

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTUDIO DE LA MADERA LAMINADA SUJETA A COMPRESIÓN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**EMILIO TOMÁS DÁVALOS FASSLER**  
emiliodavalos@hotmail.com

**DIRECTOR: ING. JORGE VINTIMILLA**  
vintimilla.j@gmail.com

**QUITO, JUNIO DE 2012**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Emilio Tomás Dávalos Fassler, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Emilio Tomás Dávalos Fassler

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Señor Emilio Tomás Dávalos Fassler, bajo mi supervisión.

\_\_\_\_\_ Ing. Jorge Vintimilla.  
DIRECTOR DEL PROYECTO.

## **AGRADECIMIENTO**

Estas palabras las dedico a quienes forman parte fundamental en mi vida.

Por su incondicional y especial apoyo ya que siempre estuvieron haciéndome ver las cosas desde otro punto de vista, la importancia de superarme profesionalmente y personalmente, ya que esto implica: disciplina, constancia, esfuerzo.

**Con cariño a mis padres.**

A los profesores de la Escuela Politécnica Nacional, quienes me brindaron sus conocimientos y aportaron en mi formación profesional. En especial al Ing. Jorge Vintimilla al brindarme sus conocimientos para prepararme y guiarme en la elaboración de mi tesis, trabajo que requiere también de especial dedicación.

A todos mis amigos y compañeros que durante este periodo de tiempo estuvimos juntos para alcanzar la misma meta, me llevo los mejores recuerdos.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por su apoyo para alcanzar mis metas y objetivos.

A todas las personas que de una u otra manera contribuyeron en el desarrollo de este trabajo a nivel personal y profesional.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
INDICE DE TABLAS .....	XII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XIII
RESUMEN .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
PRESENTACIÓN.....	XVI
CAPÍTULO 1 .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 OBJETIVO.....	3
1.3 IMPORTANCIA .....	3
2.1.1 CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS DE LA MADERA .....	4
CAPÍTULO 2 .....	4
2.1 PROPIEDADES DE LA MADERA.....	4
2.1.2 CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS DE LA MADERA.....	5
2.2 EFECTO DE LAS ESTRUCTURAS EN LAS PROPIEDADES DE LA MADERA.....	5
2.3 MADERA DE COMPRESIÓN.....	6
2.4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA .....	7
2.4.1 HUMEDAD .....	7
2.4.2 DENSIDAD.....	8
2.4.3 CONTRACCIÓN.....	9
2.4.4 HINCHAMIENTO.....	10

2.5	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA.....	10
2.5.1	CARGAS PERMANENTES O MUERTAS.....	10
2.5.2	SOBRECARGAS O CARGAS VIVAS .....	10
2.5.3	CARGAS EVENTUALES U OCASIONALES .....	10
2.6	ESFUERZO A COMPRESIÓN.....	11
2.7	ESFUERZO A TRACCIÓN.....	12
2.8	ESFUERZO AL CIZALLE .....	12
2.9	ESFUERZO A FLEXIÓN .....	13
2.10	FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.....	14
2.11	OTRAS PROPIEDADES DE LA MADERA.....	14
2.12	TIPOS DE UNIONES EN LOS EXTREMOS .....	14
2.12.1	UNIÓN A TOPE.....	14
2.12.2	UNIÓN A BISEL .....	14
2.12.3	ENSAMBLAJE (FINGER - JOINT) O ELABORACIÓN DE UNIONES DENTADAS.....	15
	VENTAJAS DEL ENSAMBLAJE .....	15
	ETAPAS DEL PROCESO .....	16
2.12.3.1	VARIABLES DE LA CALIDAD EN EL ENSAMBLADO.....	16
2.12.3.2	PRODUCTIVIDAD DEL PROCESO FINGER JOINT .....	16
2.12.3.3	LÍNEA DE ENCOLADO .....	17
2.12.3.4	ENCOLADO Y PRENSADO.....	17
2.12.3.5	ADHESIVOS .....	17
2.12.3.6	ENCOLADO .....	18
2.12.3.7	PRENSADO .....	20
2.12.3.8	PRODUCTOS PRESERVANTES.....	22
2.12.3.9	HIDRÓFUGOS .....	24
2.12.3.10	ETAPAS DEL PROCESO DE IMPREGNACIÓN CON VACIO Y PRESIÓN .....	24
	CAPITULO III .....	25
3.1	LEY DE HOOKE.....	25
3.2	COMPRESIÓN DE ELEMENTOS.....	26
3.3	TEOREMA DE LOS EJES PARALELOS .....	28

3.4	TEORÍA DE EULER .....	30
3.4.1	PANDEO ELÁSTICO E INELÁSTICO .....	41
3.4.2	COLUMNAS INTERMEDIAS.....	43
3.5	TENACIDAD.....	45
3.6	ESBELTEZ .....	46
3.7	LONGITUD EFECTIVA .....	47
3.8	CLASIFICACIÓN DE LAS COLUMNAS .....	47
3.8.1	CLASIFICACIÓN SEGÚN EL MANUAL DE DISEÑO PARA MADERAS DEL GRUPO ANDINO .....	47
3.8.1.1	CLASIFICACIÓN DE LA MADERA SEGÚN SU DENSIDAD BÁSICA ....	48
3.8.1.2	ESFUERZOS MÁXIMOS ADMISIBLES .....	48
3.8.1.3	ESBELTEZ.....	49
3.8.1.4	CLASIFICACIÓN DE COLUMNAS.....	50
3.8.1.5	COLUMNAS CORTAS .....	50
3.8.1.6	COLUMNAS INTERMEDIAS.....	50
3.8.1.7	COLUMNAS LARGAS.....	52
3.9	ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXO- COMPRESIÓN .....	52
3.10	MADERA LAMINADA.....	53
3.10.1	<i>VENTAJAS DE LA MADERA LAMINADA</i> .....	55
3.10.2	<i>DESVENTAJAS DE LA MADERA LAMINADA</i> .....	57
3.10.3	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA LAMINADA.....	57
3.10.4	ELABORACIÓN DE LÁMINAS.....	58
3.10.5	ADHESIVOS .....	60
3.10.5.1	CLASIFICACIÓN BASADA EN LA TEMPERATURA DE FRAGUADO (ASTM).....	60
3.10.5.2	CLASIFICACIÓN BASADA EN LA DURABILIDAD (BS).....	60
3.10.5.2.1	CLASE WBP: A PRUEBA DE INTEMPERIE Y AGUA HIRVIENDO ..	60
3.10.5.2.2	CLASE BP: RESISTENTES AL AGUA HIRVIENDO.....	61
3.10.5.2.3	CLASE MR: RESISTENTES A LA HUMEDAD (AGUA) Y MODERADAMENTE RESISTENTES A LA INTEMPERIE.....	61
3.10.5.2.4	CLASE INT: INTERIOR.....	61
3.10.5.3	CLASIFICACIÓN BASADA EN LA NATURALEZA DEL COMPONENTE PRINCIPAL .....	61



3.10.5.3.1	A BASE ALBUMINOSA .....	62
3.10.5.3.1.1	COLAS DE GLUTINAS .....	62
3.10.5.3.2	A BASE DE HIDRATOS DE CARBONO .....	62
3.10.5.3.3	ADHESIVOS A BASE DE RESINAS SINTÉTICAS.....	63
3.10.6	COMBINACIONES DE ADHESIVOS .....	63
3.10.7	LOS ADHESIVOS Y LA RESPONSABILIDAD DE LOS CONSUMIDORES .....	64
3.10.8	ADHESIVOS USADOS EN MADERA LAMINADA.....	65
3.10.9	ESPARCIDO DEL ADHESIVO.....	65
3.10.10	PRENSADO .....	66
3.10.10.1	ALTERNATIVAS DE PRENSADO.....	68
3.10.10.1.1	SISTEMA DE PRENSADO CON PISTÓN .....	68
3.10.10.1.2	SISTEMA DE PRENSADO POR TORNILLO SIN FIN .....	70
3.10.11	TERMINACIONES.....	71
3.11	PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	71
3.11.1	DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS .....	71
3.11.2	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO .....	76
3.11.3	ANÁLISIS DE DATOS .....	76
CAPÍTULO 4 .....		78
4.1	ANÁLISIS DE COSTOS .....	78
4.2	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	80
CAPÍTULO 5 .....		81
5.1	CONCLUSIONES.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS: .....		81
ANEXOS .....		81
ANEXO 1. GRÁFICAS CARGA - DEFORMACIÓN.....		81
ANEXO 2. CURVAS CARGA DEFORMACIÓN: COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA.....		81

ANEXO 3. CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN: COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA .....	81
ANEXO 4. GRÁFICAS CARGA - LONGITUD TEÓRICA Y PRÁCTICA.....	81
ANEXO 5. CURVAS FI - LONGITUD.....	81
ANEXO 6. CURVAS CARGA - LONGITUD DE CADA ESPECIE DE MADERA Y TIPO DE UNIÓN Y ADHESIVO.....	81
ANEXO 7. FOTOGRAFÍAS .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1	COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS.....	11
FIGURA 2.2	COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LAS FIBRAS.....	11
FIGURA 2.3	TRACCIÓN PARALELA A LAS FIBRAS.....	12
FIGURA 2.4	TRACCIÓN PERPENDICULAR A LAS FIBRAS.....	12
FIGURA 2.5	CIZALLE.....	13
FIGURA 2.6	FLEXIÓN.....	13
FIGURA 2.7	TIPOS DE UNIÓN.....	15
FIGURA 3.1	DIAGRAMA ESFUERZO – DEFORMACIÓN.....	26
FIGURA 3.2	TEOREMA DE STEINER.....	28
FIGURA 3.3	EQUILIBRIO DE COLUMNAS.....	30
FIGURA 3.4	CARGA CRÍTICA.....	31
FIGURA 3.5	FÓRMULAS DE EULER, $N = 1$ .....	34
FIGURA 3.6	FÓRMULA DE EULER, $N = 2$ .....	35
FIGURA 3.7	CARGA CRÍTICA DE EULER EN EL PLANO $X - Z$ .....	36
FIGURA 3.8	CONDICIONES DE APOYO.....	37
FIGURA 3.9	DIAGRAMA ESFUERZO – DEFORMACIÓN.....	38
FIGURA 3.10	MÓDULO DE ELASTICIDAD TANGENCIAL.....	39
FIGURA 3.11	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE COLUMNAS CON DIFERENTES CONDICIONES DE EMPOTRAMIENTO.....	41
FIGURA 3.12	CURVA DE EULER.....	42
FIGURA 3.13	PARÁBOLA DE JOHNSON.....	44
FIGURA 3.14	TENACIDAD.....	46
FIGURA 3.15	MADERA LAMINADA.....	54
FIGURA 3.16	ENCOLADO DE UNA TABLA.....	54
FIGURA 3.17	ADHESIVO MÁS CLAVOS.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1	CLASIFICACIÓN DE LA MADERA.....	48
TABLA 3.2	ESFUERZOS ADMISIBLES.....	48
TABLA 3.3	MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	49
TABLA 3.4	CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS.....	73
TABLA 4.1	COMPARACIÓN DE COSTOS.....	78
TABLA 4.2	COMPARACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA.....	80
TABLA 4.3	EFICIENCIA DEL ADHESIVO.....	81
TABLA 4.4	COMPARACIÓN CARGA MÁXIMA SEGÚN EL MANUAL DEL GRUPO ANDINO.....	82
TABLA 4.5	TENACIDAD.....	83

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 3.1	LEY DE HOOKE.....	25
ECUACIÓN 3.3	TEOREMA DE STEINER.....	29
ECUACIÓN 3.4	ECUACIÓN DIFERENCIAL DE LA ELÁSTICA.....	32
ECUACIÓN 3.9	ESFUERZO CRÍTICO.....	36
ECUACIÓN 3.10	CARGA CRÍTICA DE EULER.....	37
ECUACIÓN 3.13	ESFUERZO ADMISIBLE.....	41
ECUACIÓN 3.14	PARÁBOLA DE JOHNSON.....	44
ECUACIÓN 3.18	CARGA ADMISIBLE PARA COLUMNAS CORTAS.....	50
ECUACIÓN 3.19	CARGA ADMISIBLE PARA COLUMNAS INTERMEDIAS.....	51
ECUACIÓN 3.20	CARGA ADMISIBLE PARA COLUMNAS LARGAS.....	52

## RESUMEN

La presente investigación tanto teórica como experimental fundamentara las teorías existentes en cuanto a comportamiento estructural citadas a nivel internacional en diferentes tipos de códigos y a nivel local las adoptadas por el Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC 2000).

Por el hecho de ser un sistema constructivo nuevo para el Ecuador, del cual no se posee información, se buscará con la investigación aportar con bases teóricas y experimentales para el desarrollo de una teoría que refleje las necesidades de nuestro país, en cuanto a comportamiento mecánico se refiere.

Para realizar este estudio, se parte con elaboración de probetas con duelas comerciales de madera de Colorado, Eucalipto y Pino, las mismas que serán unidas mediante una mezcla de blancola y cemento portland en proporciones estudiadas en tesis anteriores. Acorde a códigos vigentes se construirá y ensayará las probetas.

Continuando en el estudio, y partiendo de los datos de los ensayos experimentales, se realizará curvas esfuerzo - deformación, para comparar la eficiencia entre el tipo de unión y pegamento. Se elaborará curvas con datos experimentales y teóricos carga versus longitud.

Finalmente al contar con información sobre capacidad de carga experimental y teórica se comparará las mismas y será un parámetro de comparación de la eficiencia del sistema, además se realizara un análisis económico entre madera sólida y madera laminada, con todo ello se establecerá en que tipos de estructuras es viable el sistema.

## **ABSTRACT**

This theoretical and experimental investigation substantiates existing theories regarding structural behavior cited internationally in different types of local codes and those adopted by the Ecuadorian Code of Construction (CEC 2000).

Being a new construction system for Ecuador, with no information available, the investigation sought to provide theoretical and experimental bases for the development of a theory that reflects the needs of our country, in terms of mechanical behavior.

For this study, we start preparing samples with commercial wooden staves of Colorado, Eucalyptus and Pine. These will be consolidated by a mixture of Portland Cement and Blancola, whose proportions have been studied in previous thesis. According to current codes the samples will be built and tested.

Continuing with the study and using the data of the experimental tests, stress-strain curves will be performed to compare the efficiency between the type of joint and glue. Curves will be drawn with experimental data and theoretical load versus length curve.

Finally, having the information of the experimental and theoretical load, these will be compared, giving us a parameter of the efficiency of the system. An economic analysis of solid wood and laminated wood will be made, establishing in which types of structure the system is viable.

## **PRESENTACIÓN**

El presente trabajo consta de cinco capítulos divididos de la siguiente manera:

En el capítulo I, se presenta la introducción, objetivos e importancia de este estudio para contribuir con la escases de información existe en el país.

En el capítulo II, se presenta las características de la madera, morfología, propiedades físicas y mecánicas, tipos de uniones, proceso constructivo de uniones finger – joint.

En el capítulo III, se presenta la información necesaria para la investigación, parámetros y técnicas para la construcción de la madera laminada, y con ello cumplir con especificaciones de códigos vigentes.

En capítulo IV, se presenta el análisis de resultados, en función de capacidad de carga y costos en la elaboración de las diferentes secciones y tipos de unión.

En el Capítulo V, se presenta las conclusiones del sistema investigado.



# CAPÍTULO 1

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La madera probablemente fue uno de los primeros materiales estructurales utilizados por el hombre, desde aquellos inicios hasta la actualidad este material sigue desempeñando un papel fundamental en la construcción de obras de todo tipo. La madera al ser un recurso natural renovable de buenas propiedades estructurales, que necesita poca energía para la conversión de producto natural en producto terminado en relación a otros materiales estructurales, y una creciente demanda de madera en mercados nacionales e internacionales, convierten este material en una fuente de ingresos económicos y una alternativa ecológica para combatir la crisis energética y minera actual.

Desde el punto de vista estructural las fibras de la madera le dan belleza y expresión resistente a la estructura, a demás, presenta un buen comportamiento mecánico, poco peso, buen comportamiento sismo - resistente, fácil labranza, gran capacidad de disipar energía, entre otras propiedades que han contribuido a popularizar su empleo.

