicionan las propiedades de la madera, son múltiples. En el trabajo original se estructuró de la siguiente manera:

- Condiciones por el árbol (condiciones de crecimiento)
 - Factores edáficos (hidrología y geología)
 - Factores climáticos (pluviómetro, servimetria)
 - Factores de situación (pendiente, orientación y altitud)
 - Factores de poblamiento (temperamento, método de explotación)
 - Factores intrínsecos (parte del árbol, edad, época de apeo).
- Condicionados de la madera.
- Planos de referencia (axial, radial, tangencial)
 - Estructura (corteza, leño, médula, textura, anillos de crecimiento)
 - Defectos
 - Formales

Curvatura – entrecasco – ahorquillado – oquedad

Los tres últimos invalidan a una madera para su empleo en mina.

- Estructurales

Irregularidades en los anillos – excentricidad del corazón – madera revirada – bolsas de resina – lunulados – doble albura – aludes – fendas – acebolladuras – colapso – pata de gallo – heridas.

- Alteraciones

- Hongos

Pudrición parda – pudrición blanca – pudrición azul – pudrición roja – pudrición verde – bacterias – insectos – otros seres.

Contra todas las alteraciones existen medidas preventivas o curativas.

(Rodríguez, 1989)

1.3 Propiedades de las maderas usadas en fortificación

Para elegir correctamente la madera a usar, deben considerarse dos factores fundamentales:

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

Dentro de las características más importantes de la madera como lo plantea Harriet Umerez Olabarriade, se encuentran las propiedades físicas las cuáles nos ayudan a determinar la composición de la madera en su totalidad; entre ellas podemos destacar:

- **Anisotropía**

La madera no es un material homogéneo, sino un material muy diferente según el plano o la dirección que reconsidere. Esto hace que sea necesario referenciar el plano o la sección considerada. La madera, es más resistente a los esfuerzos axiales o tangenciales, siendo también de diferente comportamiento a la dirección radial. Fernández-Golfín et al., (2000) unifica las direcciones radial y tangencial en una única denominada transversal o perpendicular a la fibra. Por tanto, el análisis de cualquier propiedad deberá ser efectuado en esas dos direcciones: la longitudinal (paralela al eje del árbol) y la perpendicular. La necesidad de considerar valores diferentes para la propiedad según esas dos direcciones representa la principal diferencia respecto de otros materiales estructurales como el hormigón y el acero.

- **Heterogeneidad**

Se puede decir que la madera es un material heterogéneo, puesto que los diferentes elementos anatómicos que la forman, se pueden combinar de forma distinta según la especie de madera considerada, pudiendo incluso existir diferencias dentro de la misma especie según su procedencia.

- **Higroscopicidad**

La madera es un material higroscópico que presenta una marcada afinidad por el agua, que hace que permanezca en equilibrio dinámico con las condiciones higrotérmicas del medio en el que se encuentre, es decir, que tiende a absorber o a perder agua según las condiciones de humedad relativa y temperatura del aire. De esta forma a cada estado ambiental corresponde un grado de humedad de la madera, llamado humedad de equilibrio higroscópico.

- **Hinchazón y merma**

La variación del contenido en humedad produce en la madera una variación de sus dimensiones. Cuando aumenta su contenido se hincha, mientras que cuando se disminuye contrae o merma. Estos movimientos solo tienen lugar cuando su contenido en humedad se encuentra por debajo del punto de saturación de las fibras, que tiene lugar aproximadamente con un 30% de humedad. A partir de ahí solo se produce un aumento de peso y su volumen permanece constante. Para analizar el fenómeno de hinchazón y merma, debe tenerse en cuenta los aspectos de la anisotropía de la madera, la inercia higroscópica y la variabilidad de las distintas especies de madera.

- **Punto de Saturación de la Pared Celular (PSPC)**

El punto de saturación de la pared celular corresponde al máximo valor de la humedad de equilibrio higroscópico, el cual tiene lugar cuando la

atmósfera circulante se encuentra totalmente saturada de vapor de agua. En este caso, no hay presencia de agua libre, pero las paredes celulares se encuentran completamente saturadas de agua. La determinación de este valor resulta dificultosa debido a que varía de una especie a otra y a los factores con los que aumenta la humedad de equilibrio. De todos modos, es común tomar el valor de un 30% para todas las maderas. Este dato es muy importante en la práctica ya que por encima de él permanecen constantes las dimensiones y las propiedades mecánicas de la madera, produciendo una merma en las dimensiones y una mejora de las propiedades mecánicas, cuando está por debajo. (Noves & Fernández-Golfín, 1992)

- **Densidad**

Se define como la relación entre su masa y su volumen, y es necesario referirla a un determinado contenido de humedad. Generalmente el contenido de humedad de referencia es el 12%. La densidad depende de la especie y es muy variable. Sus valores abarcan desde los 300Kg/m³ de las especies ligeras como la madera de balsa, hasta los 1200Kg/m³ de las maderas pesadas como el guayacán. (AITIM, 1994)

- **Dureza**

La dureza es la resistencia que opone la madera a la penetración de ciertos cuerpos extraños como ciertas herramientas, clavos, tornillos entre otros. Está relacionada con la densidad y tiene una marcada importancia en su relación con la dificultad de su trabajo. Las maderas se clasifican según su dureza en blandas, semi-blandas y duras.

1.3.1 Propiedades mecánicas de las maderas

Resistencia de la madera

De todas las fuerzas que puedan actuar en la madera; su resistencia a la tracción tiene valores más altos que la resistencia a la compresión de la madera siendo

del 50% y la resistencia al corte obtenidos (resistencia al corte) sólo el 10% de los valores de resistencia a la tracción.

La resistencia a la tracción del acero convencional es 5 a 6 veces mayor que la resistencia a la tracción de la madera, pero esta es 16 veces más ligera; por lo tanto, su relación de fuerza peso, es más favorable.

- Tracción

La mayor resistencia es en dirección paralela a las fibras y la menor, en sentido perpendicular a las mismas. La rotura en tracción se produce de forma súbita.

- Compresión

La resistencia a compresión aumenta al disminuir el grado de humedad, a mayor peso específico de la madera mayor es su resistencia, la dirección del esfuerzo al que se somete también influye en la resistencia a la compresión, la madera resiste más al esfuerzo ejercido en la dirección de sus fibras y disminuye a medida que se ejerce atravesando la dirección de las fibras.

- Flexión

El esfuerzo aplicado en la dirección perpendicular a las fibras produce un acortamiento de las fibras superiores y un alargamiento de las inferiores.

- Elasticidad

El módulo de elasticidad en tracción es más elevado que en compresión. Este valor varía con la especie, humedad, naturaleza de las solicitaciones, dirección del esfuerzo y con la duración de aplicación de las cargas.

- Resistencia al Corte

Es la capacidad de resistir fuerzas que tienden a que una parte del material se

deslice sobre la parte adyacente a ella. Este deslizamiento, puede tener lugar paralelamente a las fibras; perpendicularmente a ellas no puede producirse la rotura, porque la resistencia en esta dirección es alta y la madera se rompe antes por otro efecto

- Fatiga

Llamamos límite de fatiga a la tensión máxima que puede soportar una pieza sin romperse.

1.3.2 Resistencia al pandeo de las maderas

Los diferentes elementos que conforman una estructura pueden “fallar” por diferentes motivos, dependiendo de los materiales utilizados, tipos de cargas, ligaduras y apoyos.

Muchos de estos tipos de “fallos” se podrán evitar, dimensionando dichos elementos de tal forma, que las tensiones y deformaciones máximas que se produzcan permanezcan dentro de los límites admisibles y así se efectuarán los dimensionamientos a resistencia y a rigidez.

Pero existen otros tipos de “fallos”, como es el “fallo por inestabilidad o pandeo”, que puede tener lugar en el caso de elementos estructurales esbeltos sometidos a compresión. En estos casos, en el elemento puede aparecer una flexión lateral que puede llegar a ser grande y hacer “fallar” al elemento.

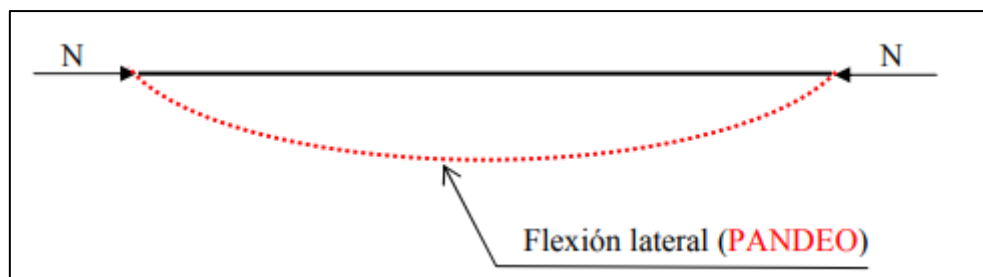


Figura 1.5.- Flexión lateral

Fuente: (Santillana, 2011)

La aparición de dicha flexión lateral, su rápido crecimiento y la pérdida total de estabilidad del elemento y el consiguiente colapso de la estructura, constituyen el estudio del Pandeo. (Santillana, 2011)

El pandeo se produce cuando se supera la resistencia las piezas sometidas al esfuerzo de compresión en el sentido de sus fibras generando una fuerza perpendicular a ésta, produciendo que se doble en la zona de menor resistencia. (Calleros, 2012)

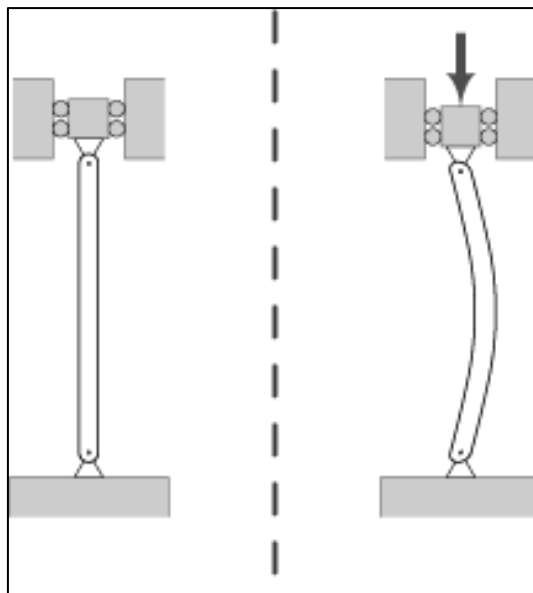


Figura 1.6.- Resistencia al Pandeo

Fuente: (Calleros, 2012)

Esta resistencia se mide paralelamente a las fibras, en el eje de la madera, según el diámetro y la longitud aproximada podremos calcular la resistencia al pandeo según la siguiente tabla:

La tabla que se muestra a continuación es para elementos de secciones circulares.