Las dimensiones de las piezas establecidas por los comerciantes y las características geométricas propias del material han limitado la utilización de la madera en nuestro medio, esta falta de flexibilidad de dimensiones obliga a buscar nuevas alternativas como son secciones compuestas unidas por medio de clavos o por diversos tipos de ligantes.

En esta tesis se ha realizado el estudio de la conformación de secciones laminadas encoladas, tanto en la parte teórica como en la comprobación de su comportamiento mecánico mediante la experimentación.

Para conformar elementos de madera laminada se necesita técnicas sofisticadas y equipo especializado que en nuestro medio no existe, por lo cual,

buscaremos alternativas constructivas sencillas las cuales satisfagan los requerimientos de construcción.

La madera laminada es la unión de tablas a través de sus cantos, caras y extremos con su fibra en la misma dirección, conformando un elemento no limitado en escuadra ni en largo y que funciona como una sola unidad estructural.

Dependiendo del elemento de unión, se obtendrá diferentes tipos de madera laminada, en nuestro estudio tendremos tres tipos de uniones. Cuando los elementos de unión son clavos se denomina madera laminada clavada, si el elemento de unión es pega, se denomina madera laminada encolada.

El tipo de unión es fundamental para conformar un elemento que funcione como una sola unidad estructural. Para el estudio se establece unión a tope, unión bisel para obtener mayor superficie de contacto obteniendo un mejor comportamiento mecánico del elemento, y por último unión finger - joint que requiere maquinaria especializada.

Actualmente, la madera laminada constituye un elemento importante de construcción en otros países, en edificios de gran luz, apto para una extensa gama de aplicaciones, ya que permite la creación de estructuras estéticamente agradables y de grandes posibilidades de diseño arquitectónico y buena construcción.

En nuestro país se empezó a estudiar este tema en la década de los setenta con la construcción de estructuras utilizando este sistema. Actualmente se han realizado pocos estudios respecto a este tema, La Pontificia Universidad Católica del Ecuador realizó un estudio en el año 1971, otro en el año 1984, y el último en el año 1994. La Escuela Politécnica Nacional realizó un estudio sobre el tema en el año 1994.

## **1.2 OBJETIVO**

Los estudios sobre elementos laminados sometidos a compresión son numerosos en el extranjero, pero todos estos estudios son de especies propias de esos países y en general son coníferas. En nuestro país predominan bosques de especies latifoliadas, por lo cual es necesario estudiarlas para conocer el comportamiento de estas especies frente a la laminación.

Esta investigación pretende determinar los criterios suficientes y necesarios para fabricar y utilizar adecuadamente los elementos elaborados con madera laminada, sustentado en un estudio experimental comparativo de variables que inciden en el problema, y con ello promover la construcción de estructuras de este tipo.

## **1.3 IMPORTANCIA**

Debido a los escasos estudios sobre el tema en el país, es necesario incursionar en el tema para tener una perspectiva más amplia sobre el tema y obtener resultados que podrán ser utilizados para diseños más realistas, con optimización de recursos y materiales.

Es importante comparar desde columnas fabricadas con altos niveles de tecnología como uniones finger - joint, hasta secciones fabricadas con métodos rudimentarios y empíricos de construcción, así como los diferentes tipos de maderas, ligantes entre las mismas, y tamaños. Para de esta manera establecer diferencia de costos, resistencias y servicialidad.

En nuestro medio la madera es explotada sin ningún control forestal, en consecuencia cada vez tenemos menos hectáreas de bosques, y es imprescindible estudiar nuevos métodos que permitan optimizar el uso de este recurso.

## **CAPÍTULO 2**

### **2.1 PROPIEDADES DE LA MADERA**

#### **2.1.1 CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS DE LA MADERA**

La madera es la parte sólida de los árboles es un material orgánico, no homogéneo y con una cubierta llamada corteza. La madera comercial se obtiene solo de árboles maduros. El tronco de estos árboles comprende una parte interna, la madera (xilema) y una parte externa, la corteza externa (epidermis, corteza).

Entre estas dos se encuentran el cambium y la corteza interna (floema). La parte más interna del tronco la ocupa la médula. El termino madera se refiere estrictamente al xilema secundario formado por la división celular del cambium vascular.

A medida que crece el árbol también aumenta la proporción de madera, hasta que finalmente constituye la mayor parte del volumen el tronco. En un tronco viejo la madera puede diferenciarse en dos partes, una externa llamada albura o huelle y una interna denominada duramen o pellín.

La madera está compuesta por celulosa y lignina. Sus células son huecas, de longitud variable y se encuentran distribuidas principalmente en sentido vertical como horizontal. Las diferentes combinaciones en los tipos, medidas, disposición y alineamiento de las células hacen que las diferentes especies puedan variar en su aspecto, propiedades físicas y propiedades químicas. Las cualidades macroscópicas que permiten caracterizar e identificar una especie dicen relación con la estructura y las propiedades físicas de la madera (anillos de crecimiento, albura y duramen, radios leñosos, textura, grano, vasos, color, olor, peso, dureza, brillo y vetado).

Hay tres diferentes cortes que se deben conocer para estudiar las características macroscópicas y microscópicas de la madera que son corte transversal, corte radial, y corte tangencial.

### **2.1.2 CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS DE LA MADERA**

La madera es un material heterogéneo debido precisamente a su estructura celular, variedad de formas, dimensiones y orientaciones que presentan las células del tronco. Las células tienen una orientación fundamental longitudinal en forma de tubos, puesto que tienen una pared y un espacio interior llamado lumen.

Los tejidos de coníferas y latifoliadas difieren en los tipos de células que los componen. Dado que estos tejidos están contruidos para enfrentar las necesidades naturales del árbol, existen células de conducción, resistencia mecánica y de almacenaje, lo que da lugar a los denominados tejido conductor o prosenquimático y tejido parenquimático respectivamente. Las coníferas y latifoliadas tienen distintos tipos de células para cumplir una función determinada.

La formación de la pared celular contempla cuatro etapas: división de las células iniciales del cambium, expansión de las células formadas, ensanchamiento celular y lignificación de la pared celular.

## **2.2 EFECTO DE LAS ESTRUCTURAS EN LAS PROPIEDADES DE LA MADERA**

Ninguna madera así sea del mismo árbol tiene las misma estructuras y propiedades físicas. Las diferencias tales como el peso o la razón de crecimiento pueden ser indicativas de la variabilidad estructural que podrían existir en un mismo árbol y entre árboles de una misma especie. Características estructurales, tales como el tamaño de los elementos celulares, espesor de las paredes celulares y proporción celulosa/lignina, son las características importantes en la determinación del comportamiento físico de la madera.

Las características dimensionales y físicas son variables en un árbol, es decir, exhiben un rango de valores. Las variaciones pueden relacionarse con la posición radial o axial de una muestra dentro de un anillo de crecimiento o abarcan una serie de anillos de crecimiento dentro de un mismo árbol. Cambios aparentemente menores en los porcentajes de tipos de células y sus dimensiones, estructura de la pared y proporción célula lignina son importantes para evaluar la calidad de la pulpa. Muchas de estas mismas variables son responsables de la variación en la densidad y los cambios que esta podría producir en las propiedades físicas de la madera.

Los factores que influyen la variabilidad de la madera son: cambios en el cambium con la edad, control genético que gobiernan la forma y crecimiento del árbol e influencias ambientales tales como, condiciones climáticas, geográficas o suministro de nutrientes.

Los factores que afectan la variabilidad de las propiedades de la madera en árboles individuales son las características celulares, densidad y madera juvenil. (Red Madera, Libro 1, 2005. Pg. 47)

### **2.3 MADERA DE COMPRESIÓN**

Es una madera anormal formada en la parte inferior de troncos y ramas inclinadas en coníferas. En la sección transversal de ramas y troncos afectados, aparece como un anillo excéntrico de crecimiento relativamente amplio y sin demarcación bien definida entre la madera de invierno y verano. Algunas de sus características son: color diferente, más rojizo que el de la madera normal. En un corte transversal la forma de las traqueidas es circular, manteniéndose así más allá del estado primario de desarrollo de la célula.

La madera de compresión posee menor proporción de celulosa más o menos un 10 % y mayor de lignina, en la misma proporción. Esta madera también difiere de la madera normal con respecto a sus propiedades físicas y mecánicas, la mayor proporción de madera de verano y espesor de las paredes celulares de las

traqueidas, conllevan a tener una densidad mayor. Presenta una alta contracción longitudinal que es atribuida a un mayor ángulo de las micro- fibrillas presentes en la pared secundaria.

Las propiedades de resistencia mecánica de la madera de compresión son afectadas porque tiene poca rigidez, baja resistencia a la flexión y dureza por su peso, y se quiebra muy repentinamente. Su contracción anormal puede presentar agrietamiento, torcedura y otras deformaciones. Todas estas anomalías se pueden ver reflejadas en las fallas de piezas de madera que soportan pesos.

Esta madera puede presentar problemas en la utilización de química de la madera, por ejemplo, es menos favorable para la elaboración de pulpa de papel de alta calidad. Como las células de la madera de compresión son paredes más gruesas, dificulta el trabajo en máquinas de corte, en comparación con la madera normal.

## **2.4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA**

Es necesario saber sobre las propiedades físicas de la madera que son humedad, densidad, contracción e hinchamiento, ya que así se puede utilizar la madera de la manera correcta.

### **2.4.1 HUMEDAD**

La humedad en la madera es indispensable para la vida de la plantas, cuando el árbol es procesado, la madera conserva una cierta cantidad de agua que se localiza tanto en los lúmenes celulares como en la pared celular y otros espacios que puede contener la madera. El contenido de agua varía según la especie de madera, el tipo de madera y la edad de la madera. Las maderas livianas como son porosas, contienen una mayor cantidad de agua que las maderas pesadas.

Como la madera es un material higroscópico absorbe o entrega agua al medio ambiente de acuerdo a las condiciones ambientales, por lo cual factores externos

como temperatura, humedad ambiental, etc. hace que la madera aumente o disminuya su contenido de humedad. El contenido de humedad puede definirse como el volumen de agua contenida en un volumen de madera. Para la fabricación de productos hechos de madera es necesario eliminar el agua en exceso y conseguir un contenido de humedad adecuado.

En el caso de madera laminada encolada el contenido de humedad óptimo es aquel que produce la unión encolada más resistente y que al ser incrementado por el agua del adhesivo, se acerque lo más posible al contenido de humedad de equilibrio que tendrá el elemento laminado, cuando esté en servicio. El contenido de humedad de la madera destinada a madera laminada no debe ser superior al 16% en el momento del encolado. Entre láminas adyacentes no debe existir una diferencia de humedad superior a 3%, entre la lámina más húmeda de una sección transversal y la más seca, tal diferencia no debe sobrepasar del valor 5%.

Si las Tablas con las cuales se construirán las láminas tienen diferentes contenidos de humedad, se debe proceder a la homogenización de las mismas. De otra forma, se producirá un juego en la madera que redundaría en la laminación de las líneas de encolado. El control del contenido de humedad se debe realizar a cada tabla.

#### **2.4.2 DENSIDAD**

Se puede definir como la relación entre la masa de los distintos tipos de elementos que conforman la madera y el volumen que estos ocupan. Como la madera es un material poroso, debe considerarse el volumen interno de los vacíos existentes. Como el contenido de humedad en la madera influye en el peso y las dimensiones de la pieza, se debe definir distintos tipos de densidades, entre las más importantes la densidad básica y la densidad de referencia. La **densidad básica** considera la masa de madera en estado seco y el volumen de la madera verde, mientras la **densidad de referencia** considera la masa y el volumen en las mismas condiciones de humedad. La densidad normal es la densidad de referencia al doce por ciento de contenido de humedad.



La densidad también es un criterio utilizado para estimar las características de resistencia mecánica de la madera. También se utiliza la densidad para estimar la cantidad de material leñoso de una especie.

Se puede determinar la facilidad con la cual se puede trabajar y tratar la madera, dependiendo de su densidad. Normalmente, las maderas de mayor densidad presentan mejor resistencia mecánica y mayor cantidad de material leñoso, sin embargo, son más difíciles de trabajar y tratar.

De acuerdo a la densidad se puede clasificar a las maderas en livianas, semi - pesadas, y pesadas. La densidad de la madera depende de la edad de los árboles y está estrechamente relacionada con la estructura anatómica, particularmente depende del espesor de la pared celular de las fibras.

### **2.4.3 CONTRACCIÓN**

Es una característica indeseable de la madera ya que trae inconvenientes al construir con madera. La contracción es la disminución de dimensiones que sufre la madera al perder humedad bajo el punto de saturación de las fibras y es proporcional al descenso de humedad sufrido. Hay que considerar que es un material anisótropo, es decir, sus propiedades varían según la dirección la que se mide. Esta característica se refleja en que la madera se contrae más en la dirección tangencial (tangente a los anillos de crecimiento) que en la dirección radial (perpendicular a los anillos) y que en la dirección longitudinal (paralela a la dirección de las fibras de la madera) aquí su contracción es muy pequeña y casi despreciable.

El colapso es la disminución irregular de dimensiones que sufre la madera de algunas especies al perder humedad en las primeras etapas del secado, este fenómeno se caracteriza por el aplastamiento de las paredes celulares y como una contracción anormal de la madera ocurrida durante salida del agua libre.

#### **2.4.4 HINCHAMIENTO**

Es causado por el incremento dimensional producido en una madera seca, al aumentar su contenido de humedad. Este es un fenómeno inverso a la contracción no ocurre en su misma proporción.

### **2.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA**

Las propiedades mecánicas pretenden dar una idea general de las capacidades resistentes de la madera para cada tipo de esfuerzos. La madera en uso debe soportar una serie de cargas de distintos tipos.

Hay tres tipos de cargas:

#### **2.5.1 Cargas permanentes o muertas**

Corresponden al propio peso del material.

#### **2.5.2 Sobrecargas o cargas vivas**

En general corresponden a elementos que se pueden incorporar a la construcción, tales como personas, mobiliario, y equipo en general, que signifiquen una carga o peso para la madera.

#### **2.5.3 Cargas eventuales u ocasionales**

Como su nombre lo indica, la influencia de estas cargas es eventual y corresponde a las cargas ocasionadas por el efecto de elementos climáticos, tales como la acción del viento, nieve, lluvia, sismos, etc. La madera puede ser sometida a distintos esfuerzos, los que se clasifican de acuerdo a la forma en la que la fuerza es aplicada en la pieza de madera, en relación a la dirección y sentido de la fuerza, considerado también como incide en la pieza con respecto a la orientación de las fibras de la madera.

Los esfuerzos primarios son:

Compresión:	Paralela a la fibra Normal a la fibra
Tracción:	Paralela a la fibra Normal tangencial Normal radial
Cizalle:	Longitudinal Paralelo tangencial Paralelo radial

## 2.6 ESFUERZO ACOMPRESIÓN

Se habla de compresión cuando la fuerza que actúa sobre la madera tiende a reducir las dimensiones y el volumen de ésta. La carga a la que se somete la madera en compresión puede ser aplicada en forma paralela a la orientación de las fibras o perpendicular (o normal) a las mismas.

Figura 2.1. Compresión paralela a las fibras



Fuente: [es.scribd.com/doc/53978830/14-Compresion-paralela-a-las-fibras](https://es.scribd.com/doc/53978830/14-Compresion-paralela-a-las-fibras)

Figura 2.2. Compresión perpendicular a las fibras



Fuente: [es.scribd.com/doc/53978830/14-Compresion-paralela-a-las-fibras](https://es.scribd.com/doc/53978830/14-Compresion-paralela-a-las-fibras)

## 2.7 ESFUERZO A TRACCIÓN

Ocurre cuando la fuerza que se aplica a la madera tiende a provocar un aumento en las dimensiones de la madera. La carga a la que se somete la madera en tracción puede ser aplicada en forma paralela a la orientación de las fibras o perpendicular (o normal) a las mismas.

Figura 2.3. Tracción paralela a las fibras



Fuente: [es.scribd.com/doc/53978830/14-Compresion-paralela-a-las-fibras](https://es.scribd.com/doc/53978830/14-Compresion-paralela-a-las-fibras)

Figura 2.4. Tracción perpendicular a las fibras



Fuente: [es.scribd.com/doc/53978830/14-Compresion-paralela-a-las-fibras](https://es.scribd.com/doc/53978830/14-Compresion-paralela-a-las-fibras)

## 2.8 ESFUERZO AL CIZALLE

Otro nombre dado para este es esfuerzo de corte, consiste en que dos fuerzas iguales, paralelas y de sentido contrario, tienden a hacer resbalar una, sobre otra, las superficies contiguas de un miembro. O sea, la fuerza que actúa sobre la madera lo hace de tal forma de tratar de provocar un desplazamiento de una porción de la pieza en relación a la otra, lo que asemeja una acción de corte.

Figura 2.5. Cizalle

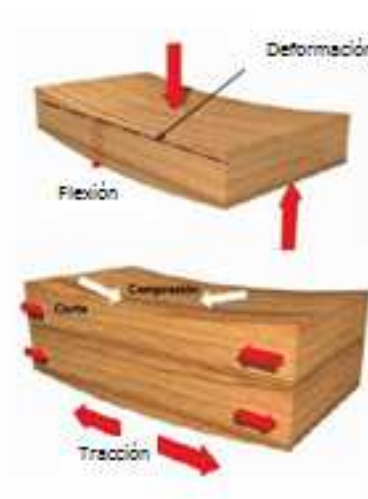


Fuente: es.scribd.comdoc5397883014Compresion-paralela-a-las-fibras

## 2.9 ESFUERZO A FLEXIÓN

Este esfuerzo es aquel al que la madera es sometida con mucha frecuencia, especialmente en la construcción. Resuelta de la combinación de los esfuerzos primarios que son Compresión, Cizalle y Tracción.

Figura 2.6. Flexión.



Fuente: es.scribd.comdoc5397883014Compresion-paralela-a-las-fibras

## **2.10 FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS**

Estos son: defectos, densidad, contenido de humedad, temperatura, tratamientos de preservación, albura y duramen.

## **2.11 OTRAS PROPIEDADES DE LA MADERA**

Propiedades acústicas, térmicas, conductividad térmica y eléctrica, están relacionadas con la aptitud de la madera para ser buen aislante.

## **2.12 TIPOS DE UNIONES EN LOS EXTREMOS**

Las uniones se realizan para lograr elementos cuya longitud sea superior al largo que es posible obtener en la madera comercial. Pueden ser de tope, biseladas y empalmes dentados (finger - joints y hooked scart - joints). El tipo de unión más usado en madera laminada es la unión dentada, dada la calidad de la unión que se obtiene. Cualquiera sea el tipo de unión de extremos que se confeccione, debe ser hecho con precisión, correctamente alineada y fraguada con eficiencia. Cuando se haga necesario obtener piezas de anchos mayores que los usuales, es decir, cuando el ancho de la madera comercial sea inferior al ancho de la estructura requerida, se deben realizar uniones de canto. Estas uniones pueden ser a tope machihembradas.

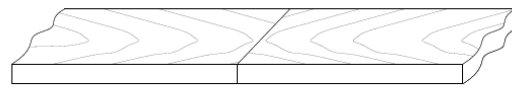
### **2.12.1 Unión a tope**

Consiste en la unión de dos láminas cada una cortada a 90 grados.

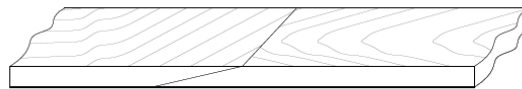
### **2.12.2 Unión a Bisel**

Consiste en la unión de dos láminas de madera cortadas a cuarenta y cinco grados, se realiza para conseguir mayor superficie de contacto entre superficies.

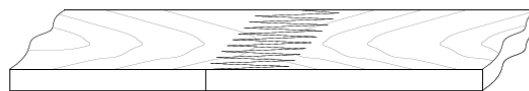
Figura 2.7. Tipos de unión



Union de tope



Scarf – joint o corte de pluma



Finger – joint o endentado

Fuente: Norma chilena de la construcción.

### **2.12.3 ENSAMBLAJE (FINGER - JOINT) O ELABORACIÓN DE UNIONES DENTADAS**

Ensamblaje que se realiza entre los extremos de piezas de madera en las que se han perfilado dientes trapezoidales a los que posteriormente se aplica adhesivo y presión para unirlos.

#### **Ventajas del ensamblaje**

- Permite construir piezas de madera en los largos requeridos, disminuyendo las pérdidas.
- Se obtiene piezas de madera libres de defectos como nudos, grietas, manchas y otros.
- Otorgan mayor estabilidad a la madera, minimizando las deformaciones en servicio.
- Permiten recuperar madera corta y curva.

El proceso se realiza con una máquina compuesta principal por una fresadora, encolado y prensa.

### **Etapas del proceso**

1. Preparación de la madera y alimentación de la máquina
2. Despuntado o escuadrado del block en los extremos
3. Fresado de precisión de los block en los extremos
4. Encolado de cada block en un extremo
5. Pre ensamblado de una pieza compuesta por blocks
6. Prensado y evacuación de las piezas

#### **2.12.3.1 Variables de la calidad en el ensamblado**

Los factores que intervienen en la calidad final de la unión dentada consideran aspectos relativos a las características de la madera y del adhesivo, al diseño de los dientes y al proceso de elaboración.

#### **2.12.3.2 Productividad del proceso finger joint**

Hay variables que influyen en la productividad como son: los tiempos muertos de la máquina, principalmente la preparación de la máquina, el largo promedio del block, velocidad de alimentación y escuadría. La calidad de la madera, reflejado en el largo promedio de los blocks, influye notablemente en la productividad del proceso. (Red Madera, Libro 5, 2007. Pg. 36)

La capacidad de procesamiento de la máquina se expresa por el número de blocks o número de uniones posibles de realizar en un minuto, lo cual estará limitado por la capacidad de la prensa o de los cabezales fresadores.

Si la alineación y el avance de la madera en el proceso son constantes y no varían con la escuadría del block, la productividad expresada como metrocúbico por hora sería superior para las escuadrías mayores. La productividad se expresa



se mejor manera en metros lineales/ hora; sin embargo en la práctica su rango varia considerablemente.

#### **2.12.3.3 Línea de encolado**

La línea de encolado o línea de cola se hace para eliminar las irregularidades de los listones y preparar sus caras para el encolado y posterior prensado. La línea de encolado se realiza generalmente en una sierra partidora (rip saw) o en una máquina perfiladora. También se puede hacer con una sierra circular de mesa o cualquier sierra que realice cortes rectos y a escuadra; sin embargo, la productividad es menor respecto a los otros métodos y se justifica para bajas producciones.

Superficies no lisas originan líneas de encolado de mejor calidad, esto es lo que se cree, pero ensayos muestran que con esto no se logra una buena unión. Pero también las superficies muy lisas como las que son lijadas, están cubiertas de polvo de aserrín suelto, esto causa que las propiedades de encolado de la madera se afecten.

#### **2.12.3.4 Encolado y Prensado**

Luego del perfilado de los listones o de la elaboración de la línea de cola, estos deben ser rápidamente armados, encolados y prensados; debido a que los cambios superficiales de la madera, producto de tensiones internas o contracciones, pueden provocar una adherencia inadecuada. Hay normas que recomiendan que el intervalo de tiempo entre la confección de la línea de cola y el encolado no debe ser superior a 24 horas. Al aplicar el adhesivo se debe respetar las condiciones ambientales.

#### **2.12.3.5 Adhesivos**

Los adhesivos usados por excelencia son los tipos de PVA (acetato de polivinilo), algunas ventajas de estos son; vienen ya preparados de fábrica y tienen buenas

condiciones para almacenarlos, tienen una buena capacidad de relleno de espacio (gap filling), la línea de cola es elástica e incolora, buena estabilidad en almacenamiento prolongado, alta resistencia al agua y al calor (mas si se le agrega un 5% de endurecedor), fácil aplicación a temperatura ambiente, amplia gama de viscosidades.

Las condiciones ideales de aplicación de una cola PVA son:

Temperatura ambiente	15 – 20 °C
Temperatura ambiente	15 – 25 °C
Humedad relativa del ambiente	60 – 70%
Humedad de la madera	8 – 10 %
Cantidad de adhesivo aplicado	150 g / m <sup>2</sup>
Presión de prensa	5 – 7 kg / cm <sup>2</sup>
Tiempo de prensa	15 – 60 minutos
Tiempo total fraguado	24 – 48 horas

#### **2.12.3.6 Encolado**

Hay que tener en cuenta la influencia de algunos parámetros que afectan el resultado final del encolado estos son:

Tiempo abierto: tiempo de transcurrido entre la aplicación o extendido de la cola y el momento en que se ejercita la máxima presión; este tiempo debe reducirse.

Madera y superficie a encolar: la facilidad de encolado varía según el tipo de madera. De esta manera maderas duras con poros cerrados presencia de sustancias resinosas y grasas, son notoriamente más difíciles de encolar que aquellas que son porosas y menos densas. Por esto se requiere una mezcla de mayor viscosidad para evitar una excesiva penetración de la cola en la madera y deficiencias en el esparcido.

Cantidad de cola: bajo cierta cantidad mínima de cola aplicada disminuirá el poder adhesivo final de la unión; también disminuirá el tiempo abierto lo que requiere de un armado y cargado rápido en la prensa. Por el contrario una cantidad abundante de cola aumentará el poder adhesivo final. Sin embargo, aumentará el tiempo de fraguado en la prensa. La dosificación del adhesivo a veces se excede para no tener piezas defectuosas. Pero la dosificación recomendada varía de 150 a 250 g/ m<sup>2</sup> en una cara. Un estudio prueba que en una madera de pino radiata y cola PVA funciona bien con una dosis de 100 g/ m<sup>2</sup>. Se aplica la cola con pincel, brocha, espátula pero es mejor si estos utensilios dosifican la mezcla.

Para medir la cantidad de adhesiva aplicada en la superficie de la madera se pueden utilizar los siguientes métodos:

- Medir una superficie encolada y pesar la probeta antes y después de ser encolada. La diferencia de masa determina la cantidad de gramos por unidad de área.
- Medir la cobertura de una determinada cantidad de adhesivo cuya masa es conocida.
- También se puede medir el espesor de la película aplicada con un calibrador.

La humedad es un factor a tomar en cuenta al rato del encolado, la madera seca absorbe más rápido la mezcla de adhesivo y agua, con lo que la línea de cola se seca prematuramente. Por esto se requieren de tiempos abiertos más breves; sin embargo, se reducen los ciclos de prensado. Maderas húmedas retardan el proceso de formación de la película adhesiva extendiendo el tiempo de prensado.

Diferencias de humedades superiores a un 5% entre dos piezas de madera producirán problemas en el encolado. Las diferencias de humedad en una misma pieza pueden producir, con el paso del tiempo, de laminaciones producto de contracciones no deseadas. Con humedades ambientales bajas el adhesivo pierde agua más rápidamente, disminuyendo el tiempo abierto.

Cuanto mayor sea la temperatura ambiente, más corto será el tiempo abierto; y mayor temperatura de la madera y de cola, menos será el tiempo de prensado. Se usa para el fraguado calor con vapor o por temperatura alta. Las temperaturas muy bajas pueden impedir el encolado si este se realiza bajo la temperatura mínima que es  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  de formación de película. Para bajar, la temperatura mínima de formación de película se agregan al adhesivo entre 1 y 5% de cola o plastificante.

### **2.12.3.7 Prensado**

Esto es clave en la fabricación de tableros de alistonados. Es el prensado de cantos y su objetivo es mantener los listones unidos entre sí durante el tiempo necesario para que la cola fragüe o adquiera el grado de polimerización adecuado. El fraguado puede realizarse a temperatura ambiente o aplicando calor, ya sea por calefacción con vapor o por alta frecuencia.

En la etapa de prensado se harán evidentes los defectos producidos por una mala preparación de la madera, principalmente aquellos producidos por un mal maquinizado, humedad en la madera y aplicaciones inadecuadas de adhesivo. Estos defectos que causan de laminaciones, no se corrigen aplicando mayores presiones en los listones, porque esto produce que la cola tienda a desaparecer además de dañar la madera.

Durante el prensado, la aplicación de presión se realice sobre dos planos perpendiculares entre sí. El plano perpendicular a las caras del panel tiene como objetivo mantener listones alineados, mientras que el paralelo a las caras es el encargado de transmitir la presión necesaria para el encolado de los listones.

Existen diferentes máquinas para hacer este trabajo, estas pueden clasificarse en prensas continuas y discontinuas. Las prensas continuas se utilizan generalmente para elaborar almas de tableros alistonados cubiertos con una chapa (placa carpintera), ya que no pueden ejercer las presiones necesarias para uniones de calidad.

La prensa rotatoria está compuesta por un conjunto de prensas que giran alrededor de una estructura mediante un accionamiento hidráulico o neumático. Las prensas o sargentos constan de unas mordazas móviles, las que se abren o cierran al girar un tornillo sin fin con una pistola ajustadora. El proceso requiere de dos operadores. La magnitud de la presión a aplicar esta dada por el fabricante de la prensa, utilizándose generalmente metodologías que incluyen fórmulas y gráficos para determinar la presión que debe marcar el manómetro de la prensa.

En general para pino insigne, la presión específica en la línea de encolado debe ser de 5 a 9 kg/ cm<sup>2</sup>. En el caso de maderas duras se aconseja presiones de 7 a 12 kg/cm<sup>2</sup>. Estos valores se multiplican por el espesor y largo del panel y se correlacionan en el gráfico dado por el fabricante para determinar la presión que debe marcar el manómetro y que varía de acuerdo al número de prensas o sargentos ocupados.

Esta es la fórmula que también se utiliza:

$$\text{Presión en el manómetro (kg/ cm}^2\text{)} = \frac{\text{Superficiea encolar (cm}^2\text{)} * \text{Presión especifica (kg/ cm}^2\text{)}}{\text{Suma de la superficie de los pistones de la prensa (cm}^2\text{)}}$$

El tiempo de prensado, a temperatura ambiente, está fuertemente influenciado por la humedad de la madera. Para cierta mezcla adhesiva, las condiciones normales se presentan entre un 6% y 10% de contenido de humedad, sobre un 10% y hasta un 12% el tiempo de prensado puede aumentar del 20 al 30%. Con un 12% de contenido de humedad el tiempo de prensado puede incluso doblarse. En condiciones normales se considera suficiente un tiempo de prensado igual al doble del tiempo de gelatinización de la mezcla adhesiva a temperatura ambiente.

Las prensas rotatorias tienen un costo más bajo, usan menos operadores, son fáciles de usar y el mantenimiento es menos complejo. La productividad de estas prensas varía de acuerdo al número de secciones y es aproximadamente 0,63 m<sup>2</sup>/hora-sección.

Para producciones mayores es recomendable el método por radio frecuencia. Este consiste básicamente en que los listones de madera, previamente encolados, se ponen entre un plato superior y otro inferior, los que se encuentran conectados a un generador de alta frecuencia, siendo los electrodos encargados de establecer un campo de corriente alterna de alta frecuencia en la línea de encolado mientras se aplica presión. La energía producida en este campo se transforma en calor, el cual fragua el adhesivo. Una característica importante de este campo eléctrico es que solo actúa en la zona húmeda de la línea de encolado sin calentar la madera, a diferencia de otros tipos de calentamiento que requieren mayores tiempos y consumos de energía.

Una vez formado el tablero, su manipulación debe realizarse con cuidado para evitar golpes o rayas que no puedan ser eliminados posteriormente, principalmente en el lijado. Una vez que el tablero ya sale de la prensa, se requiere de un tiempo de acondicionado en un lugar cuya temperatura y humedad relativa se encuentra muy próximas al sitio de encolado. La duración de este tiempo de fraguado vendrá dada por el fabricante del adhesivo y permitirá alcanzar la resistencia óptima de las uniones encoladas y por consiguiente del tablero. El general el tiempo adecuado de almacenaje se encuentra alrededor de las 36 horas para una temperatura ambiente de 20 °C .