Tabla 1.1.- Resistencia al pandeo de la madera para minas

Resistencia al flambeo (o pandeo) de la madera para minas					
Diámetro [d(cm)]	Longitud [l(m)]	Esbeltez $\lambda=4l/d$	Resistencia al flambeo (kg/cm ²)	Densidad (kg/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
16.0	2.00	59.0	214.5	0.638	21.3
16.1	2.00	49.0	233.9	0.664	24.3

Fuente: (Alvarez, 2009)

1.3.3 Carga crítica de Euler

El estudio del pandeo, que es debido a Euler, se planteó como un estudio de equilibrio.

Así, si se tiene una pieza sometida a una fuerza P de compresión y se encuentra en equilibrio, posición (1), su equilibrio podrá ser: Estable, Inestable o Indiferente.

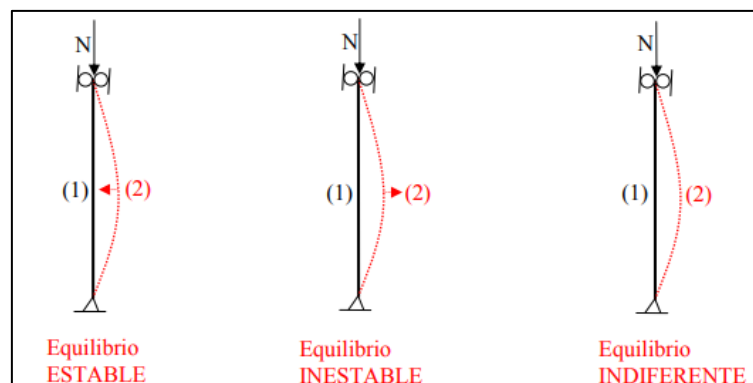


Figura 1.7.- Carga crítica de Euler

Fuente: (Santillana, 2011)

- Equilibrio Estable: Si al separarla un poco a la posición (2) y soltar, vuelve a la posición (1).
- Equilibrio Inestable: Si al separarla un poco a la posición (2) y soltar, se aleja de la posición (1).
- Equilibrio Indiferente: Si al separarla un poco a la posición (2) y soltar, se queda en la posición (2).

El que una pieza dada adopte uno u otro tipo de equilibrio, va a depender del valor de la carga P de compresión a la que se le someta.

Se denomina: Carga Crítica (P_{cr}): “al valor de la carga P de compresión que hace que se alcance el equilibrio indiferente”

Así pues, se tendrá:

- Si $P = P_{cr}$ —————> Equilibrio Indiferente
- Si $P < P_{cr}$ —————> Equilibrio Estable
- Si $P > P_{cr}$ —————> Equilibrio Inestable

Naturalmente se deberá hacer trabajar a las piezas con $P < P_{cr}$, para que se encuentren siempre en equilibrio estable.

1.3.4 Límites de aplicación de la fórmula de Euler

La figura a continuación, representa la curva de la tensión crítica de Euler, sólo va a ser válida hasta un cierto punto P , que corresponde a una esbeltez λ_{lim} , que es la esbeltez para la cual: P_{cr} (tensión crítica) = f_y (tensión del límite elástico).

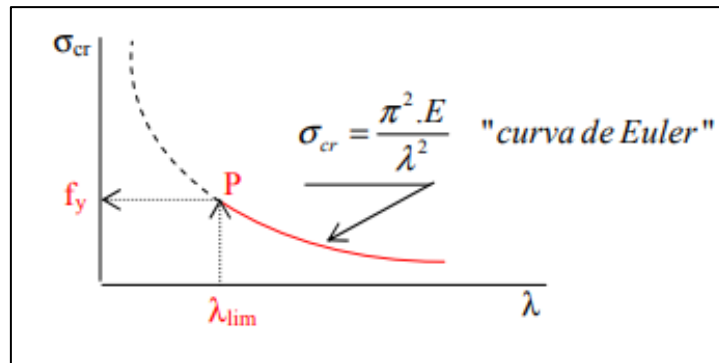


Figura 1.8.- Curva de tensión crítica

Fuente: (Santillana, 2011)

Ello es debido a que en la deducción de la fórmula para la obtención de la carga crítica P_{cr} , se utiliza la ecuación diferencial de la elástica y ésta sólo es aplicable para los casos en que $E = \text{cte}$ o lo que es lo mismo cuando $\sigma \leq f_y$. Además, al alcanzarse la tensión del límite elástico, el fallo se produciría por haberse alcanzado la resistencia a la compresión de la sección.

Se representa la curva de pandeo de Euler y los modos de fallo.

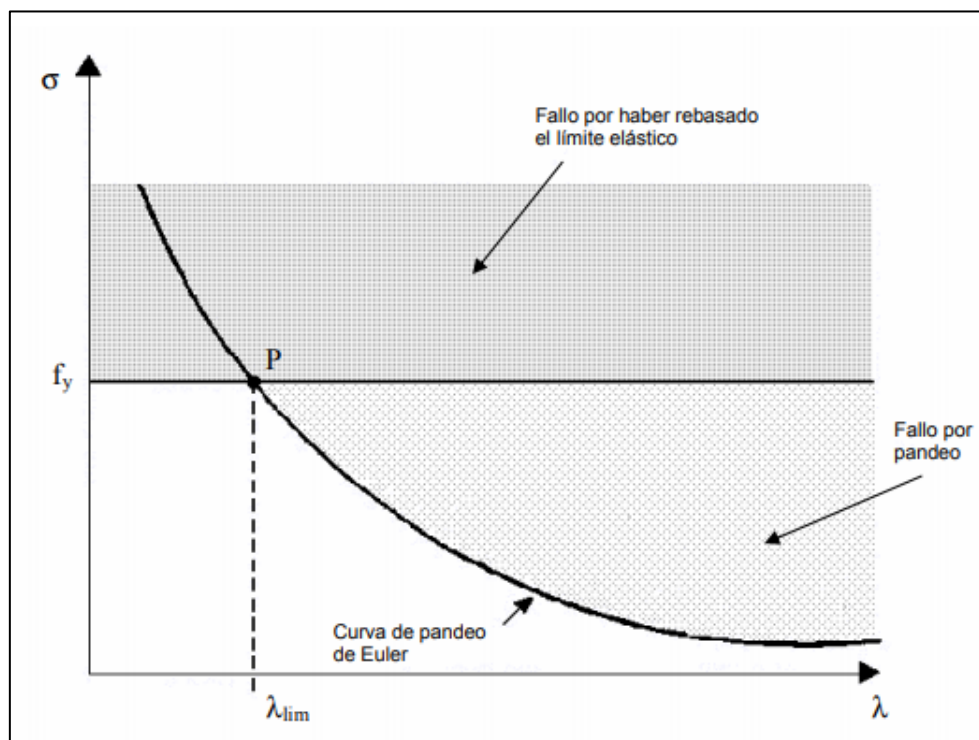


Figura 1.9.- Curva de pandeo y modos de fallo

Fuente: (Santillana, 2011)

Así pues, tendremos que para poder utilizar la curva de Euler se habrá de verificar:

$$\sigma \leq f_y \rightarrow \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq f_y \rightarrow \lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}} \Rightarrow \lambda_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}}$$

Figura 1.10.- Límites de aplicación de la fórmula de EULER

Fuente: (Santillana, 2011)

- para esbelteces: $\lambda \geq \lambda_{\text{lim}}$ $\longrightarrow$ SI se podrá aplicar la curva de Euler.
- para esbelteces: $\lambda \leq \lambda_{\text{lim}}$ $\longrightarrow$ NO se podrá aplicar la curva de Euler.

(Santillana, 2011).

1.4 Humedad

El contenido de humedad de la madera se define como la masa de agua contenida en la madera expresada como porcentaje de la masa anhidra. Dado que la masa se determina pesada, esta definición resulta equivalente si se utiliza el peso en lugar de la masa. El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera, es seguramente el más importante de todos los que dependen de este material, dado que afecta a todos los procesos de transformación de la madera. (Olabarria, 2015)

En algunos sectores se produce el debilitamiento estructural de la madera por exceso de humedad el cual se vuelve en un ambiente propicio donde proliferan los hongos, los cuales son vegetales inferiores de talla microscópica cuyo cuerpo está formado por filamentos llamados hifas.

Se difunden por el aire por medio de esporas de color verde que se producen a millones (polinización Anemófila), y que germinan en cualquier lugar idóneo para su desarrollo al cabo de una hora, repitiéndose el proceso de difusión y nueva germinación. Se alimentan de sustancias orgánicas que transforman. Los que lo hacen de la madera -viva o muerta- se denominan hongos xilófagos y los

hay de varios tipos según afecten a ésta, como por ejemplo los cromógenos, que son los responsables de modificar el color de la madera. También llegan a afectar sus propiedades mecánicas y dinámicas. Para la subsistencia necesitan oxígeno, y una adecuada temperatura (20°-25°C) y abundante agua (humedad ambiente, 50-60% H.R.), y con estas condiciones pueden degradar la madera hasta su total destrucción.

1.4.1 Factores que afectan la madera

Agua: Es el componente más importante de la madera, alrededor del 25% del contenido del agua está en las células vivas y el 75% restante está en los huecos de las fibras. Un árbol recientemente cortado contiene del 35% al 50% de agua. La pérdida de agua en los huecos se debe a la temperatura y a la humedad relativa del medio ambiente, por ejemplo, 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 o porcentaje de agua, mientras que la tenga más de 30% de agua se considera húmeda. (Alvarez, 2009)

1.4.2 Cálculo del contenido de humedad

El agua presente en la madera, o en un producto de madera, se expresa como el contenido de humedad. Convencionalmente, el contenido de humedad (CH) se define como la relación porcentual del peso del agua contenida en la madera, respecto al peso seco (libre de humedad) de la madera:

$$CH = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso seco al horno}} \times 100$$

Existen varios métodos para determinar el CH de madera; se describen a continuación los dos más importantes.

- **Método gravimétrico o por diferencia de peso**

De una pieza de madera se corta una muestra e inmediatamente se pesa para obtener el peso inicial (P_i), luego se coloca en un horno a una temperatura máxima de 105 grados Celsius hasta que se obtenga peso constante de la muestra, el que será el peso seco al horno o peso final (P_o).

Para calcular el contenido de humedad (CH) se aplica la siguiente fórmula:

$$CH = \frac{P_i - P_o}{P_o} \times 100$$

- **Método eléctrico**

Las propiedades eléctricas de la madera más importantes son su resistencia al paso de una corriente eléctrica y sus características como material dieléctrico. Estas se utilizan como base para la fabricación de aparatos destinados a medir el contenido de humedad de la madera. Estos medidores eléctricos tienen la ventaja de que las lecturas del contenido de humedad son inmediatas y es una determinación no destructiva; pero presentan ciertas limitantes, principalmente el rango de confiabilidad (6 a 25% CH), se debe corregir la lectura según especie, temperatura y dirección del grano en la madera. (Foglia, 2005)

1.5 Influencia de la Humedad

Según el U. S Forest Products Laboratory (Laboratorio para productos forestales de Estados Unidos), si hay un incremento de 1% en el contenido de humedad se reduce la resistencia a la tensión a lo largo de la fibra en casi un 3%. Según muchos investigadores, la resistencia máxima a la tensión se alcanza cuando el contenido de humedad está entre el 8% y 10%. Además, los nudos y las muescas también reducen la resistencia de la madera, puesto que la fibra se deforma al pasar en torno a ellos, las fibras de los nudos forman un ángulo recto con las de madera.