La preservación de la manera consiste en la incorporación, por diferentes medios, de productos químicos que aumentan su resistencia a los agentes que la afectan, para lograr un aumento considerable de su vida útil una vez puesta en servicio. (Red Madera, Libro 2, 2005. Pg. 51)

#### **2.12.3.8 Productos Preservantes**

Los preservantes son productos preventivos, utilizados para evitar la degradación de la madera por diferentes agentes. Sin embargo, cuando ya se ha producido el ataque de agentes destructores, existen otros productos que actúan como control de estos organismos xilófagos, son los llamados erradicantes. Los preservantes varían en naturaleza, eficacia y costo: es por esto que al elegir esto se debe

considerar el uso al que se va a destinar la madera preservada, la vida útil que se requiere de ella y los aspectos económicos del tratamiento.

Hay variables que afectan la comercialización a largo plazo de los productos como son: normas medioambientales, normas de salud, alternativas de menor costo, mejoramiento de características de preservantes en cuestión y uso de preservantes en estado gaseoso.

Los siguientes son requisitos para ser un preservante: toxicidad, penetrabilidad, permanencia, inocuidad, no corrosiva, no combustible, fácil de aplicar, permitir acabados, no tóxicos, económicos y accesibles.

Hay preservantes que se clasifican por su naturaleza y son: oleosos, oleo solubles e hidrosolubles. La Creosota es la que se destaca en los preservantes oleosos. La creasota tiene diferentes tipos. Los preservantes oleo solubles tienen como característica común ser solubles en solventes oleosos derivados de petróleo. Estos son de alta toxicidad para hongos, insectos, a bajas concentraciones. Ejemplos de preservantes oleo solubles son pentaclorofenol, naftenato de cobre entre otros. Los preservantes hidrosolubles son constituidos por sales metálicas simples, dobles o múltiples, que se solubilizan en agua. Su composición tiene sustancias fungicidas e insecticidas, más un fijador que impide la lixiviación de la madera tratada. La mayor ventaja de este grupo es que se conoce perfectamente sus componentes y porcentajes en la formulación. Un ejemplo de los preservantes hidrosolubles es el sulfato de cobre. El óxido de borato es una alternativa de productos preservantes. Los ignífugos o retardantes del fuego son usados cuando la madera es expuesta a altas temperaturas, produce gases volátiles inflamables. La madera tratada con ignífugos no despiden tanto humo y los gases no son tóxicos ni combustible. El mecanismo de acción de los ignífugos cuando la madera es sometida a un calentamiento y llega a temperaturas de ignición de 275°, los productos químicos retenidos empiezan a reaccionar, se desprenden vapores no inflamables, se forma carbón y agua, lo que hace disminuir los gases inflamables orinándose una capa que actúa como escudo protector. Esto evita que la madera se siga quemando y que el fuego continúe su avance.

### **2.12.3.9 Hidrófugos**

Esto se usa para proteger a la madera de condiciones ambientales, como son humedad y la sequia. El mecanismo de acción de estos hidrófugos es: protegiendo la madera del deterioro que se produce al estar en contacto con el ambiente, lo protege además de organismos biológicos como los hongos e insectos. A la vez de evitar la variación de la humedad en las piezas tratadas, otorgándole mejor estabilidad dimensional. Un tratamiento de hidrófugo sencillo puede ser la mezcla de aceite de linaza y pentaclorofenol, esto da una acción fungicida e insecticida.

El pincelado, pulverizado, inmersión, ascensión y ósmosis son métodos de preservación sin vacío ni presión. Estos métodos se pueden aplicar como tratamiento de prevención de la degradación de la madera o tratamientos curativos, en que la aplicación se realiza para detener la degradación que se está produciendo. Se llaman curativos, porque la naturaleza de los preservantes no logra la permanencia de su toxicidad.

Hay tratamientos curativos, dependiendo del estado en que se encuentra el producto químico a aplicar, se pueden identificar distintos procesos como son aspersión, pulverizado y fumigación. Los métodos de preservación con vacío y presión son: método Boucherie , método Bethell o Célula vacía, método Lowry o célula llena, método Rueping o célula llena, método Boulton, método por vacío y método de doble vacío.

### **2.12.3.10 Etapas del proceso de impregnación con vacío y presión**

Luego que la madera está en el cilindro de impregnación, se cierra herméticamente y se da comienzo al vacío inicial para eliminar el aire del interior de la madera. Esta etapa demora entre 15 a 60 minutos dependiendo del tipo de madera.



## CAPÍTULO III

### 3.1 LEY DE HOOKE

Aproximadamente en el Año 1678, Robert Hooke después de números ensayos realizados a compresión y tracción de barras determinó que existía una proporcionalidad entre la fuerza y la deformación dentro de un intervalo, por lo cual dedujo que los esfuerzos son proporcionales a sus deformaciones unitarias, es decir:

$$\sigma = \varepsilon E \textbf{(3.1)}$$

Ecuación 3.1 Ley de Hooke

Conociendo que:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \sigma = \frac{\textit{Carga}}{\textit{Área de la sección transversal}}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del material

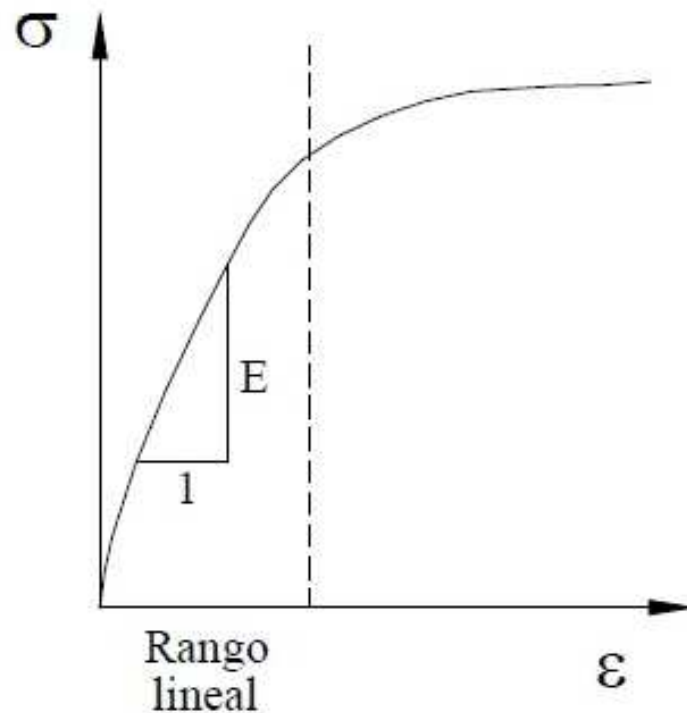
$\varepsilon$  = Deformación unitaria

$\delta$  = Deformación de la sección

L = Longitud de la probeta

$\sigma$  = Esfuerzo

Figura 3.1. Diagrama esfuerzo - deformación.



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos38/compresión/tracción.shtml>

### 3.2 COMPRESIÓN DE ELEMENTOS

Los elementos de madera solicitados a carga axial, y carga axial más momento flector deben diseñarse con las hipótesis y ecuaciones tradicionales para columnas. Se asume que el material cumple la ley de Hooke, es isotrópico y homogéneo, esta hipótesis es aceptable para los niveles de esfuerzo que normalmente se tienen en las columnas en servicio.

Las columnas son, en general, de madera sólida o maciza, sin embargo se pueden usar columnas de madera laminada, formadas por la unión de piezas que permitan alcanzar un mayor momento de inercia de la sección transversal, en cuyo caso garantizaran la condición anterior. Pueden usarse adhesivos y/o elementos metálicos (tornillos, pernos etc.) que garanticen el funcionamiento integral de la sección.

En general las columnas de madera son de sección rectangular, sin embargo se pueden usar otras secciones y considerar esa sección, y el momento de inercia para el cálculo respectivo.

Los entramados, muros, son conjuntos de columnas en general de sección pequeña, unidos en sus extremos por soleras, (superior e inferior) y arriostrados por elementos horizontales generalmente a media altura; el revestimiento, cualquiera que fuere, no se considera colaborante para cargas verticales. El revestimiento es la parte resistente para cargas horizontales como viento y sismo.

Los entramados (muros, tabiques) deben diseñarse para la combinación de cargas verticales más cargas horizontales, por ejemplo las de viento perpendicular al plano del entramado, en ese caso los pies-derechos están solicitados a flexo-compresión y deben diseñarse para esa condición de cargas.

El diseño de elementos de madera sometidos a compresión o flexo-compresión está controlado por la resistencia, combinación de resistencia y estabilidad, o simplemente estabilidad y en consecuencia se tienen columnas cortas, intermedias y largas.

Las columnas deben diseñarse con su longitud efectiva. La longitud efectiva interviene en la determinación de la carga máxima por pandeo lateral que puede soportar la columna. La longitud efectiva se calcula multiplicando la longitud no arriostrada de la columna por un factor "k" que considera las restricciones o grado de empotramiento de los extremos. No obstante el diseñador debe evaluar las restricciones reales que los apoyos proporcionan a la columna en cada caso en particular. En cualquier caso el valor de "k" siempre será mayor que la unidad.

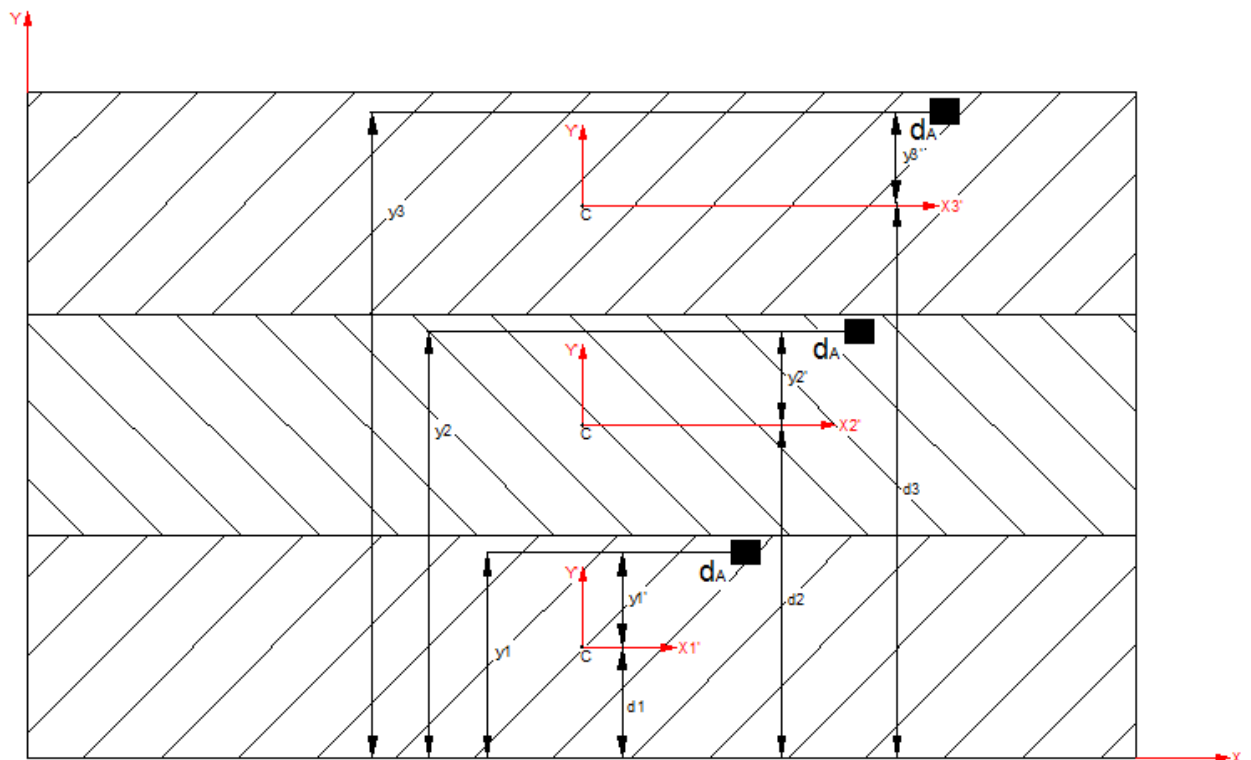
En los entramados los pies-derechos están arriostrados por elementos horizontales, normalmente a media altura, en ese caso deben considerarse dos longitudes efectivas.

En algunos casos el revestimiento del entramado está unido a los pies-derechos en toda su altura y como consecuencia el pandeo en el plano no tiene lugar, el pandeo ocurrirá fuera del plano y la carga se calculará para la longitud efectiva fuera del plano.

### 3.3 TEOREMA DE STEINER

Para la demostración del teorema de los ejes paralelos partimos de la figura 3.2.

Figura 3.2. Teorema de ejes paralelos



Realizado por: Emilio Dávalos

En la Figura  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , representa la distancia desde un elemento de área infinitesimal hasta el eje  $x-x$ , y el momento de inercia  $I$  de un área  $A$  con respecto al eje  $x-x$  se puede expresar como:

$$I_x = \int y^2 d_A \quad (3.2)$$

$y'$  es la distancia desde el elemento  $d_A$  hasta  $x'-x'$ , por lo cual:

$$Y_1 = Y'_1 + d_1$$

$$Y_2 = Y'_2 + d_2$$

$$Y_n = Y'_n + d_n$$

Donde:

$d$  = distancia entre los ejes  $x-x$  y  $x'-x'$ .

Sustituyendo por  $y$  en la ecuación de la integral anterior:

$$I_x = \int y^2 d_A = \int (y' + d)^2 d_A$$

$$I_x = \int (y'_1)^2 d_{A1} + 2d_1 \int y'_1 d_{A1} + d_1^2 \int d_{A1} + \int (y'_2)^2 d_{A2} + 2d_2 \int y'_1 d_{A2} + d_2^2 \int d_{A2} +$$

$$\int (y'_3)^2 d_{A3} + d_3 \int y'_3 d_{A3} + d_3^2 \int d_{A3} + \dots + \int (y'_n)^2 d_{An} + 2d_n \int y'_n d_{An} + d_n^2 \int d_{An}$$

La primera integral representa el momento de inercia  $\bar{I}$  del área con respecto al eje centroidal  $x'-x'$ . La segunda integral representa el primer momento del área con respecto al eje  $x'-x'$ , por lo cual la segunda integral es igual a cero. Por lo cual se observa que la última integral es igual al área total  $A$ , y por lo tanto:

$$I_X = \sum_1^n \bar{I}_x + \gamma \sum_1^n A_i d_i^2 \quad (3.3)$$

En una sección sólida o maciza  $\gamma = 1$  lo cual también se cumple cuando las uniones entre elementos son rígidas, en caso contrario, si las partes de la sección no están unidas por ningún ligante  $\gamma = 0$ . En el caso de uniones cuya rigidez depende del grado de rigidez del ligante el valor de  $\gamma$  variará entre  $0 < \gamma < 1$ .

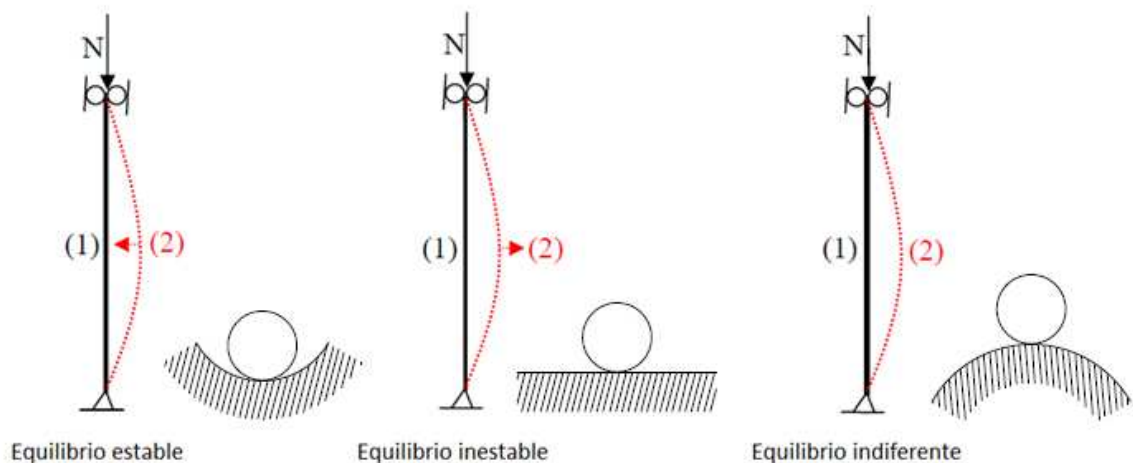
### 3.4 TEORÍA DE EULER

La base de la teoría de las columnas es la fórmula de Euler, que fue publicada en 1757 por Leonardo Euler, un matemático suizo. La fórmula de Euler es válida solamente para columnas largas.