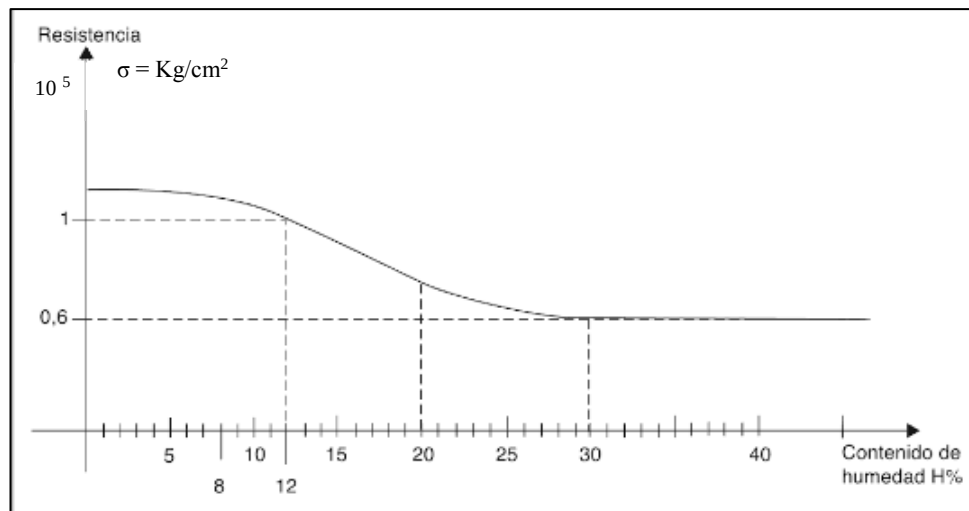


Figura 1.11.- Influencia de la humedad en la madera

Fuente: (Peña & Rojas, 2006)

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación geográfica

El cantón Camilo Ponce Enríquez está ubicado al oeste de la provincia del Azuay, levantándose sobre la extensa llanura costera de esta provincia. Sus coordenadas en el centro cantonal son: latitud 9661866, longitud 639587 y de altura 43 m.s.n.m.

El territorio de Camilo Ponce Enríquez tiene una superficie de 644 km.² Limita al norte con los cantones Cuenca y Naranjal; al sur con el cantón El Guabo y Pucará; al este con los cantones Santa Isabel y Cuenca; y al oeste con los cantones Guayaquil y Balao.

Presenta una topografía regular en la parte baja en donde se encuentran las comunidades con mayor población; otra parte del territorio es topográficamente irregular con pendientes pronunciadas, en estos terrenos se encuentran ubicadas comunidades que poseen interés turístico como Bella Rica, San Gerardo y La Unión. (Miller, 2011)

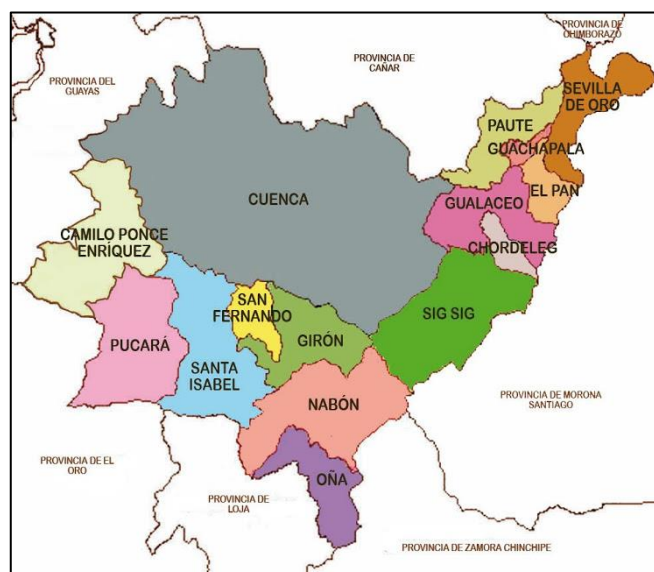


Figura 2.1.- Mapa de Ubicación del cantón Camilo Ponce Enríquez

Fuente: (Sánchez, 2014)

2.2 Clima

De acuerdo al Mapa Bioclimático del Ecuador, la zona a los alrededores de Ponce Enríquez es una región subtropical con temperaturas que oscilan entre los 22° y 30° C. La más alta se registra entre los meses de diciembre a julio y la más baja entre agosto y noviembre.

La zona se caracteriza por presentar precipitaciones bien definida entre los meses de enero a junio y una temporada seca que corresponden a los meses de julio a diciembre. La precipitación promedio anual es de 1455.3 mm; pero históricamente hay una fuerte variación de las precipitaciones anuales y mensuales.

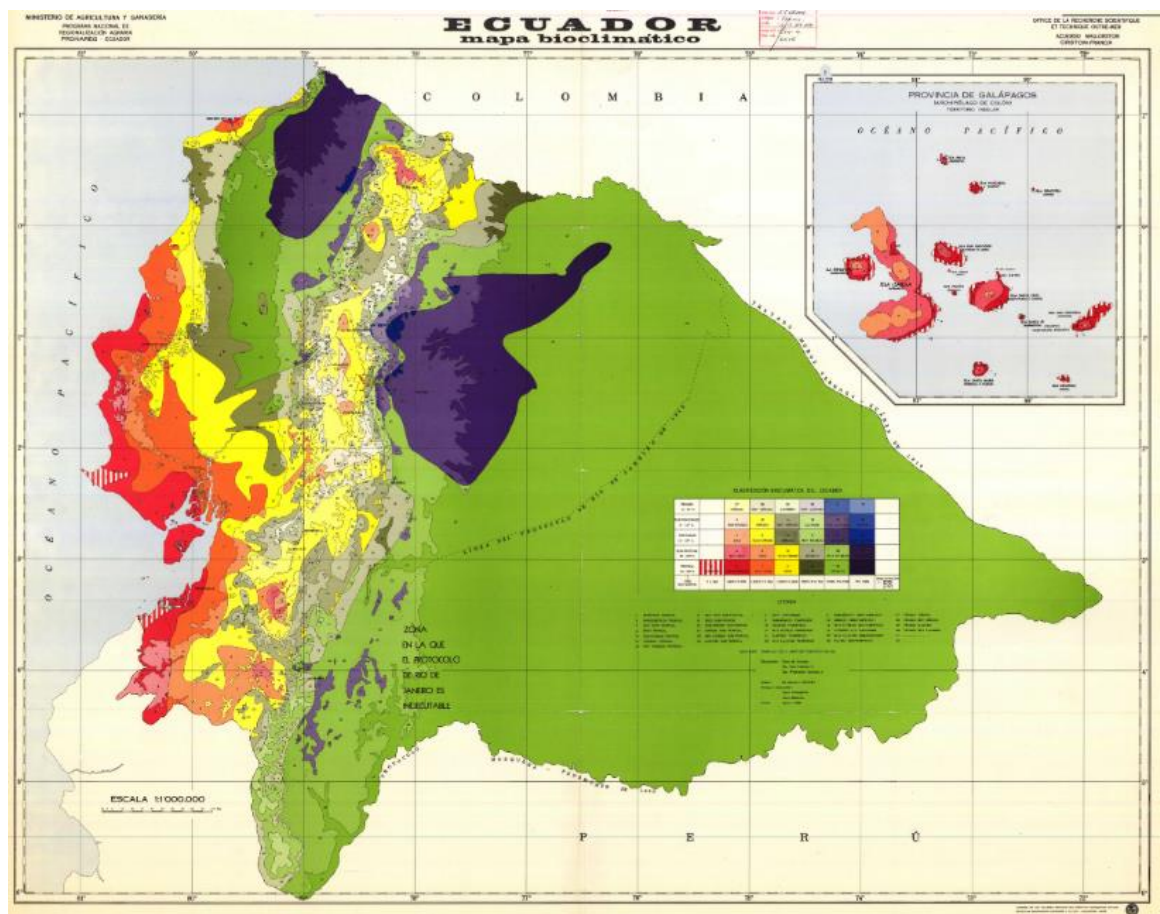


Figura 2. 2.- Mapa Bioclimático del Ecuador

Fuente: (Melo, Herrera, & Galeas, 2013)

2.3 Geología

2.3.1 Geología regional

La determinación de la geología regional se realizó con el empleo del mapa geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 3° y 4° S escala 1:200.000; publicación de junio del 2000 de la colección Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador: Depósitos Porfídicos y Epi – Mesotermiales relacionados con Intrusiones de las Cordilleras Occidental y Real.

La zona minera Ponce Enríquez, está localizada dentro del subdistrito Machala–Naranjal, en la parte occidental del Distrito Azuay, contiene depósitos de cobre, oro, molibdeno en pórfidos y en vetas desarrollados dentro de rocas de caja volcánicas y que están espacialmente relacionados con pórfidos.

La unidad comprende basaltos toleíticos lávicos masivos y almohadillados con intrusiones básicas y cantidades subordinadas de volcanoclastitas, sedimentos pelágicos y rebanadas tectónicas de rocas ultramáficas. La base de esta unidad no está expuesta y, hacia el Este, está cubierta discordantemente por las rocas volcánicas subaéreas, de composición intermedia a silíceo calco– alcalina del Grupo Saraguro (Eoceno Medio tardío o Mioceno Inferior). El espesor de esta unidad aproximadamente es de más de 1 Km al Este de Ponce Enríquez.

(Sari & Rodas, 2013)

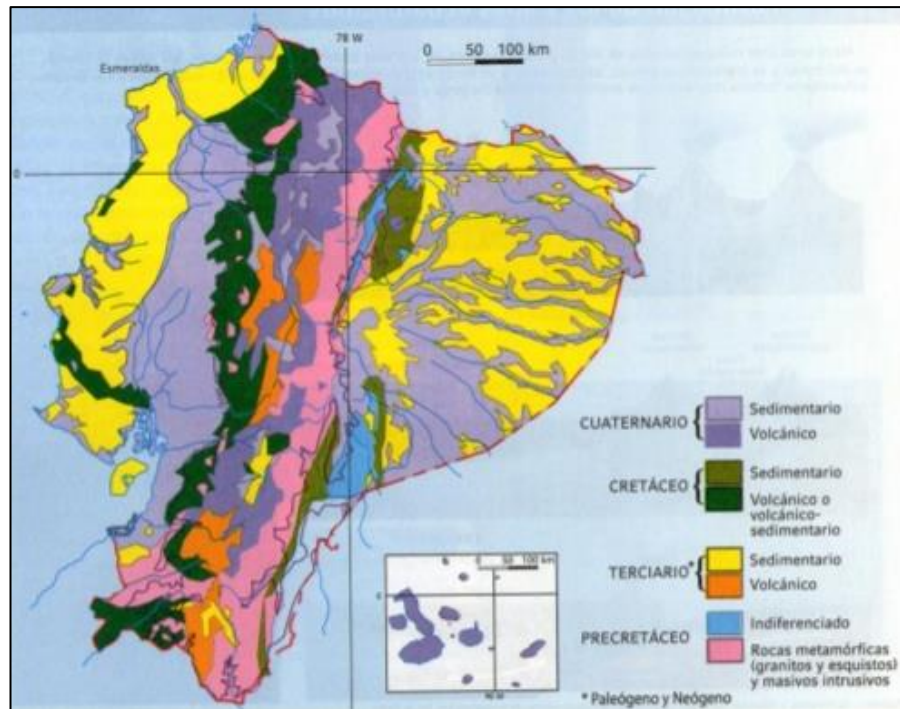


Figura 2. 3.- Mapa Geológico del Ecuador
Fuente: (Jaramillo, 2009)

2.3.2 Geología local

Desde el punto de vista de la geología local, la mineralización está encajada en rocas andesíticas de la Unidad Pallatanga, rocas intrusivas formadas de fenocristales de plagioclasas y clorita dispuestos en una matriz afanítica o finamente granulada de estructura micro cristalina compuesta de magnetita, clorita y disseminaciones de pirita.