*La carga crítica de pandeo* es la carga axial máxima que una columna puede soportar cuando está a punto de pandearse, por ello se supone que la columna es inicialmente recta, con material homogéneo, de sección transversal constante en toda su longitud y cumple con la ley de Hooke.

Cuando una columna es cargada, el sistema tiene que llegar al equilibrio, por lo cual la columna puede quedarse en posición recta o deformarse ligeramente, como se muestra en la figura 3.3.

Figura 3.3. Equilibrio de columnas



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/2561065/Tema10Pandeo>

El equilibrio estable consiste en que si al separar la columna un poco a la posición 2 y se la suelta, vuelve a la posición 1. El equilibrio inestable consiste en que si al separar la columna un poco a la posición 2 y se la suelta, se aleja de la posición 1. El equilibrio indiferente consiste en que si al separar la columna un poco a la posición 2 y se la suelta, queda en la posición 1. El que una columna

adopte uno u otro tipo de equilibrio, va depender del valor de la carga de compresión que se aplique. Se denomina carga crítica al valor de la carga de compresión que hace que alcance el equilibrio indiferente, es decir:

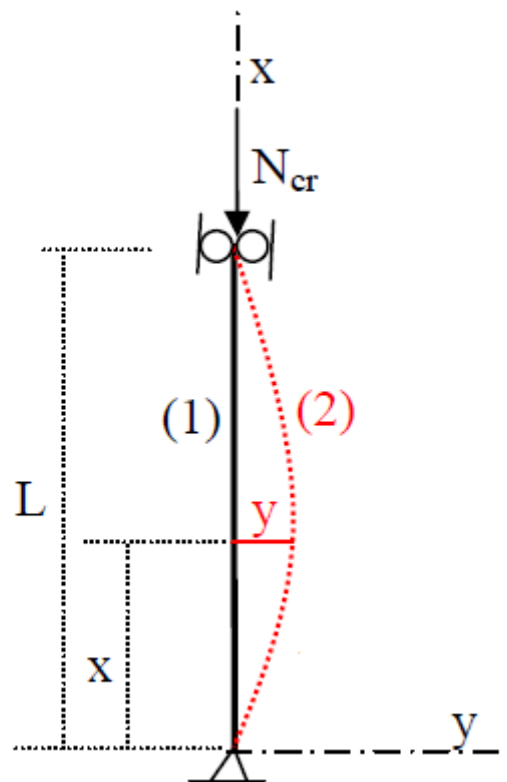
Si  $N = N_{cr} \rightarrow$  Equilibrio indiferente

Si  $N < N_{cr} \rightarrow$  Equilibrio estable

Si  $N > N_{cr} \rightarrow$  Equilibrio inestable

Considérese una columna en la posición 1 en equilibrio indiferente, como se muestra en la figura 3.4.

Figura 3.4. Carga crítica



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/2561065/Tema10Pandeo>

El momento alrededor del eje Z es:

$$M_Z = N_{Cr}y$$

La ecuación diferencial de la elástica en la posición 2 es:

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M_Z}{EI_Z} \quad (3.4)$$

Donde:

$$\frac{1}{r} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{3/2}}$$

$$\text{Si } \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{3/2} = 0 \rightarrow \frac{1}{r} \cong \frac{d^2y}{dx^2}$$

Sustituyendo:

$$EI_Z \frac{d^2y}{dx^2} = -M_Z = -N_{Cr}y$$

Despejando e igualando a cero obtenemos la ecuación diferencial de la línea elástica.

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{N_{Cr}}{EI_Z}y = 0$$

Si:

$$K_Z^2 = \frac{N_{Cr}}{EI_Z} \quad (3.5)$$



Entonces:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + K_Z^2 y = 0$$

Esta es una ecuación diferencial de segundo grado homogénea con coeficientes constantes. La solución general es:

$$y = C_1 \text{Sen}o K_Z x + C_2 \text{Cos} K_Z x$$

Cálculo de las constantes C1 y C2:

Si  $x = 0 \rightarrow y = 0$  y  $C_2 = 0$ .

Si  $x = L \rightarrow y = 0$  y  $C_1 \text{Sen}o K_Z L = 0$  entonces  $C_1 = 0 \rightarrow y = 0$  Elástica rectilínea posición 1.

$\text{Sen}o K_Z L = 0 \rightarrow K_Z L = n \pi$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ )

$$K_Z = \frac{n \pi}{L} \rightarrow K_Z^2 = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \quad (3.6)$$

Igualando: (3.5) y (3.6):

$$\frac{N_{Cr}}{E I_Z} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \rightarrow N_{Cr} = \frac{n^2 \pi^2 E I_Z}{L^2} \quad (3.7)$$

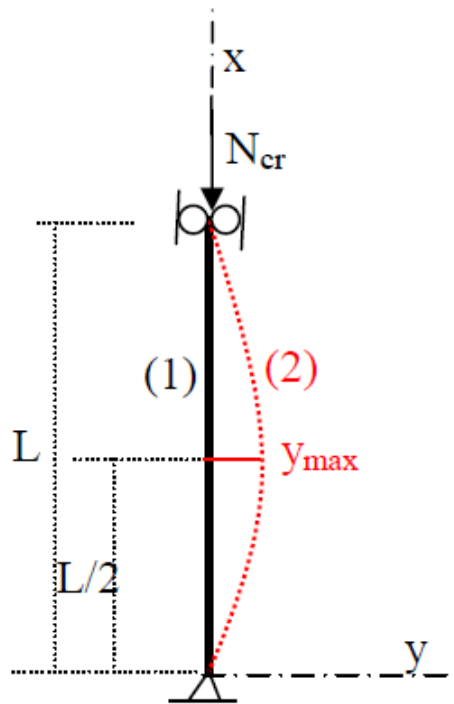
Si  $n = 1 \rightarrow y = C_1 \text{Sen}o \frac{\pi}{L} x$

La flecha máxima será:  $\frac{dy}{dx} = 0 \rightarrow x = \frac{L}{2} \rightarrow y_{\text{máx}} = y \left( x = \frac{L}{2} \right) = C_1 \text{sen}o \frac{\pi}{2} = C_1$

y por lo tanto:

$$N_{Cr} = \frac{\pi^2 E I_{\text{min}}}{L^2} \quad (3.8)$$

Figura 3.5. Fórmula de Euler,  $n = 1$



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/2561065/Tema10Pandeo>

Si  $n = 2 \rightarrow y = C_1 \text{ Seno } \frac{2\pi}{L} x$

La flecha máxima será:  $\frac{dy}{dx} = 0 \rightarrow x = \frac{L}{4}, x = \frac{3L}{4} \rightarrow$

$$y_{\text{máx}} = y \left( x = \frac{L}{4} \right) = C_1 \text{ seno } \frac{2\pi L}{4L} = C_1 \text{ seno } \frac{\pi}{2} = C_1$$

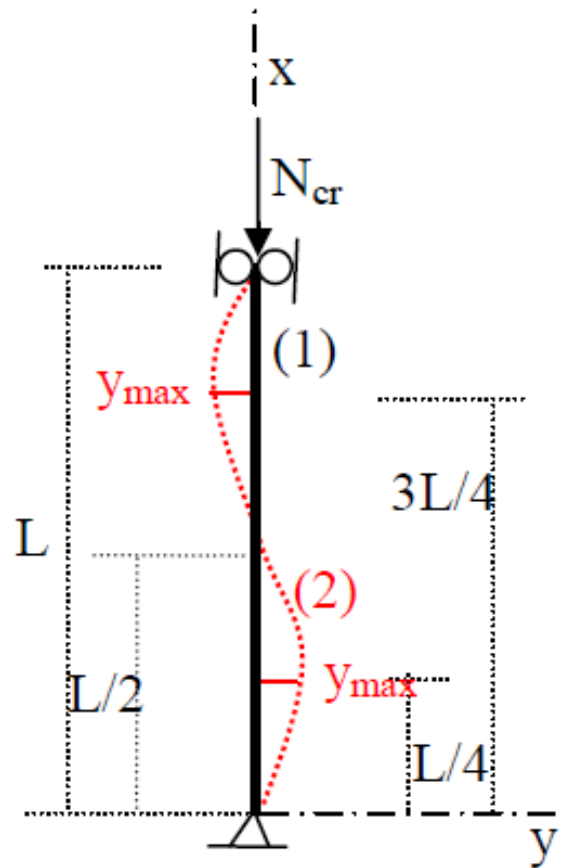
$$y_{\text{máx}} = y \left( x = \frac{3L}{4} \right) = C_1 \text{ seno } \frac{6\pi L}{4L} = C_1 \text{ seno } \frac{3\pi}{2} = -C_1$$

Por lo tanto:

$$N_{Cr} = 2^2 \frac{\pi^2 E I_{\text{min}}}{L^2}$$

En la figura se explica la forma de la elástica:

Figura 3.6. Fórmula de Euler,  $n = 2$

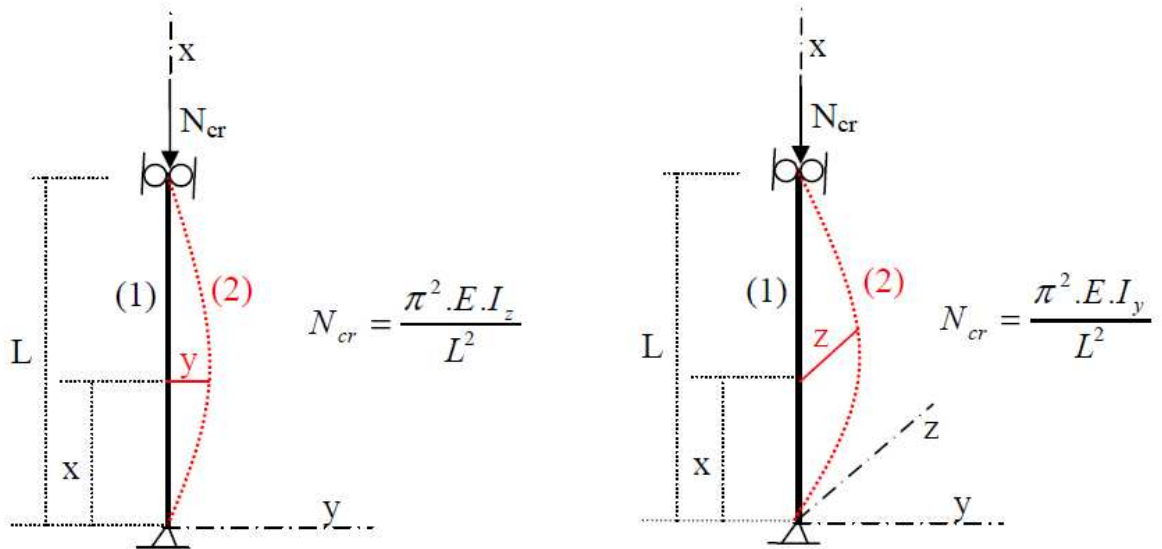


Fuente: <http://es.scribd.com/doc/2561065/Tema10Pandeo>

Si el pequeño desplazamiento que se da a la columna para llevarla a la posición 2 se hiciera en el plano  $x - z$ , como se muestra en la figura, la expresión de la carga crítica es:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_Y}{L^2}$$

Figura 3.7. Carga crítica de Euler en el plano X – Z



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/2561065/Tema10Pandeo>

Por tanto, el esfuerzo crítico es:

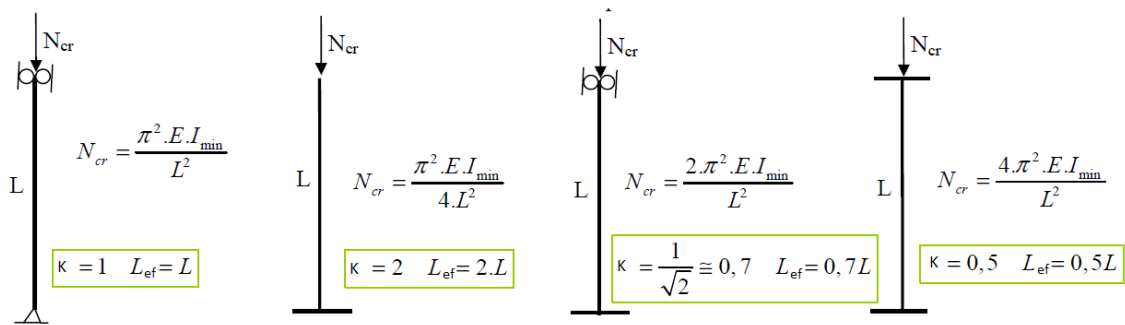
$$\sigma_{Cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} \quad (3.9)$$

Donde:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad r = \text{Esbeltez.}$$

Con otro tipo de apoyo y siguiendo un proceso similar al anterior se obtienen los valores de longitud efectiva  $L_{ef}$ , cuyos resultados se visualizan en la figura 3.8.

Figura 3.8. Condiciones de apoyo



Fuente. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/10737/Capitulo4.pdf>

Generalizando la fórmula de Euler para los distintos casos, se obtiene:

$$N_{Cr} = \frac{\pi^2 E I_y}{KL^2} \quad (3.10)$$

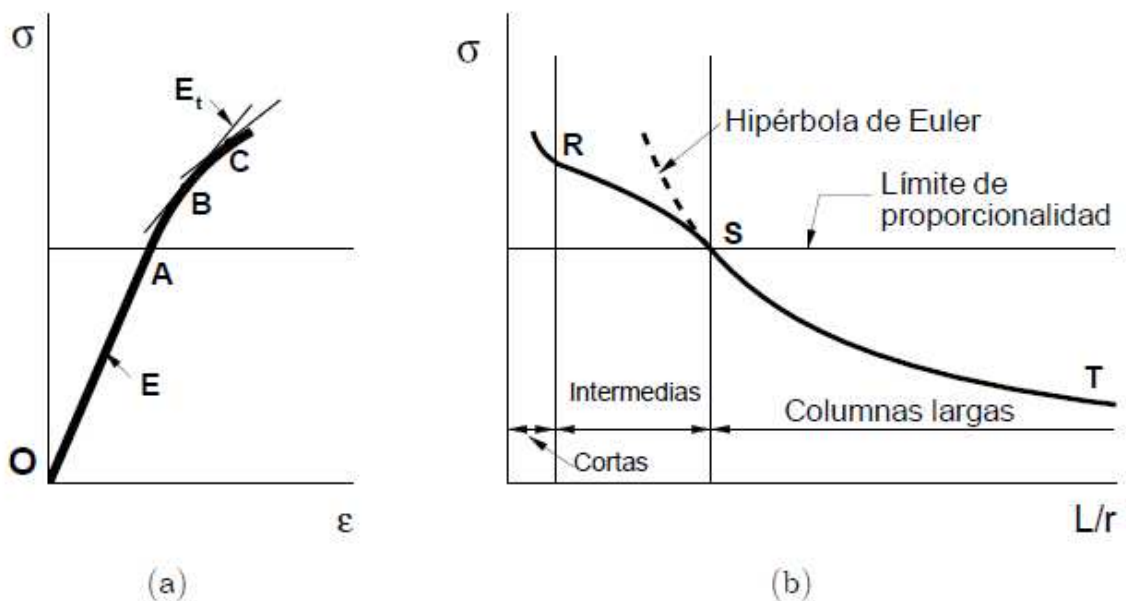
Un diagrama tensión-deformación a compresión para una probeta en la que se impide el pandeo se puede representar como en la Figura 3.9.a. En el intervalo de tensiones desde O hasta A el material se comporta elásticamente. Si la tensión en una columna en pandeo no excede de este intervalo la columna pandeará elásticamente. La hipérbola correspondiente a la ecuación:

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

Es aplicable en este caso. Esta porción de la curva se indica como ST en la Figura 3.9.b. Es importante reconocer que esta curva no representa el comportamiento de una columna sino más bien el de un número infinito de columnas ideales de diferente longitud. La hipérbola que corresponde a la región situada más allá del intervalo útil se indica en la figura por medio de una línea punteada. Una columna con una relación  $L/r$  correspondiente al punto S de la Figura 3.9.b será la columna de más corta longitud hecha de material y tamaño dados, que se pandeará elásticamente. Una columna más corta, con una relación  $L/r$  aún menor, no se pandeará en el límite de proporcionalidad del material. En el diagrama

tensión-deformación, Figura 3.9.a, esto significa que el nivel de tensiones en la columna ha pasado del punto A y alcanzado quizá un cierto punto B. A este nivel de tensiones más alto se puede decir, en efecto, se ha creado una columna de material diferente puesto que la rigidez del mismo ya no está representada por el módulo de elasticidad. En este punto, la rigidez del material está dada por la tangente a la gráfica tensión-deformación, es decir, por el módulo elástico tangente (o instantáneo),  $E_t$ . La columna permanecerá estable si su nueva rigidez a la flexión  $E_t l$  en B es suficientemente grande y podrá soportar una carga mayor. A medida que la carga aumenta, el nivel de tensiones se eleva también, en tanto que el módulo referido a la tangente disminuye. Una columna de "material aún menos rígido" actúa bajo una carga creciente.