(Sari & Rodas, 2013).

El Campo Mineral Ponce Enríquez ubicado dentro del subdistrito Machala-Naranjal, en la parte occidental de Distrito Azuay, es conocido por sus depósitos de Cu-Au-Mo en pórfidos y en vetas, brechas y stockworks epimesotermales desarrollados dentro de las rocas de caja volcánicas y que están espacialmente relacionados con pórfidos. Es una zona acrecionada propicia para la búsqueda de yacimientos metálicos de origen volcánicos o sulfuros masivos estratiformes, depósitos filoneanos de alta temperatura (epimesotermal). Alrededor del Campo Mineral Ponce Enríquez ocurre un conjunto predominante de rocas volcánicas, andesitas y basaltos, diabasas,

brechas, todas estas rocas de la Unidad Pallatanga (Basaltos Bella Rica). Sin embargo, la exposición típica en los frentes de trabajo es de basaltos verdes, dolerita, y hialoclásticas con stockworks irregulares de epidota, cuarzo y clorita que no sobrepasan los 20 mm de espesor en sus vetillas; zonas de alteración de epidota son comunes (indicativo de mineralización) y alcanzan espesores de 50mm. Adicional a ello, las rocas tienen una aparente susceptibilidad magnética. (Oyala, 2013)

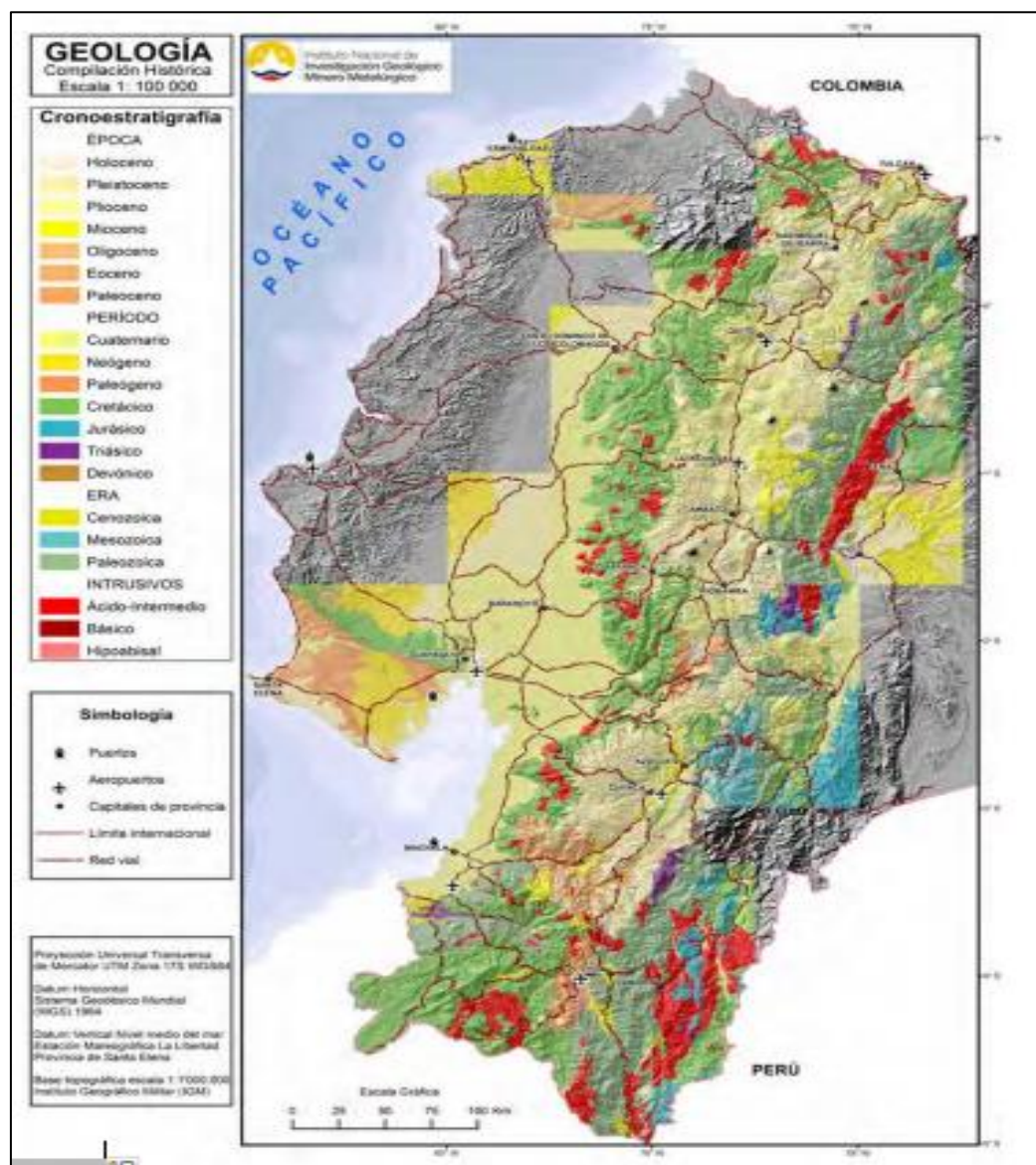


Figura 2. 4.- Mapa Geológico de Ecuador

Fuente: (Información, 2014)

2.4. Vegetación de la zona

La cobertura vegetal natural está definida como la vegetación que cubre la superficie terrestre de forma espontánea y natural. La cobertura natural cubre el 50,47% de la superficie del cantón Camilo Ponce Enríquez, ocupa un total de 48.427 ha. El bosque húmedo es la cobertura más representativa, comprende el 36,07% de la superficie cantonal con un total de 34.603 ha y está distribuido en mayor medida dentro de las parroquias El Carmen de Pijilí y Camilo Ponce Enríquez. Seguido de la vegetación arbustiva húmeda con el 12,99%, la vegetación herbácea húmeda el 1,23% y la vegetación herbácea de altura el 0,19%.

Los terrenos que disponen de vegetación natural, cumplen funciones fundamentalmente protectoras y conservacionistas asociadas al resto del territorio, como son la captación y almacenamiento de agua, agente anti-erosivo, refugio de la fauna, regulador del clima local, atenuador y reductor de la contaminación ambiental, fuente de materia prima y de salud para el hombre. Para una mejor comprensión, se ha clasificado la cobertura vegetal en unidades simplificadas, tomando en cuenta el Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental generado por el Ministerio del Ambiente (MAE), que guardan concordancia con el tipo de formación vegetal, rango de precipitación (humedad) y pisos altitudinales.

La vegetación natural presente en el cantón Camilo Ponce Enríquez está compuesta por multitud de especies diferentes. La elevada variabilidad existente en cuanto al número de especies se encuentra condicionada por diferentes factores fisiográficos, climáticos, orográficos y edáficos. En el cantón Camilo Ponce Enríquez se encontraron las siguientes coberturas, todas ellas han sido clasificadas dependiendo la superficie ocupada por cada una de ellas.

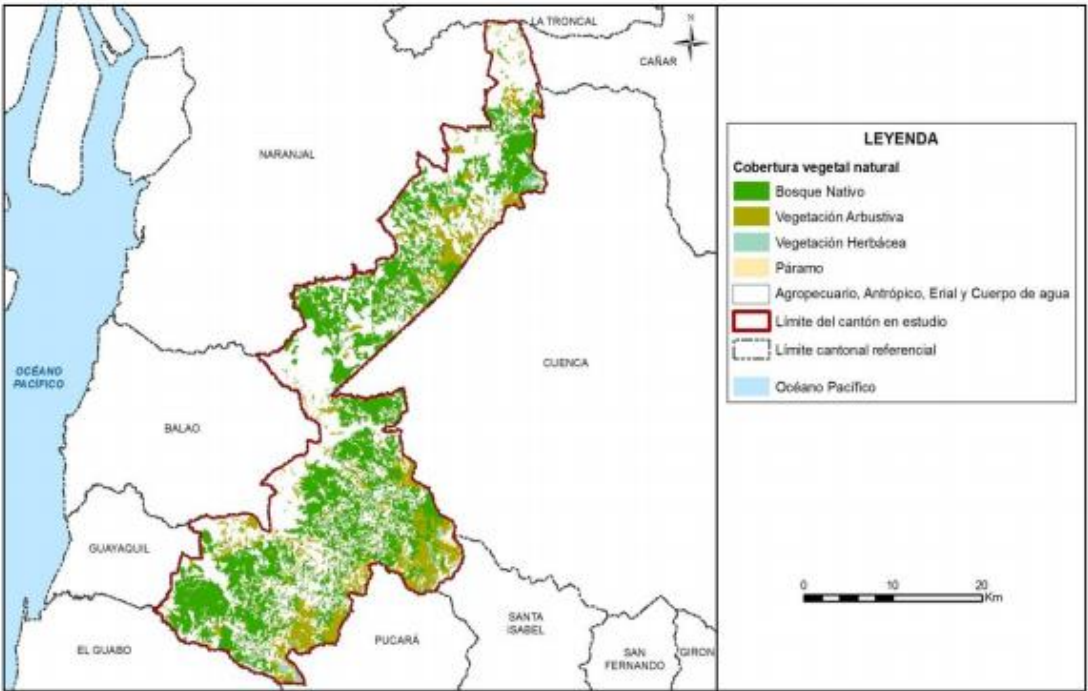


Figura 2. 5.- Mapa de la cobertura vegetal natural de Camilo Ponce Enríquez
Fuente: (Tracasa-Nipsa, 2015)

Cobertura	Tipo de cobertura	Grado de alteración	Superficie aproximada (ha)	Porcentaje (%)	Porcentaje (%) Tipo de cobertura
Bosque nativo	Bosque húmedo	Poco alterado	19.948	57,65	71,45
		Medianamente alterado	9.737	28,14	
		Muy alterado	4.918	14,21	
	Subtotal		34.603	100,00	
Páramo	Vegetación herbácea de altura	Medianamente alterado	178	100,00	0,37
	Subtotal		178	100,00	
Vegetación arbustiva	Vegetación arbustiva húmeda	Poco alterado	711	5,71	25,74
		Medianamente alterado	7.705	61,81	
		Muy alterado	4.050	32,49	
	Subtotal		12.466	100,00	
Vegetación herbácea	Vegetación herbácea húmeda	Poco alterado	193	16,39	2,44
		Medianamente alterado	601	50,98	
		Muy alterado	385	32,63	
	Subtotal		1.180	100,00	
Total			48.427		100,00

Figura 2. 6.- Tipo de cobertura vegetal natural y su grado de alteración en el cantón Camilo Ponce Enríquez.
Fuente: (Tracasa-Nipsa, 2015)

CAPÍTULO III

DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

Este trabajo de investigación está basado en la resistencia de la fortificación minera con las maderas más utilizadas del cantón Camilo Ponce Enríquez, se tiene como finalidad determinar el incremento de humedad en cada una de las maderas utilizadas y establecer cómo afecta a la resistencia del pandeo mediante la utilización de una maquina con acoples hechos a la medida para la obtención de mejores resultados.

Para el diseño y experimentación de esta investigación se han utilizado tres tipos de maderas las cuáles son: teca, pino y eucalipto; en total dieciocho muestras, seis de cada especie. Las medidas utilizadas fueron basadas en la experimentación de otros trabajos de investigación y a su vez de cálculos realizados para cumplir con la norma establecida la cual permite que la madera al tener una esbeltez correcta se pueda dar el proceso de resistencia al pandeo.

Para la parte práctica de la investigación, las maderas debieron estar sumergidas en agua por diferentes periodos de tiempo, los cuáles eran:

Tabla 3. 1 Tabla de tiempo de sumergimiento de las maderas en agua

Maderas	Tiempo
Muestra 0	Natural
Muestra 1	1 semana
Muestra 2	2 semanas
Muestra 3	4 semanas
Muestra 4	8 semanas
Muestra 5	12 semanas

3.1 Descripción de las muestras

Las maderas utilizadas dentro del ámbito ingenieril y sobre todo en la minería es de gran importancia ya que es empleada para el sostenimiento de túneles (fortificación), debido a esto las maderas poseen una variedad amplia de propiedades físico-mecánicas y dentro de estas podemos encontrar la resistencia al pandeo la cuál es el objetivo central del trabajo y así poder determinar cuál sería la mejor madera para la fortificación de túneles.

Las muestras utilizadas como lo mencionamos anteriormente están divididas por tres tipos de maderas: eucalipto, pino y teca; las medidas de las dieciocho maderas corresponden a: 5cm de ancho, 5 cm de espesor y 25 cm de largo.

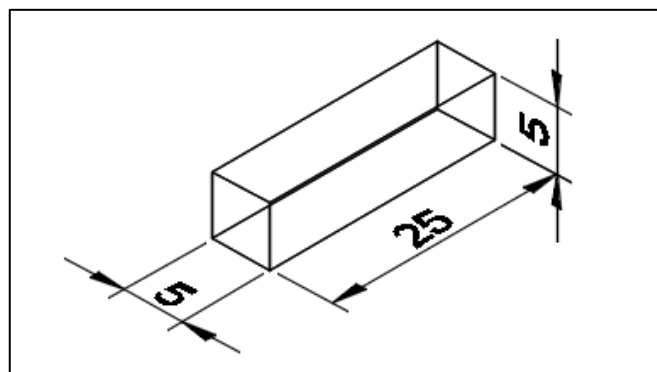


Figura 3. 1.- Mediciones de las muestras de madera

Fuente: Elaboración propia

3.1.1 Características de las muestras

Eucalipto

Tabla 3. 2.- Características de la muestra 1

Eucalipto (Natural)	
Peso Inicial (kg)	0,667
Peso Final (kg)	-
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	5
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	20326
Volumen (cm ³)	500
Tiempo de sumergimiento	0 días

Tabla 3. 3.- Características de la muestra 2

Eucalipto (E1)	
Peso Inicial (kg)	0,621
Peso Final (kg)	0,676
Ancho (cm)	4,9
Espesor (cm)	4,9
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	19163
Volumen (cm ³)	480,2
Tiempo de sumergimiento	7 días

Tabla 3. 4.- Características de la muestra 3

Eucalipto (E2)	
Peso Inicial (kg)	0,575
Peso Final (kg)	0,676
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	4,9
Largo (cm)	25,1
Carga Max. (kg)	17316
Volumen (cm ³)	492,45
Tiempo de sumergimiento	14 días

Tabla 3. 5.- Características de la muestra 4

Eucalipto (E4)	
Peso Inicial (kg)	0,584
Peso Final (kg)	0,72
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	4,9
Largo (cm)	25,1
Carga Max. (kg)	15287
Volumen (cm ³)	492,45
Tiempo de sumergimiento	28 días

Tabla 3. 6.- Características de la muestra 5

Eucalipto (E8)	
Peso Inicial (kg)	0,606
Peso Final (kg)	0,749
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	5
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	13224
Volumen (cm ³)	500
Tiempo de sumergimiento	56 días

Tabla 3. 7.- Características de la muestra 6

Eucalipto (E12)	
Peso Inicial (kg)	0,629
Peso Final (kg)	0,718
Ancho (cm)	4,8
Espesor (cm)	4,9
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	11632
Volumen (cm ³)	470,4
Tiempo de sumergimiento	84 días

Pino

Tabla 3. 8.- Características de la muestra 7

Pino (Natural)	
Peso Inicial (kg)	0,313
Peso Final (kg)	-
Ancho (cm)	4,9
Espesor (cm)	4,9
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	9442
Volumen (cm ³)	480,2
Tiempo de sumergimiento	0 días

Tabla 3. 9.- Características de la muestra 8

Pino (P1)	
Peso Inicial (kg)	0,312
Peso Final (kg)	0,45
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	5
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	8756
Volumen (cm ³)	500
Tiempo de sumergimiento	7 días

Tabla 3. 10.- Características de la muestra 9

Pino (P2)	
Peso Inicial (kg)	0,354
Peso Final (kg)	0,529
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	4,9
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	8025
Volumen (cm ³)	490
Tiempo de sumergimiento	14 días

Tabla 3. 11.- Características de la muestra 10

Pino (P4)	
Peso Inicial (kg)	0,32
Peso Final (kg)	0,549
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	5
Largo (cm)	25,1
Carga Max. (kg)	7614
Volumen (cm ³)	502,5
Tiempo de sumergimiento	28 días

Tabla 3. 12.- Características de la muestra 11

Pino (P8)	
Peso Inicial (kg)	0,286
Peso Final (kg)	0,503
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	5
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	5863
Volumen (cm ³)	500
Tiempo de sumergimiento	56 días

Tabla 3. 13.- Características de la muestra 12

Pino (P12)	
Peso Inicial (kg)	0,343
Peso Final (kg)	0,648
Ancho (cm)	4.9
Espesor (cm)	5
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	5011
Volumen (cm ³)	490
Tiempo de sumergimiento	84 días

Teca

Tabla 3. 14.- Características de la muestra 13

Teca (Natural)	
Peso Inicial (kg)	0,326
Peso Final (kg)	-
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	5
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	13918
Volumen (cm ³)	500
Tiempo de sumergimiento	0 días

Tabla 3. 15.- Características de la muestra 14

Teca (T1)	
Peso Inicial (kg)	0,436
Peso Final (kg)	0,505
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	5
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	12814
Volumen (cm ³)	500
Tiempo de sumergimiento	7 días

Tabla 3. 16.- Características de la muestra 15

Teca (T2)	
Peso Inicial (kg)	0,391
Peso Final (kg)	0,484
Ancho (cm)	4,8
Espesor (cm)	4.9
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	10918
Volumen (cm ³)	470,4
Tiempo de sumergimiento	14 días

Tabla 3. 17.- Características de la muestra 16

Teca (T4)	
Peso Inicial (kg)	0,35
Peso Final (kg)	0,501
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	5
Largo (cm)	25,1
Carga Max. (kg)	10442
Volumen (cm ³)	502,5
Tiempo de sumergimiento	28 días

Tabla 3. 18.- Características de la muestra 17

Teca (T8)	
Peso Inicial (kg)	0,441
Peso Final (kg)	0,615
Ancho (cm)	4,9
Espesor (cm)	5
Largo (cm)	25,1
Carga Max. (kg)	9748
Volumen (cm ³)	492,45
Tiempo de sumergimiento	56 días

Tabla 3. 19.- Características de la muestra 18

Teca (T12)	
Peso Inicial (kg)	0,352
Peso Final (kg)	0,55
Ancho (cm)	5
Espesor (cm)	4,9
Largo (cm)	25
Carga Max. (kg)	9328
Volumen (cm ³)	490
Tiempo de sumergimiento	84 días

3.2 Descripción de métodos de experimentación

La resistencia al pandeo de las maderas está directamente relacionada con la esbeltez del material utilizado, para el método de experimentación como se había mencionado se vio necesario que las medidas utilizadas en las maderas sean las mismas que fueron utilizadas en los trabajos de investigación que se realizaron a la par con el de pandeo para así poder corroborar datos al finalizar los experimentos.

Para estas pruebas se utilizaron equipos que se encuentran en los laboratorios de las Escuelas de Ingeniería en Minas e Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay; una balanza para poder tener los pesajes en seco y en húmedo luego de sus respectivos tiempos de sumergimiento de las maderas en agua; y una prensa

hidráulica Humboldt con capacidad de ejercer una carga de hasta 50.000 kilogramos de fuerza a la carga se le realizaron unos acoples en los extremos para que al momento de que la prensa ejerza la carga se pueda producir pandeo en las maderas.

3.2.1 Ejecución experimental de las muestras

Para el desarrollo de este trabajo de investigación fue necesario determinar el tipo de madera más utilizado en la fortificación para minas en el cantón Camilo Ponce Enríquez, siendo estos eucalipto, pino y teca.

Para la realización de las prácticas dentro del laboratorio las maderas, como lo mencionamos anteriormente, para su dimensionamiento nos basamos en la norma ASTM D 5536-94, la cual nos permite determinar las medidas necesarias para poder realizar la práctica de resistencia al pandeo de cada una de ellas.

Siendo estas las medidas utilizadas en todas las muestras:

Tabla 3. 20.- Medidas de las muestras de madera

Medidas de las muestras	
Alto	0,25 m
Ancho	0,05 m
Espesor	0,05 m

Una vez que las medidas fueron establecidas se procedió a determinar el tiempo de sumergimiento de cada una de las maderas en agua, considerando que por cada especie de madera se utilizaron 3 muestras para cada periodo de tiempo.

Tabla 3. 21.- Contenido de humedad en las muestras de Eucalipto

Muestra	Especie	Contenido de humedad (%)
EUCALIPTO	EN	0
	E1	8,86
	E2	17,57
	E4	23,29
	E8	23,60
	E12	14,15

Tabla 3. 22.- Contenido de humedad en las muestras de Pino

Muestra	Especie	Contenido de humedad (%)
PINO	PN	0
	P1	44,23
	P2	49,44
	P4	71,56
	P8	75,87
	P12	88,92

Tabla 3. 23.- Contenido de humedad en las muestras de Teca

Muestra	Especie	Contenido de humedad (%)
TECA	TN	0
	T1	15,83
	T2	23,79
	T4	43,14
	T8	39,46
	T12	56,25

Para obtener los resultados obtenidos en las Tablas (3.20) (3.21) y (3.22) se realizó procedimientos iguales con todas las muestras.