Figura 3.9 (a) Diagrama esfuerzo-deformación  
(b) Diagrama esfuerzo- relación de esbeltez



Fuente. <http://es.scribd.com/doc/47428471/Columnas>

La sustitución del módulo elástico tangente,  $E_t$ , en vez del módulo elástico inicial,  $E$ , es entonces la única modificación necesaria para obtener las fórmulas de pandeo elástico aplicables en el intervalo inelástico. En consecuencia, la fórmula

generalizada de Euler, o bien la fórmula del módulo referido a la tangente. La fórmula con el módulo tangente da la capacidad de carga de una columna definida en el instante en que esta tiende a pandearse. Si la columna se deforma aún más, a las fibras del lado cóncavo (las más comprimidas) les corresponde el módulo tangente. Sin embargo las fibras del lado convexo disminuyen su deformación y se recuperan elásticamente según el módulo elástico inicial. Esto conduce a la teoría del doble módulo para la capacidad de carga de las columnas. Los resultados finales que se obtienen por esta teoría no difieren mucho de los obtenidos usando el módulo tangente. Por lo tanto la fórmula será:

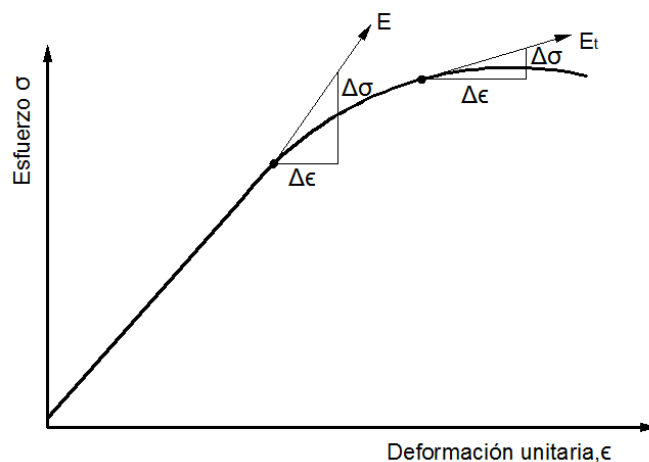
$$\sigma_{Cr} = \frac{\pi^2 E_t}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} \quad (3.11)$$

Donde:

$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3.12)$$

El módulo de elasticidad tangencial se determina en la curva esfuerzo - deformación como se muestra en la figura 3.10.

Figura 3.10. Módulo de elasticidad tangencial



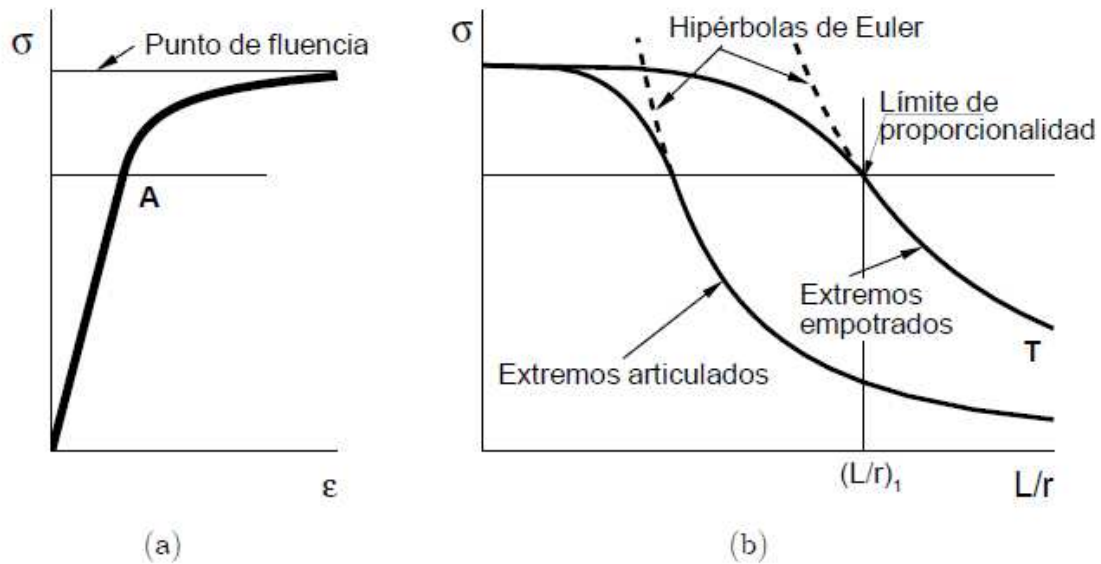
Fuente. <http://es.scribd.com/doc/47428471/Columnas>

Como los esfuerzos correspondientes a los módulos referidos a la tangente se pueden obtener a partir del diagrama tensión-deformación a la compresión, la relación  $L/r$  a la cual se pandeará una columna con estos valores se puede obtener de la ecuación (3.11). Una gráfica que represente este comportamiento para valores intermedios y bajos de  $L/r$  está dada en la Figura 3.9.b por la curva desde S hasta R. Los ensayos en columnas individuales verifican esta gráfica con notable exactitud. Las columnas que se pandean elásticamente se denominan a veces columnas largas. Las columnas con bajas relaciones  $L/r$  no presentan esencialmente fenómenos de pandeo y reciben el nombre de columnas cortas. Con bajos valores de  $L/r$ , los materiales dúctiles “se aplastan” y pueden soportar cargas muy grandes.

Si la longitud  $L$  de la ecuación (3.11) se considera como la longitud efectiva de una columna, se pueden analizar diferentes condiciones de extremo. De acuerdo con este procedimiento en la Figura 11, se grafica para fines de comparación, la tensión crítica en función de la relación de esbeltez para columnas de extremos empotrados y articulados. Es importante notar que la capacidad de carga en los dos casos está en la relación 4 a 1 sólo para columnas que tengan la relación de esbeltez  $(L/r)_1$  o mayor. Para valores de  $L/r$  menores se obtienen progresivamente menos ventajas por la restricción al giro en los extremos. Con bajas relaciones  $L/r$ , las gráficas se confunden. Hay poca diferencia si un “bloque corte” está articulado o empotrado en sus extremos, ya que entonces la resistencia determina su comportamiento y no el pandeo.



Figura 3.11. Comparación del comportamiento de columnas con diferentes condiciones de extremo



Fuente. <http://es.scribd.com/doc/47428471/Columnas>

### 3.4.1 PANDEO ELÁSTICO E INELÁSTICO

$$\frac{P_{Cr}}{A} = \sigma_{Cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL)^2 \left(\frac{A}{I}\right)} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} = \sigma_{Adm.} \quad (3.13)$$

Para el pandeo elástico se cumple:

$$\sigma_s \leq \frac{F_y}{2} \rightarrow \frac{2\pi^2 E}{\lambda^2} \leq F_y \rightarrow \lambda \geq \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \rightarrow \lambda_{lim} = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$$

Para el pandeo inelástico se cumple:

$$\sigma_s > \frac{F_y}{2} \rightarrow E \text{ variable} \rightarrow \sigma_{Cr} = \frac{\pi^2 E_t}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \rightarrow E_t = E \left(1 - \frac{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}{2\lambda_{lim}^2}\right)$$

Donde:

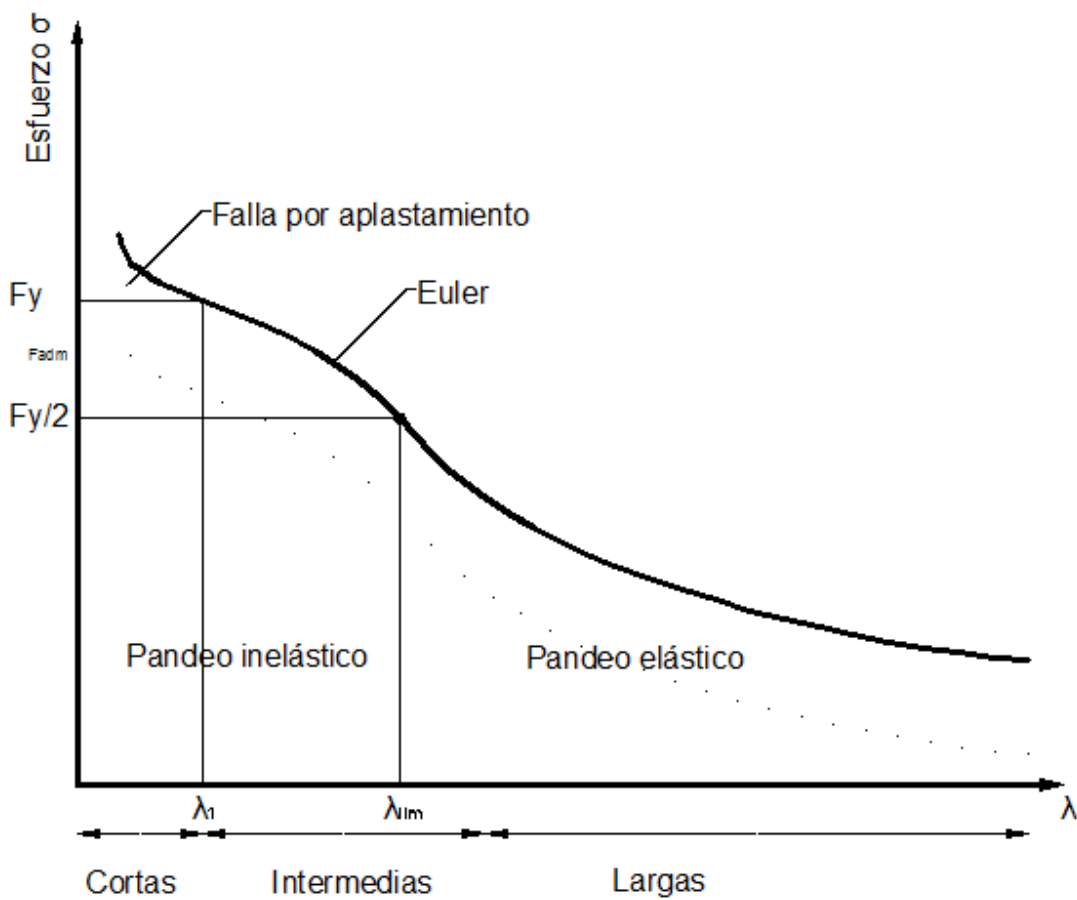
$F_y = \text{Esfuerzo crítico}$

$\sigma_{Adm} = \text{Esfuerzo admisible}$

$$\sigma_s = \frac{\text{Esfuerzo crítico}}{\text{Factor de seguridad}}$$

En la figura 3.12 se puede distinguir claramente el pandeo elástico y el pandeo inelástico.

Figura 3.12. Curva de Euler



Fuente. <http://es.scribd.com/doc/47428471/Columnas>

El valor de  $\lambda_{lim}$ , define el límite entre una columna larga y una columna intermedia, ya que se ha observado que las columnas no siguen muy bien la ecuación del pandeo de Euler a partir de cierto valor de  $\lambda$ , por lo cual se realiza una aproximación.

Cuando  $\lambda < \lambda_1$ , se considera el elemento como un elemento corto a compresión pura y fallará por aplastamiento del material.

De la figura 3.12, tenemos que el valor de  $\lambda_1$  es el valor cuando  $\sigma = F_y/2$ , entonces:

$$\frac{F_y}{2} = \frac{\pi^2 E}{(\lambda_1)^2} \rightarrow \lambda_1 = \sqrt{\frac{2 \pi^2 E}{F_y}}$$

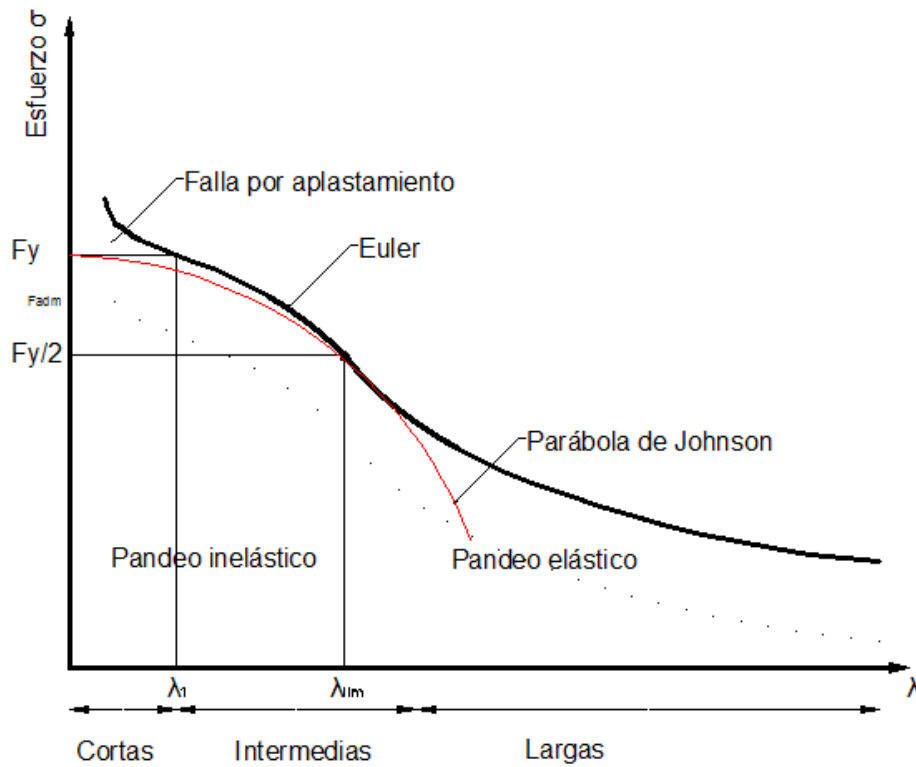
De la figura 3.12, tenemos que el valor de  $\lambda_{lim}$  es el valor cuando  $\sigma = F_y/2$ , entonces:

$$F_y = \frac{\pi^2 E}{(\lambda_{lim})^2} \rightarrow \lambda_{lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{F_y}}$$

### 3.4.2 COLUMNAS INTERMEDIAS

La forma más aceptada para hallar una ecuación para el pandeo de columnas intermedias es por medio de una parábola que une los puntos  $(0, F_y)$  y  $(\lambda_{lim}, F_y/2)$  de la figura 3.12, es por medio de la parábola de Johnson que cumple tales requisitos, como se indica en la figura 3.13.