Las muestras con denominación E1, P1 y T1 fueron sumergidas en agua por un periodo de tiempo de una semana (7 días); para las muestras con denominación E2, P2 y T2 se les dio un tiempo de sumergimiento en agua por un periodo de dos semanas (14 días); las muestras E4, P4 y T4 fueron sumergidas por un periodo de 4 semanas (28 días); para las muestras con denominación E8, P8 y T8 fueron sumergidas 8 semanas (56 días); finalmente para las muestras con denominación E12, P12 y T12 fueron sumergidas en agua por 12 semanas (84 días).

3.2.2.- Análisis de muestras

Las 18 muestras utilizadas en este trabajo de investigación fueron sometidas a resistencia de pandeo en diferentes periodos de tiempo.

Dándonos como resultado que, si mayor es el tiempo de sumergimiento de las maderas en agua, su resistencia es menor comparándola con la muestra natural; esto nos quiere decir que la muestra con denominación E, P y T (natural) tienen mayor capacidad de resistencia al pandeo; mientras que las muestras con denominación numérica 1, 2, 4, 8 y 12 semanas que estuvieron en agua presentaron una menor resistencia a la falla.

3.3 Interpretación de los resultados

Los resultados luego de las pruebas de laboratorio según el porcentaje de humedad y el esfuerzo máximo resistente al pandeo son los siguientes:

Dentro de los datos que se muestran en las tablas de resultados se puede observar claramente que conforme aumenta su porcentaje de humedad su resistencia al pandeo disminuye.

3.3.1.- Tablas de resultados

Tabla 3. 24.- Muestras de eucalipto. Esfuerzo Máx. vs % humedad

Eucalipto	Carga Máxima de Resistencias (kgf)	Carga Máxima de Resistencia (N)	Contenido de Humedad (%)
Natural	20326	199398,06	0
Muestra 1	19163	187989,03	8,9
Muestra 2	17316	169869,96	17,6
Muestra 4	15287	149965,47	23,3
Muestra 8	13224	129727,44	23,6
Muestra 12	11632	114109,92	14,1

Tabla 3. 25.- Muestras de pino. Esfuerzo Máx. vs % de humedad

Pino	Carga Máxima de Resistencias (kgf)	Carga Máxima de Resistencia (N)	Contenido de Humedad (%)
Natural	9442	92626,02	0
Muestra 1	8756	85896,36	44,2
Muestra 2	8025	78725,25	49,4
Muestra 4	7614	74693,34	71,6
Muestra 8	5863	57516,03	75,9
Muestra 12	5011	49157,91	88,9

Tabla 3. 26.- Muestras de teca. Esfuerzo Máx. vs %de humedad

Teca	Carga Máxima de Resistencias (kgf)	Carga Máxima de Resistencia (N)	Contenido de Humedad (%)
Natural	13918	136.536	0
Muestra 1	12814	125.705	15,8
Muestra 2	10918	107.106	23,8
Muestra 4	10442	102.436	43,1
Muestra 8	9748	95.628	39,5
Muestra 12	9328	91.508	56,3

3.3.2.- Gráficas de resultados

3.3.2.1.- Gráficas de contenido de humedad

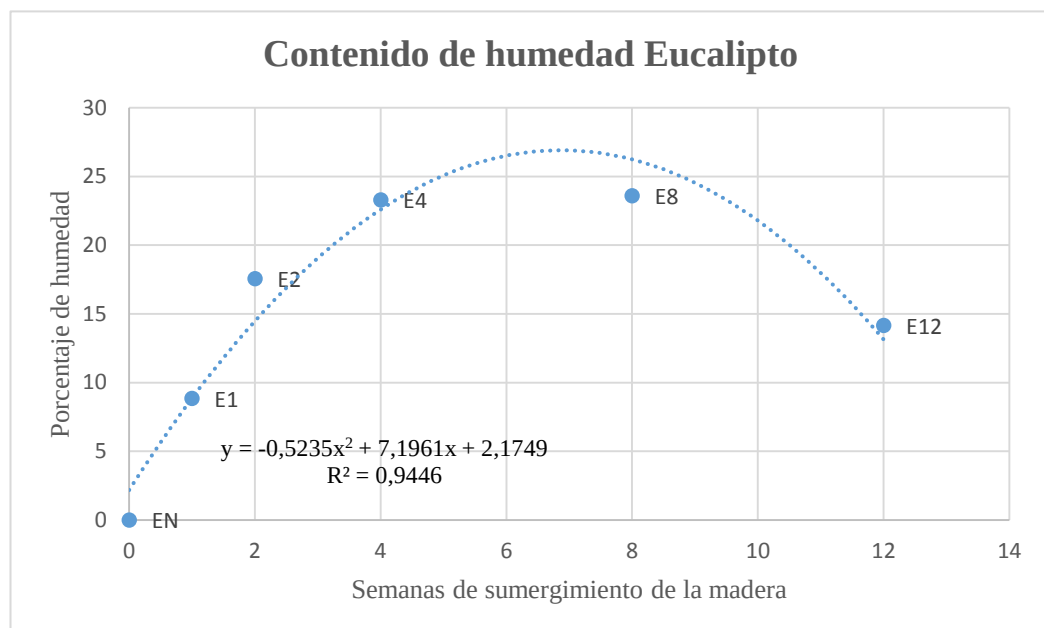


Figura 3. 2.- Incremento del contenido de humedad del Eucalipto

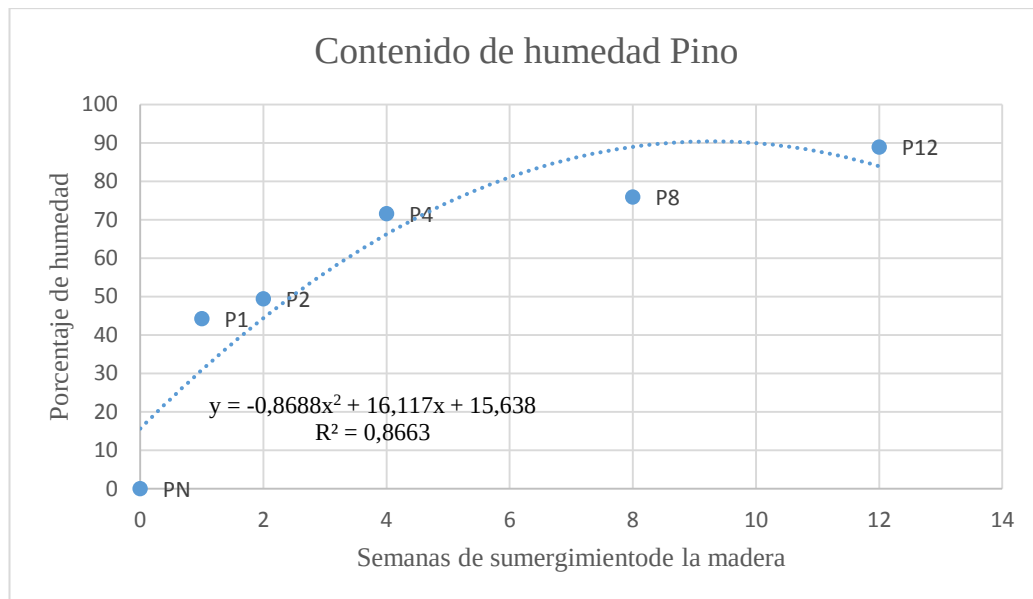


Figura 3. 3.- Incremento de contenido de humedad del Pino

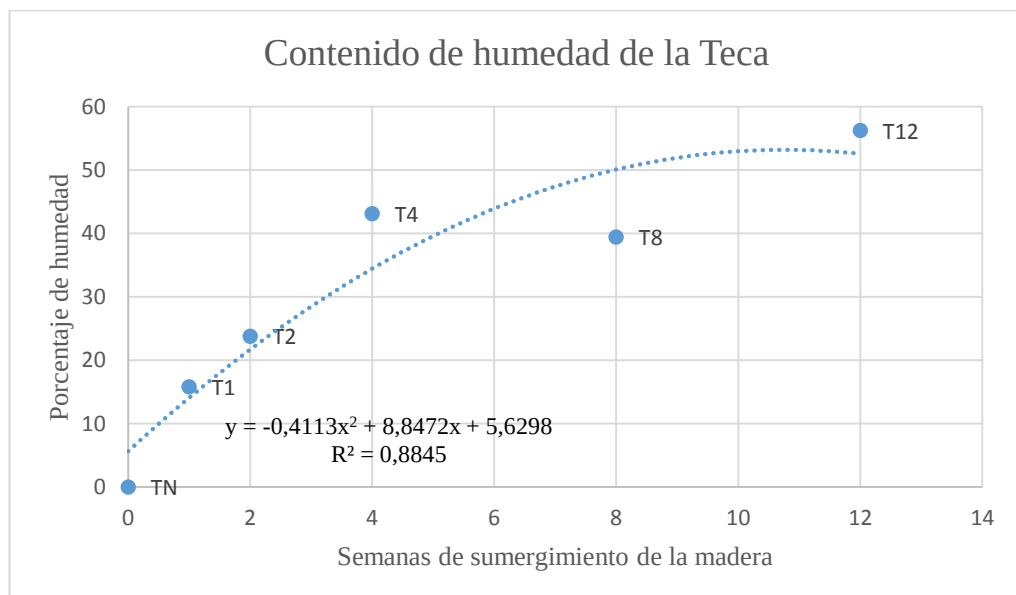


Figura 3. 4.- Incremento de contenido de humedad de la Teca

De las gráficas mostradas se obtuvieron como resultados que los incrementos de humedad en los tres tipos de maderas son: aceptable y admisibles tal y como nos muestran los resultados, dándonos que el coeficiente de correlación R^2 teniendo en cuenta que este coeficiente posee una aproximación de 1; Eucalipto 0.94, Pino 0.86 y Teca 0.88.

3.3.2.2.- Gráficas de contenido de humedad vs esfuerzo máximo

En las siguientes gráficas de resultados se expresa el comportamiento del contenido de la humedad y como ha sido la deformación en cuanto al esfuerzo máximo.

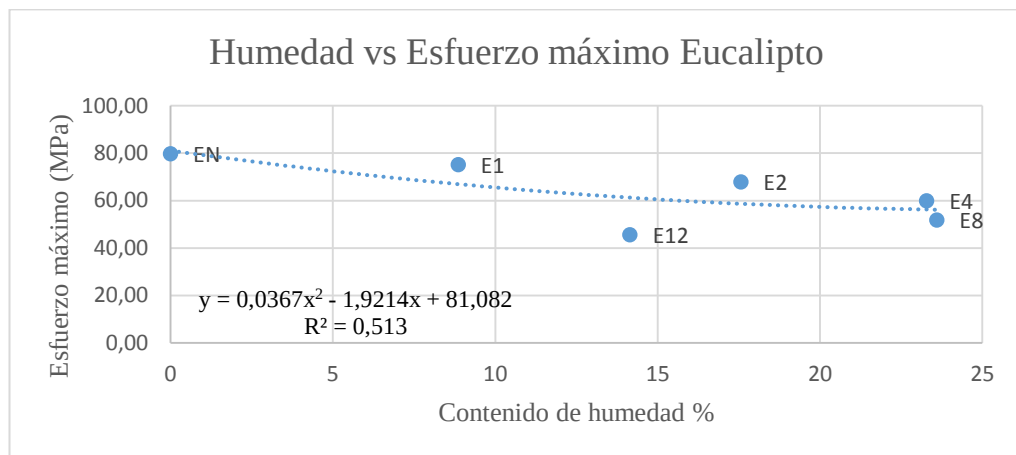


Figura 3. 5.- Contenido de humedad Vs Esfuerzo máximo Eucalipto

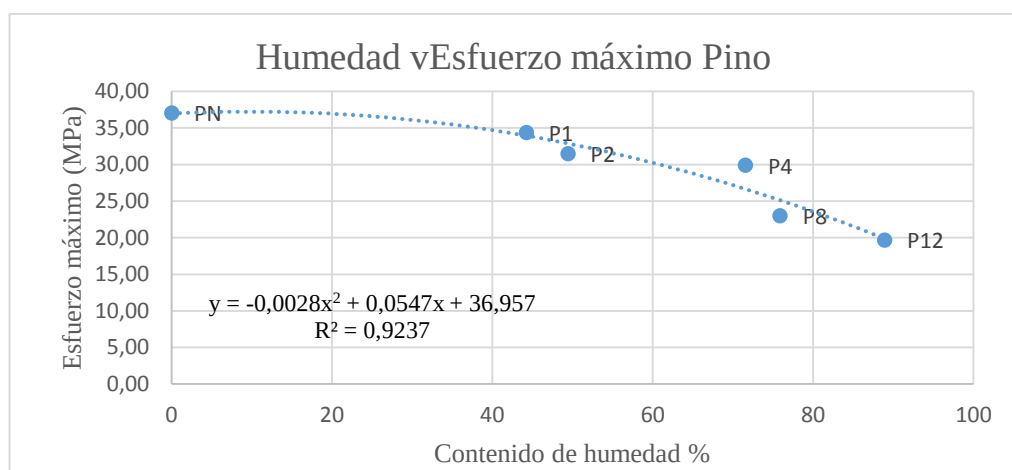


Figura 3. 6.- Contenido de humedad Vs Esfuerzo máximo Pino

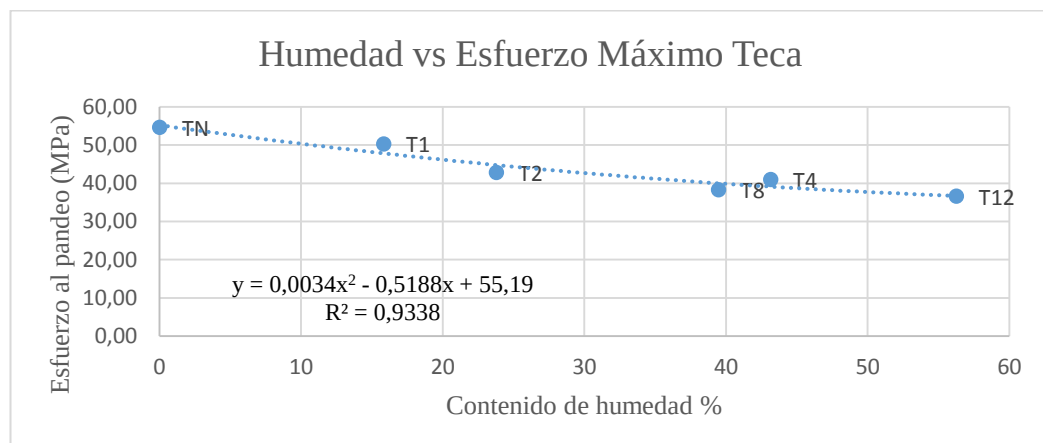


Figura 3. 7.- Contenido de humedad Vs Esfuerzo máximo Teca

3.4 Esfuerzo crítico de las probetas

Para la determinación del esfuerzo crítico en cada una de las probetas utilizadas en los ensayos fue necesario realizarlo mediante el análisis de diversas ecuaciones las cuales nos darán resultados verídicos para poder tener un estudio amplio y así definir el esfuerzo que ha sido aplicado.

Se debe considerar que para este análisis utilizaremos un módulo de elasticidad (E) para cada tipo de madera el cuál ha sido previamente investigado.

Tabla 3. 27.- Esfuerzo crítico del Eucalipto

Eucalipto	Carga máxima de resistencia (kN)	Esfuerzo crítico (MPa)
Natural	199,40	79,76
Muestra 1	187,99	75,20
Muestra 2	169,87	67,95
Muestra 4	149,97	59,99
Muestra 8	129,73	51,89
Muestra 12	114,11	45,64

Tabla 3. 28.- Esfuerzo crítico del Pino

Pino	Carga máxima de resistencia (kN)	Esfuerzo crítico (MPa)
Natural	92,63	37,05
Muestra 1	85,90	34,36
Muestra 2	78,73	31
Muestra 4	74,69	29,88
Muestra 8	57,52	23,01
Muestra 12	49,16	19,66

Tabla 3. 29.- Esfuerzo crítico de la Teca

Teca	Carga máxima de resistencia (kN)	Esfuerzo crítico (MPa)
Natural	136,54	54,61
Muestra 1	125,71	50,28
Muestra 2	107,11	42,84
Muestra 4	102,44	40,97
Muestra 8	95,63	38,25
Muestra 12	91,51	36,60

Datos:

E eucalipto: 20.58 GPa

E pino: 12.5 GPa

E teca: 10 GPa

a: Lado menor de la madera

r: Radio de giro

le: Longitud efectiva pandeo

 λ : Grado de esbeltez

Ix: Momento de inercia

3.4.1 Fórmulas a utilizar**3.4.1.1 Esbeltez de probetas**

$$\lambda = \frac{le}{r} \qquad r = \frac{a}{\sqrt{12}}$$

$$r = \frac{5cm}{\sqrt{12}}$$

$$r = \frac{5cm}{\sqrt{12}}$$

$$r = 1,44cm$$

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

$$\lambda = 17,36 cm$$

Se obtiene de los cálculos realizados que el radio de giro es de 1,44 cm y

$$\lambda = 17,36 cm.$$

3.4.1.2.- Determinación del esfuerzo de trabajo mediante fórmulas de AISC.

Para obtener el dato de λ_o se utilizó la fórmula de Euler $\lambda_o = \sqrt{\frac{2E\pi}{\sigma_{fluencia}}}$ y para determinar el $\sigma_{fluencia}$ de las maderas los datos fueron obtenidos de la tesis “Alternativas del uso de maderas en fortificación minera, mediante la caracterización de Resistencia a la Flexión”, de Nugra D. siendo estos datos los siguientes:

- $\sigma_{fluencia} = 75 \times 10^6$ Pa (Eucalipto)
- $\sigma_{fluencia} = 40 \times 10^6$ Pa (Pino)
- $\sigma_{fluencia} = 32 \times 10^6$ Pa (Teca)

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{2E\pi^2}{\sigma_{fluencia}}}$$

Tabla 3. 30.-Resultados de λ_o

λ_o	
λ_o (eucalipto)	73,59
λ_o (pino)	78,56
λ_o (teca)	78,53

Se determina que λ para los ensayos es $< \lambda_o$ de cada muestra, lo cual nos indica flexión inelástica.

3.4.1.3.- Factor de seguridad

Se debe determinar el factor de seguridad (FS) para poder calcular mediante AISC (American Institute of Steel Construction) cuál será el esfuerzo de trabajo para así establecer a de qué tipo de pandeo corresponde los datos, elástico o inelástico.

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3\lambda}{8\lambda_o} - \frac{1}{8} \left(\frac{\lambda}{\lambda_o} \right)^2$$

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3\lambda}{8\lambda_o} - \frac{1}{8} \left(\frac{\lambda}{\lambda_o} \right)^2$$

$$FS(\text{eucalipto}) = \frac{5}{3} + \frac{3(17,36)}{8(73,59)} - \frac{1}{8} \left(\frac{17,36}{73,59} \right)^2$$

$$* FS(\text{eucalipto}) = 1,74$$

$$FS(\text{pino}) = \frac{5}{3} + \frac{3(17,36)}{8(78,56)} - \frac{1}{8} \left(\frac{17,36}{78,56} \right)^2$$

$$* FS(\text{pino}) = 1,74$$

$$FS(teca) = \frac{5}{3} + \frac{3(17,36)}{8(78,53)} - \frac{1}{8} \left(\frac{17,36}{78,53} \right)^2$$

$$* FS(teca) = 1,74$$

Con esta fórmula se pudo determinar el factor de seguridad para cada tipo de especie de madera utilizado en este trabajo, siendo los resultados los que se muestran en el cálculo anterior.

Con los referidos resultados y teniendo en cuenta los datos obtenidos anteriormente, se puede determinar el esfuerzo de trabajo de cada una de las especies.

$$\sigma T = \frac{\left[1 - \frac{1\lambda^2}{2\lambda o^2} \right]}{FS} \sigma \text{fluencia}$$

Tabla 3. 31.- Resultados del esfuerzo de trabajo

σT	
σT (eucalipto)	41,90 MPa
σT (pino)	22,40 MPa
σT (teca)	17,94 MPa

3.4.1.4.- Gráficas de resultados de Pandeo Inelástico

En las siguientes gráficas podemos observar como el esfuerzo de trabajo de las maderas es menor que el esfuerzo crítico; por lo tanto las pruebas realizadas con fórmulas de AISC (American Institute of Steel Construction) sí son viables para la madera.