Figura 3.13. Parábola de Johnson



Fuente. <http://es.scribd.com/doc/47428471/Columnas>

La forma de la parábola de Johnson es:

$$\sigma = a (\lambda)^2 + b \quad (3.14)$$

En el punto  $(0, F_y) \rightarrow F_y = b$

En el punto  $(\lambda_{lim}, F_y/2) \rightarrow$

$$\frac{F_y}{2} = a \left( \frac{2 \pi^2 E}{F_y} \right) + F_y \rightarrow a = -\frac{F_y^2}{4 \pi^2 E}$$

Donde la ecuación de Johnson es:

$$\sigma = -\frac{F_y^2}{4 \pi^2 E} (\lambda)^2 + F_y$$

Reemplazando:

$$P = F_y A \left(1 - \frac{F_y}{4 \pi^2 E} \lambda^2\right) \mathbf{(3.15)}$$

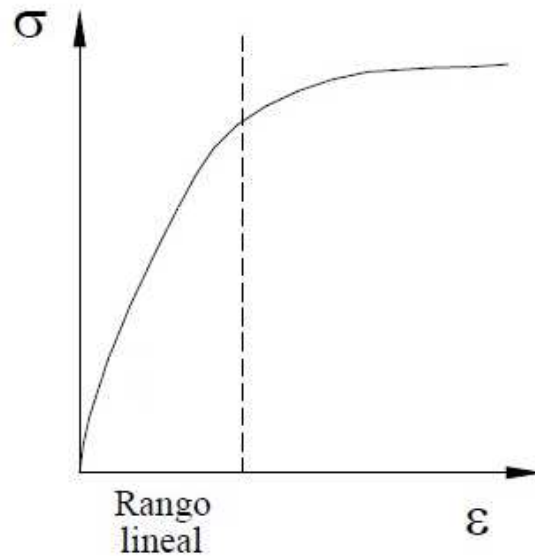
Timoshenko S. y Young D. (1979). Resistencia de materiales. España. Montaner y Simón S.A.

### **3.5 TENACIDAD**

La tenacidad cuantifica la cantidad de energía almacenada por el material antes de romperse.

La tenacidad corresponde al área bajo la curva de un ensayo de compresión entre la deformación nula y la deformación correspondiente al límite de rotura, resistencia última a la compresión. La resiliencia es la capacidad de almacenar energía en el período elástico, y corresponde al área bajo la curva del ensayo de compresión entre la deformación nula y el límite de fluencia. En la figura 3.14 se presenta una curva esfuerzo - deformación, donde el área bajo esta curva representa la tenacidad.

Figura 3.14. Tenacidad es el área bajo la curva



Fuente. <http://es.scribd.com/doc/47428471/Columnas>

Para una probeta de material elástico lineal sometida a compresión axial uniforme, se cumple:

$$U_r = \frac{\sigma \varepsilon}{2} \mathbf{(3.16)}$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo de compresión en el límite elástico

$\varepsilon$  = Módulo de elasticidad del material

### **3.6ESBELTEZ**

La relación de la longitud efectiva de la columna para la dimensión de la sección transversal considerada se denomina esbeltez. Se lo denomina con la letra  $r$  minúscula y es igual a la raíz cuadrada longitud del elemento sobre el radio de giro, como se puede apreciar en la siguiente ecuación.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3.17)$$

En el caso de secciones cuadradas  $I_x = I_y$ , por lo tanto,  $r_x = r_y$ , sin embargo, en el caso de secciones rectangulares,  $I_x > I_y$ , por lo tanto,  $r_x > r_y$ .

### **3.7 LONGITUD EFECTIVA**

La longitud efectiva es la longitud teórica de una columna equivalente con articulaciones en sus extremos. La longitud efectiva se obtiene multiplicando la longitud no arriostrada  $L$ , por un factor de longitud efectiva  $k$ , que considera las restricciones o grado de empotramiento que sus apoyos extremos le proporcionan.

El Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino recomienda que en ningún caso se tome una longitud efectiva menor que la longitud real no arriostrada, o sea por más de que el factor  $k$  sea menor que 1 de acuerdo con las condiciones extremas, se recomienda tomar mínimo  $k = 1$ , debido al grado de incertidumbre de restricción al giro que las uniones puedan proporcionar.

### **3.8 CLASIFICACIÓN DE LAS COLUMNAS**

Existen diversas clasificaciones de las columnas de madera de acuerdo a códigos de diversas regiones, a continuación se revisará los capítulos relacionados con compresión axial del manual de diseño para maderas del Grupo Andino.

#### **3.8.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL MANUAL DE DISEÑO PARA MADERAS DEL GRUPO ANDINO**

Antes de revisar la clasificación de las columnas, se revisará aspectos importantes que plantea este manual de diseño, en la clasificación de maderas, esfuerzos, módulo de elasticidad, entre otros.

### 3.8.1.1 Clasificación de la madera según su densidad básica

Según su densidad la madera se clasifica en madera dura, semidura y blanda, como lo indica la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Clasificación de la madera

<b><u>MADERA DE CONSTRUCCIÓN NO ESTRUCTURAL</u></b>		
<b>MADERA</b>	<b>DENSIDAD(gr./cm<sup>3</sup>)</b>	<b>HUMEDAD (%)</b>
Dura	$0.80 < \delta_B < 1.12$	15
Semi - dura	$0.72 < \delta_B < 0.88$	15
Blanda	$0.40 < \delta_B < 0.72$	15
<b><u>MADERA DE CONSTRUCCIÓN ESTRUCTURAL</u></b>		
<b>GRUPO</b>	<b>DENSIDAD(gr./cm<sup>3</sup>)</b>	<b>RESISTENCIA</b>
A	$0.71 < \delta_B < 0.90$	Mayor
B	$0.56 < \delta_B < 0.70$	Intermedio
C	$0.40 < \delta_B < 0.55$	Menor

Fuente: *Manual Para Diseño De Maderas Del Grupo Andino*

### 3.8.1.2 Esfuerzos máximos admisibles y módulo de elasticidad

Los esfuerzos máximos admisibles que deben utilizarse para el diseño de elementos sometidos a compresión o flexo-compresión, según el grupo estructural al que pertenece la madera, como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Esfuerzos admisibles.

<b><u>ESFUERZOS ADMISIBLES (Kg/cm<sup>2</sup>)</u></b>			
<b>GRUPO</b>	<b>Compresión paralela (f<sub>c</sub>)</b>	<b>Tracción paralela (f<sub>t</sub>)</b>	<b>Flexión (f<sub>m</sub>)</b>
A	145	145	210
B	110	105	150
C	80	75	100
Factor de seguridad	4	4	3.2

Fuente: *Manual Para Diseño De Maderas Del Grupo Andino*



Para el diseño de columnas se debe usar los valores de módulo de elasticidad  $E_{0.05}$  que es el módulo mínimo, y corresponde a una probabilidad de hasta 5% que el módulo de elasticidad este por debajo del valor considerado; esto para el grupo estructural de madera elegido para conformar el elemento.

Para el diseño de pie-derechos para entramados, se debe usar el valor de  $E_{promedio}$ , el cual es mayor que  $E_{0.05}$ , debido a que en un entramado los elementos actúan de una manera más solidaria, garantizando así la seguridad.

A continuación se muestran los valores de módulo de elasticidad según su grupo estructural, como muestra la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Módulo de elasticidad.

<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>		
<b>GRUPO</b>	<b><math>E_{0.05}</math></b>	<b><math>E_{Promedio.}</math></b>
A	95000	130000
B	75000	100000
C	55000	90000

Fuente: *Manual Para Diseño De Maderas Del Grupo Andino*

### 3.8.1.3 Esbeltez

En estructuras de madera la esbeltez de una columna maciza simple aislada es la relación entre la longitud efectiva y la dimensión del lado menor de su sección transversal, expresada en ecuación sería:

$$\lambda = \frac{L_{ef}}{d}$$

Donde:

$L_{ef}$  = longitud efectiva de la columna

$d$  = Lado menor de la columna

Cuando se tenga una columna rectangular donde la longitud efectiva varíe en sus dos direcciones (de su sección transversal), se debe calcular la esbeltez para ambas direcciones, y se debe usar para el diseño la esbeltez que sea mayor. La esbeltez para columnas macizas simples está limitada a  $\lambda = 50$ ; para columnas formadas por varios miembros la esbeltez está limitada a  $\lambda = 80$ .

#### **3.8.1.4 Clasificación de columnas**

Las columnas de acuerdo a su esbeltez se clasifican en columnas cortas, intermedias y largas.

#### **3.8.1.5 Columnas cortas**

Las columnas cortas ( $\lambda < 10$ ) fallan por compresión pura o aplastamiento. Por lo cual el esfuerzo es igual a carga sobre área.

$$N_{Adm.} = F_y A \quad (3.18)$$

En donde:

A = área de la sección transversal

$F_y$  = esfuerzo máximo admisible de compresión paralela a las fibras

$N_{Adm}$  = carga axial máxima admisible

#### **3.8.1.6 Columnas Intermedias**

Las columnas intermedias ( $10 < \lambda < C_k$ ) fallan por una combinación de aplastamiento e inestabilidad lateral (pandeo inelástico). Como se analizó en la sección 3.4.2, a partir de cierto valor de  $\lambda$ , las columnas no siguen adecuadamente la curva de Euler, por ello se realizan aproximaciones polinómicas para corregir esta falla. Para demostrar la siguiente fórmula se realiza una aproximación de cuarto orden.

$$\sigma = a (\lambda)^4 + b$$

En el punto (0 , Fy) → Fy = b

En el punto ( $\lambda_{lim}$  , Fy/2) →

$$\frac{F_y}{2} = a \left( \frac{2 \pi^2 E}{F_y} \right)^2 + F_y \rightarrow a = -\frac{F_y^3}{8 \pi^4 E^2}$$

Reemplazando:

$$\sigma = -\frac{F_y^3}{8 \pi^4 E^2} (\lambda)^4 + F_y$$

Despejando:

$$\sigma = F_y \left( 1 - \frac{F_y^3}{8 \pi^4 E^2} (\lambda)^4 \right)$$

$$\text{Si } C_k = 0.7025 \sqrt{\frac{E}{f_c}}$$

$$N_{Adm.} = F_y A \left( 1 - \frac{1}{F_s} \left( \frac{\lambda}{C_k} \right)^4 \right)$$

$$N_{Adm.} = F_y A \left( 1 - \frac{1}{3} \left( \frac{\lambda}{C_k} \right)^4 \right) \mathbf{(3.19)}$$

En donde:

$\lambda$  = relación de esbeltez (considerar solo la mayor)

$C_k = 0.7025 \sqrt{\frac{E}{f_c}}$  (para secciones rectangulares)

E = módulo de elasticidad

### 3.8.1.7 Columnas Largas

La carga admisible de columnas largas ( $C_k \lambda < 50$ ) se determina por consideraciones de estabilidad.

Considerando una adecuada seguridad al pandeo en el rango elástico, la carga crítica  $N_{cr}$  según la teoría de Euler se reduce a la expresión:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{ef}^2}; \text{ Demostración en el Capítulo 3.}$$

Conociendo:

$$\lambda = \frac{L}{h} \text{ y para una sección rectangular } I = \frac{bh^3}{12}$$

Entonces:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{ef}^2} = \frac{\pi^2 E b h^3}{12 L_{ef}^2} = \frac{\pi^2 E \square}{12 \lambda^2}$$

$$N_{Adm} = \frac{N_{cr}}{F_S} = \frac{\pi^2 E A}{12 \lambda^2}$$

$$N_{Adm} = 0.329 \frac{E \cdot A}{\lambda^2} \text{ (3.20)}$$

### 3.9 ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXO- COMPRESIÓN

Estos elementos deben diseñarse para satisfacer la siguiente expresión:

$$\frac{N}{N_{Adm}} + \frac{K_m / M /}{Z f_m} < 1$$

Donde:

$f_m$  = Esfuerzo admisible en flexión

$K_m$  = Factor de magnificación de momentos debido a la presencia de la carga axial

$M$  = Momento flector máximo en el elemento

$N_{Adm.}$  = Carga axial admisible

$Z$  = Módulo de la sección transversal con respecto al eje alrededor del cual se produce la flexión

Cuando existe flexión y compresión combinadas, los flectores se amplifican por acción de las cargas axiales. Se multiplicará el momento flector máximo por:

$$K_m = \frac{1}{1 - 1.5 \frac{N}{N_{cr}}}$$

Donde:

$N$  = Carga axial aplicada

$N_{cr}$  = Carga crítica de Euler para pandeo en la dirección en que se aplican los momentos de flexión

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{ef}^2}$$

Bravo H. (2010) Proyecto de la norma ecuatoriana de construcción sección maderas. Quito.

### **3.10 MADERA LAMINADA**

Madera laminada es la unión de láminas de madera con espesores comprendidos entre 19 y 50 milímetros, a través de sus cantos, caras y extremos mediante adhesivos, clavos, pernos y correas metálicas, adhesivos y pegas, conformando una sola unidad estructural.

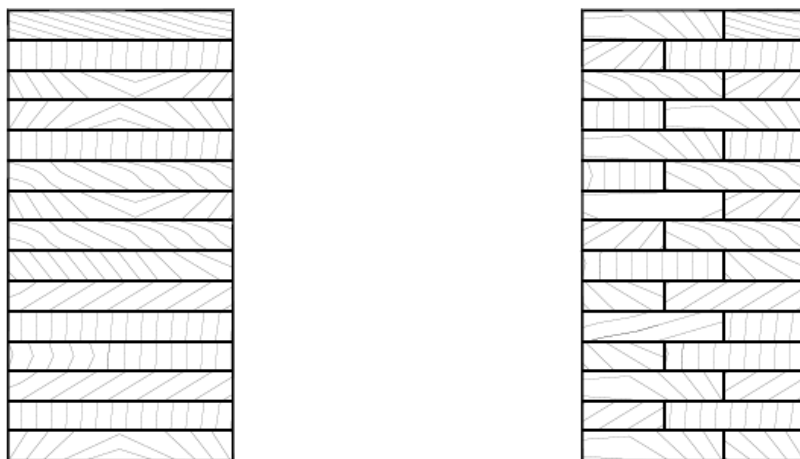
Figura 3.15. Madera laminada



Fuente: [http://numaco.blogspot.com/2008/04/paralam-lvl.html/madea la.htm](http://numaco.blogspot.com/2008/04/paralam-lvl.html/madea%20la.htm)

Los elementos de madera laminada están conformados por un determinado número de láminas, ubicadas paralelamente al eje del elemento. Así mismo, las láminas están compuestas por una o más láminas de madera unida por su canto, cuya fibra es paralela al largo de la pieza, como se indica en la figura 3.4.

Figura 3.16. a) Encolado de una tabla. b) Encolado de dos tablas.



Fuente: Norma chilena de la construcción

La técnica del laminado ha sido utilizada durante muchos años en la fabricación de muebles, artículos deportivos y otros productos. La aplicación de esta técnica

en estructuras data de 1909, año en que fue construida la primera estructura por el señor Hetzer en Suiza. La historia de la madera está íntimamente ligada con el avance de la ciencia en cuanto a adhesivos se refiere.

Una de las principales ventajas de la madera laminada, respecto a la maciza, es que se pueden obtener piezas de grandes longitudes. Además por tratarse de un material homogéneo sus características mecánicas están mejor definidas y acotadas. Para obtener tales características, la madera constituyente debe estar seca, cepillada, saneada y libre de defectos estructurales tales como nudos y grietas.

Para lograr los largos y anchos requeridos, la madera saneada se reconstituye con uniones longitudinales y de canto, formando láminas de madera. Las uniones longitudinales pueden ser de tope, biseladas o empalmes dentados tipo finger - joint; prefiriéndose estas últimas debido a la gran calidad de unión obtenida. Las uniones de canto pueden ser de tope o con algún tipo de machihembrado. Posteriormente, estas láminas se pegan entre sí para lograr una escuadría determinada y formar con ello un elemento que pueda adoptar varias formas, ya sean rectas o curvas. Dependiendo de la orientación de las láminas al plano neutro de flexión, las estructuras se pueden clasificar como de laminado horizontal o laminado vertical.