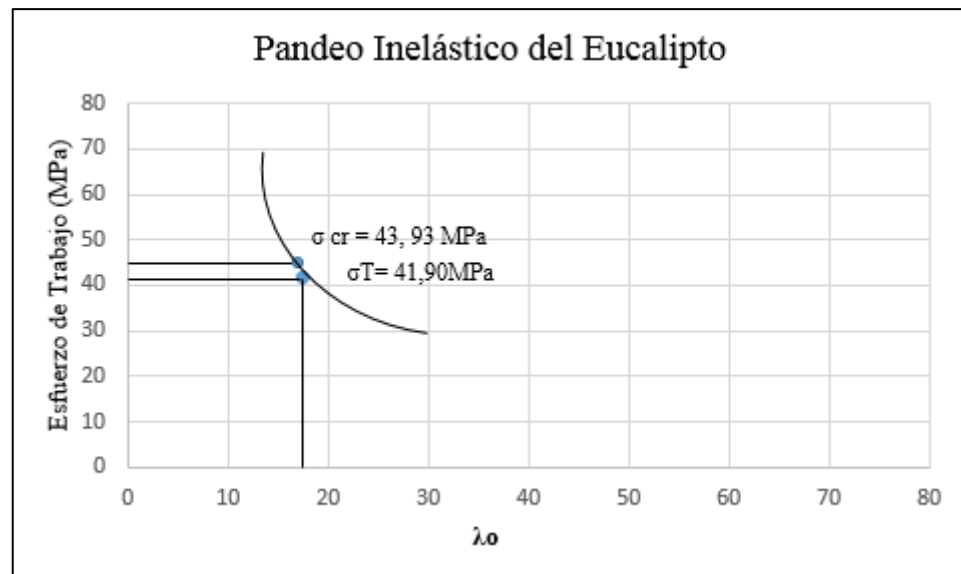


Figura 3. 8.- Pandeo Inelástico del Eucalipto

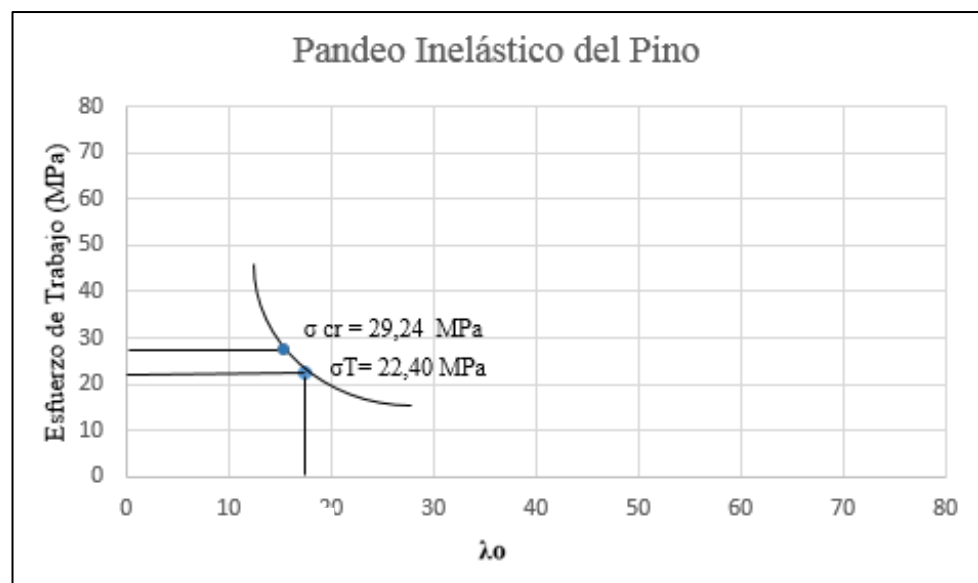


Figura 3. 9.- Pandeo Inelástico del Pino

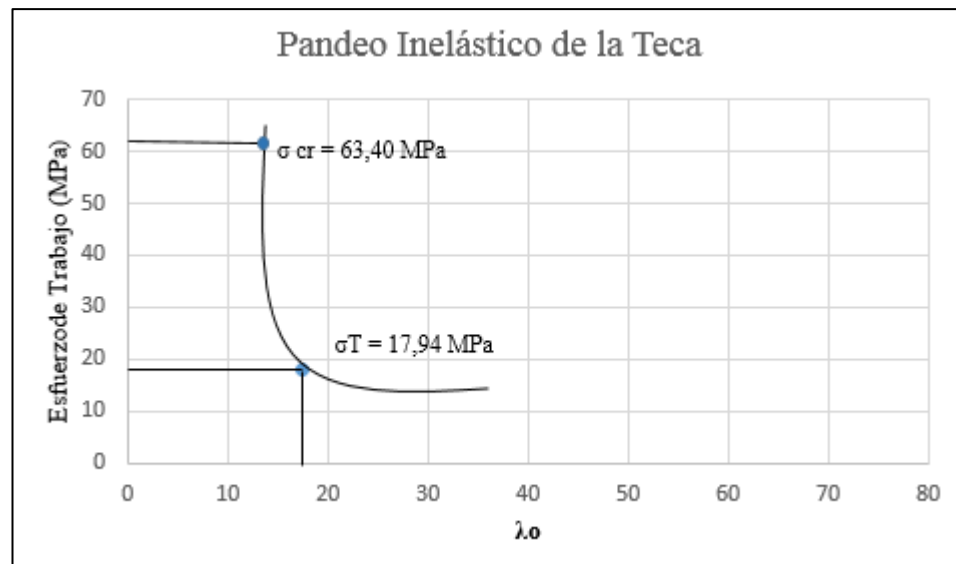


Figura 3. 10.- Pandeo Inelástico de la Teca

En función con los resultados obtenidos en las Tablas (3.27) (3.28) y (3.29) se determina que para cualquier grado de humedad los esfuerzos críticos son siempre mayores a los esfuerzos de trabajo calculando según la AISC, lo cual ratifica la teoría.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En este trabajo previo a la obtención del título de Ingeniera en Minas se pudo concluir de manera positiva, obteniendo resultados deseados desde un principio los cuáles eran verificar que la madera tiene una resistencia al pandeo alta pudiendo señalar que es factible para la fortificación minera ya que comparando los resultados obtenidos se confirma que el esfuerzo de trabajo es menor al esfuerzo crítico.

- Como se muestra en la tabla (3.27) de resultados del Capítulo III, nos indica que la especie de madera más resistente al Pandeo es el Eucalipto siendo la probeta en estado natural con un esfuerzo de pandeo de 79,76MPa.
- En las tablas de resultados podemos verificar mediante una comparación de las muestras naturales que la de mayor resistencia es la de eucalipto con 79,76 MPa; seguida por la probeta de Teca que se obtuvo un esfuerzo máximo de 54,61 MPa y finalmente la de menor resistencia es la de pino con 37.05 MPa.
- Por otro lado, mediante las fórmulas de AISC (American Institute of Steel Construction) se pudo obtener el esfuerzo de trabajo dándonos como resultado en la tabla (3.30) que el eucalipto es el más resistente con un valor de 41.90 MPa; por lo tanto, teniendo un $\lambda = 17,36$ nos indican las figuras 3.8; 3.9 y 3.10 que nuestras pruebas se encuentran dentro de un pandeo inelástico.
- En el cálculo de humedad de las probetas luego de sus respectivos tiempos de sumergimiento y realizando los cálculos se pudo deducir que las muestras con mayor capacidad de absorción son las de Pino, pero se debe tener en cuenta que estas probetas tuvieron los menores resultados

en cuanto a resistencia por lo que sería el tipo de madera menos factible para fortificación minera.

- Con respecto al Eucalipto éstas presentan una humedad máxima de 23,6% muy por debajo que las humedades del pino sin embargo este tipo de madera es la que presenta valores de resistencia superiores que las otras especies, siendo la más factible. para la utilización de ademes mineros.
- La resistencia al pandeo de cada una de las maderas disminuye conforme aumenta su humedad.
- Fue necesario la fabricación de dos placas de sostenimiento de probetas, dos placas de aplicación de carga y 2 esferas de acero; estas placas debieron tener medidas exactas para adaptarse a la prensa Humboldt; siendo las esferas de acero que cumplieron con la función de realizar el ensayo a pandeo.

Recomendaciones

- Para la elaboración de las probetas deben ser cortadas de manera paralela a las fibras, para así poder tener mejores resultados en cuanto a su resistencia.
- Mantener las probetas aisladas de ambientes húmedos, ya que esto podría alterar el contenido de humedad de las muestras en estado natural, pues al momento de realizar los cálculos podría alterar los resultados.
- Al momento de realizar la práctica es necesaria la presencia de un ayudante para la utilización de la prensa Humboldt, conjuntamente con sus accesorios ya que si no se coloca las placas simétricamente, la carga aplicada por el equipo no sería uniformemente distribuida en la muestra y así podría fallar el ensayo convirtiéndose en un esfuerzo de compresión simple.
- Es conveniente que se realicen ensayos con mayor cantidad de probetas para así poder determinar cuál sería su comportamiento de la resistencia al pandeo a medida que incrementa su contenido de humedad.
- Para la utilización de maderas en ademes mineros se recomienda principalmente tener en cuenta sus propiedades mecánicas y físico-químicas a fin de brindar la seguridad correspondiente.

BIBLIOGRAFÍA

- AITIM, A. D. (1994). Guía de madera. AITIM.
- Álvarez, Y. D. (2009). Diseño y evaluación de los ademes de madera, en la empresa C.I CARMINALES en el municipio de Fredonia., (pág. 20). Medellin.
- Cahuana, F. G. (2014). Sostenimiento con maderas. Moquegua.
- Calleros, H. (2012). Propiedades de la madera. Tecnología de la madera.
- Foglia, R. C. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. KURÚ Revista Forestal, 1-5.
- Información, S. N. (2014). Geoportales y visores geográficos. Quito.
- Jaramillo, S. I. (2009). Agua potable y discursos que moldearon su abastecimiento. Quito.
- Melo, P., Herrera, X., & Galeas, R. (2013). Modelo Bioclimatico. Quito.
- Miller, P. (2011). El Cantón Camlo Ponce Enríquez en el Azuay. Cuenca Ilustre, 1-3.
- Noves, H. A., & Fernández-Golfín, J. I. (1992). Fundamentos teóricos del secado de la madera. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- Olabarria, H. U. (2015). Análisis de propiedades físicas de la madera de Populus x euramericana y Pinus pinaster tras tratamientos de OLEOTERMIA. Palencia.
- Oyala, A. G. (2013). Cálculo de Reservas de la veta "Paraiso". Guayaquil.
- Peña, S. V., & Rojas, I. M. (2006). Tecnología de las maderas. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Rodriguez, I. M. (1989). Estudio sobre la madera de la mina. AITIM (Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera), 1-6.

Sánchez, L. I. (2014). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial. Camilo Ponce Enríquez.

Santillana, J. S. (2011). Tema 10: Pandeo. En Enseñanzas Técnicas, Resistencia de Materiales (págs. 1-22). s.f.

Sari, J. P., & Rodas, D. E. (2013). "Propuesta del sistema de fortificacion que se debe emplear a lo largo de la veta f-10 de la mina subterranea liga de oro de la empresa minera SOMILOR S.A.". Cuenca.

SONAMI. (2013). Fortificación y acuñadura. Guía de operaciones para la pequeña minería.

Tracasa-Nipsa. (2015). Levantamiento de cartografía temática escala 1:25.000, Lote 2. Camilo Ponce Enríquez.

Visual, D. (2019). Obtenido de : <http://www.ikonet.com/es/diccionariovisual/>.

ANEXOS

Anexo 1: Probetas naturales sin sumergimiento en agua



Anexo 2: Probetas una semana sumergidas en agua



Anexo 3: Probetas dos semanas sumergidas en agua



Anexo 4: Probetas cuatro semanas sumergidas en agua



Anexo 5: Probetas ocho semanas sumergidas en agua



Anexo 6: Probetas doce semanas sumergidas en agua



Anexo 7: Acoples de acero para la maquina Humboldt