Frente a productos sustituidos en la construcción como estructuras de acero y hormigón, la madera laminada encolada presenta ciertas ventajas.

### *3.10.1 VENTAJAS DE LA MADERA LAMINADA*

- Optimización del material: El adhesivo permite el uso de tablas cortas y angostas que unidas eficientemente se puede conformar piezas estructurales de cualquier espesor, largo, ancho y forma. Además permite la combinación de diferentes especies de madera, consiguiendo economía y la utilización de madera de calidad en lugares donde sea adecuado.

- Estructuras más ligeras y resistentes: El peso específico de la madera (500 – 600 kg/ m<sup>3</sup>) es comparativamente inferior al del acero y del hormigón. Lo que permite reducir el costo de materiales y mano de obra.
- No sufre alteraciones ante la presencia de agentes químicos:La madera es por naturaleza un material prácticamente inalterado a agentes químicos y temperatura extremas. Para lograr una protección más completa, una vez que finaliza el proceso de fabricación se puede aplicar un protector de poro abierto con propiedades insecticidas, fungicidas e hidrófugas como prevención, frente a todo tipo de agresiones externos.
- Excepcional resistencia al fuego:Si bien la madera laminada es combustible, bajo la acción del fuego se produce una carbonización en su superficie que actúa como aislante, impidiendo la propagación de la llama hacia su inferior y resistiendo la penetración del calor. Así, las propiedades mecánicas del núcleo de la pieza permanecen intactas, garantizando la estabilidad de la estructura durante más tiempo que el que ofrece otros materiales como el acero.
- Belleza en todas formas:La madera laminada ofrece una versatilidad sin límites para la creación arquitectónica, siendo especialmente adecuada para grandes luces. La flexibilidad en la elección de las formas permiten alcanzar unas cotas estéticas únicas, tanto a nivel interior como exterior; esto se incrementa por la belleza natural de la madera.
- Propiedades aislantes:La madera actúa como aislante a todos los niveles: acústico, térmico, eléctrico y magnético, logrando espacios confortables y seguros.
- Facilidad de montaje:Las vigas llegan a obra totalmente terminadas, con lo que se simplifica considerablemente el proceso de montaje y se consiguen plazos de entrega reducidos.



- **Mantenimiento y duración:**La madera laminada se mantiene inalterable a lo largo del tiempo, sin perder ninguna de sus propiedades y sin experimentar dilataciones. Estos factores favorecen que las estructuras requieran sólo un mantenimiento mínimo y que duren prácticamente toda la vida.
- **Ahorro en el consumo de energía:**Para convenir la madera desde su estado de materia prima a un producto listo para el consumo industrial se necesita menos combustibles que para cualquier otro material comparable en la industria de la construcción. De esta manera, producir una tonelada de madera requiere de aproximadamente 430 kilovatios por hora (kw/h) de electricidad o su equivalente, mientras que en la producción de una tonelada de acero y de aluminio se necesitan 2.700 kw/h y 17.000 kw/h de electricidad respectivamente.

### *3.10.2 DESVENTAJAS DE LA MADERA LAMINADA*

- **Higroscopicidad de la madera:**Una inadecuada fabricación, diseño constructivo y mal mantenimiento podría generar ciertas desventajas en la madera laminada. Estas se relacionan principalmente con la higroscopicidad de la madera, la cual facilita la emigración del agua desde los extremos de las vigas. Hecho que favorece las manchas y el ataque de hongos.
- **Costos de fabricación:**Si se compara con la madera sin laminar, la laminada es más costosa, ya que durante su fabricación podría generarse una pérdida de madera de entre 30 a 50 %. También deben considerarse los costos involucrados en el uso de adhesivo y la mano de obra adicional. Además aquellos elementos de gran longitud y curvatura son difíciles de manipular, embarcar y transportar, lo que también incide en el costo final.

### **3.10.3 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA LAMINADA**

En teoría las estructuras pueden ser de cualquier espesor, largo y ancho, sin restricciones en las formas, sin embargo, en su diseño se debe considerar la factibilidad técnica de fabricación y sus implicaciones en la elaboración, transporte y manipulación. Las principales aplicaciones de la madera laminada como elementos estructurales corresponden a vigas, columnas, arcos y marcos. De acuerdo con normas Astm se debe cumplir con varios parámetros para la elaboración de secciones de madera laminada, por lo cual es necesario estudiarlas para una posterior implementación de las mismas.

#### **3.10.4 ELABORACIÓN DE LÁMINAS**

En la fabricación de madera laminada se considera los mismos principios aplicados en la fabricación de tableros de listones de madera. Es decir, se debe emplear madera seca, cepillada, libre de defectos, uniones con aplicaciones de adhesivos y presiones, entre otros. El espesor de las láminas debe ser constante entre 19 y 50 milímetros, ya que un espesor mayor dificulta el secado de las láminas y por ende obtener un contenido de humedad adecuado para el encolado de las mismas. Las superficies de las láminas deben estar cepilladas.

Para los elementos curvos es necesario utilizar láminas de menores espesores que logren el radio de curvatura deseado. En general para madera de coníferas el radio de curvatura no debe ser inferior a 150 veces su espesor, de lo contrario existirá una pérdida apreciable de su resistencia. Para elementos curvos muy pronunciados se utilizan láminas de diferentes espesores, siendo estos menores en el interior de la curva.

La homogeneidad de la madera es muy importante para disminuir los esfuerzos internos, especialmente cuando el elemento laminado queda expuesto a los cambios de humedad del medio ambiente. Por lo tanto, la pieza se debe fabricar con madera de la misma especie o de especies de similares características de contracción. Además, las tablas deberán tener el mismo rango de contenido de

humedad y, en lo posible, el mismo patrón de aserrado para evitar esfuerzos internos que generan cambios de forma o agrietamientos.

Una vez seca, cada tabla se somete a una clasificación estructural por medios mecánicos o por apreciación visual. Es probable que en la misma tabla existan porciones de diferente calidad de resistencia, en cuyo caso, se seccionan y agrupan según su capacidad estructural. Aquellas tablas o secciones de tablas de un mismo grado estructural se ensamblan en tiras largas, de tal forma que cada una de estas tiras tenga similares características de resistencia.

La madera aserrada tiene que estar de acuerdo a especificaciones establecidas, se deben considerar los defectos propios de la madera que afectan su resistencia mecánica, como son nudos, grietas bolsillos de resina, rajaduras, etc. También los defectos relacionados con el aspecto visual de la madera como son manchas, pecas, u otros.

El valor de la madera representa el principal costo en la fabricación de los elementos laminados (alrededor del 50% del precio base puesto en fábrica). Se debe considerar que dependiendo de la calidad de esta, la pérdida por concepto de elaboración fluctúa entre un 30 y 50%.

El costo del adhesivo respecto al precio base del elemento laminado fluctúa entre un 2 y un 4% si se emplea urea-formaldehído y entre 12 a 15% si se usa resorcinol-fenol-formaldehído. Esto variará de acuerdo el espesor de las láminas, ya que en aquellas que son más delgadas se realizará un mayor número de planos de encolado para una misma sección.

Cuando el ancho de las láminas sea menor al ancho de la estructura requerida, se realizan uniones de canto, ya sea de tope o con algún tipo de machihembrado. En el caso de uniones de tope se considera los mismos principios aplicados en la fabricación de tableros de listones de madera, es decir, piezas de madera o bandas escuadradas, con una adecuada línea de cola y aplicación de presiones con un correcto fraguado del adhesivo.

### **3.10.5 ADHESIVOS**

Los adhesivos para madera se pueden clasificar de diferentes maneras, ya sea atendiendo a sus características o a la naturaleza de su componente principal. En cuanto al primer aspecto, se debe indicar que en las normas norteamericanas ASTM aparece una clasificación importante basada en la temperatura de fraguado. Por su parte, las normas británicas BS dan una clasificación basada en la durabilidad del adhesivo medida según métodos de ensayo normalizados.

#### **3.10.5.1 Clasificación basada en la temperatura de fraguado (ASTM)**

Según esta clasificación los adhesivos se dividen en:

- Adhesivos de fraguado en frío (temperatura de fraguado inferior a 20°)
- Adhesivos de fraguado a temperatura ambiente (20° C a 30° C).
- Adhesivos de fraguado a temperatura intermedia (31° C a 99° C).
- Adhesivos de fraguado en caliente (mayor de 100° C).

#### **3.10.5.2 Clasificación basada en la durabilidad (BS)**

Según esta clasificación se establecen los siguientes tipos de adhesivos:

##### ***3.10.5.2.1 Clase WBP: A prueba de intemperie y agua hirviendo***

A esta clase pertenecen aquellos adhesivos que, a través de ensayos sistemáticos, han demostrado ser altamente resistentes a la intemperie, micro - organismos, agua fría e hirviendo, vapor y calor seco. Tales adhesivos son más durables que la madera misma. Por ejemplo, adhesivos a base de fenol - formaldehído y resorcinol - formaldehído.

#### ***3.10.5.2.2 Clase BP: Resistentes al agua hirviendo***

Los adhesivos de esta clase tienen buena resistencia a la intemperie y al agua hirviendo pero fallan bajo prolongadas condiciones de completa exposición a la intemperie, para las cuales los adhesivos WBP son satisfactorios. Soportan el agua fría durante mucho tiempo y son altamente resistentes al ataque de microorganismos. Por ejemplo, adhesivos a base de melanina - formaldehído y algunas variedades de adhesivos a base de urea - formaldehído.

#### ***3.10.5.2.3 Clase MR: Resistentes a la humedad (agua) y moderadamente resistentes a la intemperie***

A este grupo pertenecen aquellos adhesivos que soportan la exposición completa a la intemperie durante unos pocos años, el agua fría durante un largo período y el agua caliente durante un tiempo limitado, pero fallan al ser sometidos a la acción del agua hirviendo. Los adhesivos MR son altamente resistentes al ataque de microorganismos. Por ejemplo, las variedades corrientes de adhesivos a base de urea - formaldehído.

#### ***3.10.5.2.4 Clase INT: interior***

Los adhesivos que pertenecen a esta clase son aquellos que soportan la acción del agua fría durante un período limitado de tiempo y no son siempre resistentes al ataque de microorganismos. Por ejemplo, cola animal, cola caseínica, adhesivo a base de acetato de polivinilo, etc.

### **3.10.5.3 Clasificación basada en la naturaleza del componente principal**

La clasificación que parece ser la más adecuada es aquella que se atiende a la naturaleza del componente principal del adhesivo. Esta clasificación, que ha sido adoptada universalmente, es la siguiente:

### ***3.10.5.3.1 A base albuminosa***

Existen varios tipos de este tipo de adhesivos, entre los principales se encuentran los siguientes tipos:

#### ***3.10.5.3.1.1 Colas de glutinas***

Fabricadas a base de productos de animales que tienen la glutina como componente principal. Por ejemplo, cola de piel extraída de cueros sin curtir, tendones, etc. Cola de cuero extraída de cueros curtidos, cola de huesos previamente desgrasados, etc.

- Cola de albúmina de sangre: Fabricada a base de la albúmina contenida en la sangre usándose para esto, preferentemente, sangre de vacuno y equino.
- Cola de caseína: Fabricada con caseína disuelta en un medio alcalino (lechada de cal).
- Cola de soya: Extraída del poroto de soya y basada en la albúmina vegetal de este producto.
- Cola de gluten: Extraída de la albúmina del trigo y conocida también por el nombre de cola de Viena.

### ***3.10.5.3.2 A base de hidratos de carbono***

- Engrudos: Fabricados de almidón o de productos de imbibición o hinchamiento del almidón.
- Dextrinas : Fabricada de subproductos de la fermentación del almidón

### **3.10.5.3.3 Adhesivos a base de resinas sintéticas**

- A base de resina sintéticas termo - fraguables

Urea formaldehído, fenol -formaldehído, resorcinol -formaldehído, melanina-formaldehído.

- A base de resinas sintéticas termoplásticas

Actualmente la única cola de este tipo es aquella a base de emulsiones de acetato de polivinilo (PVA).

### **3.10.6 COMBINACIONES DE ADHESIVOS, EXTENSORES Y AGREGADOS**

En la actualidad, una tendencia que se ha advertido notoriamente en el perfeccionamiento de los adhesivos, es la de utilizar combinaciones de ellos con el fin de aprovechar las mejores propiedades de cada uno de los componentes. Las primeras aplicaciones de estas combinaciones fueron las colas de urea - melanina formaldehído y fenol - resorcinol - formaldehído, hoy ampliamente usadas en países de gran desarrollo forestal, tales como

Estados Unidos e Inglaterra, actualmente ya se cuenta con combinaciones de adhesivos naturales con adhesivos a base de resina sintética, y adhesivos a base de resinas termoplásticas con adhesivos a base de resinas termo - fraguables. Los adhesivos combinados no tienen necesariamente las mismas propiedades que sus diversos constituyentes.

Otra práctica corriente es la de “extender” los tipos de adhesivos particulares con un material más barato. Las resinas de urea, por ejemplo, son frecuentemente extendidas con harina de cereales. Es necesario dejar constancia de la diferencia existente entre los “fillers”, material fabricado especialmente por el fabricante del adhesivo para ser agregados sea durante el proceso de elaboración o en el momento de la preparación para uso, y los extensores que los agrega el

consumidor. La ventaja de los extensores es simplemente el abaratamiento del producto, a cambio de un retardo en el fraguado de la cola y una reducción de la resistencia a la intemperie del adhesivo. Un exceso en la cantidad de extensor (sobre 25% en peso de la cantidad de adhesivo) hace propensa una línea de encolado al ataque de micro -organismos.

Como medio de proteger las colas del ataque de micro - organismos, se agregan a la mezcla materias tóxicas, lográndose con esto, resultados parcialmente buenos. Los consumidores de adhesivos deberán juzgar las limitaciones de lo que puede hacerse en este sentido. De acuerdo con la experiencia actual, el agregar sustancias tóxicas a las colas de caseína, animal y de albúmina de sangre, no las hace tan inmune como son los adhesivos a base de resinas sintéticas y si el ataque es severo, los adhesivos fallarán. En la práctica, cuando el ataque de micro - organismos es moderado o de corta duración, los tóxicos proporcionan una protección realvaliosa. Otras sustancias que se agregan a los adhesivos son pigmentos colorantes o tiza, con el fin de dejar una coloración adecuada a la línea de encolado.

### **3.10.7 LOS ADHESIVOS Y LA RESPONSABILIDAD DE LOS CONSUMIDORES**

Aunque la reputación general de las colas, como un agente de unión en la madera, es extremadamente satisfactoria, se han registrado diversos casos de fallas. Una parte de estos se pueden atribuir, sin duda alguna, a colas defectuosas, vale decir, a la baja calidad y a la dosificación incorrecta de las materias primas componentes, pero la mayor parte de ellos se deben indudablemente al uso de tipos inadecuados de adhesivos. Como un ejemplo obvio, se puede decir que el encolado de terciados para uso exterior con cola animal, sólo puede llevar a un desastre. Sin embargo, la falta no radica en la cola misma sino en aquellos responsables de su elección para ese objetivo.

Una razón menos obvia de fallas de cola, y que es a menudo difícil de ubicar, es la administración incorrecta del adhesivo por parte del consumidor. La elección de la palabra “consumidor” es internacional, por cuanto las dificultades no sólo se



presentan en las operaciones de mezclado, aplicado y prensado. La confección de una unión satisfactoria incluye factores tales como: La selección de un adhesivo adecuado al tipo de madera a unir, la elaboración de la madera y control de su contenido de humedad, la adquisición del equipo apropiado y el acondicionamiento de las uniones después del encolado. Un buen encolado depende, tanto del adhesivo como de la técnica, consumidor y fabricante deben colaborar a fin de obtener los mejores resultados.

### **3.10.8 ADHESIVOS USADOS EN MADERA LAMINADA**

Los adhesivos usados en madera laminada son: El resorcinol - formaldehído, fenol -formaldehído, melanina - formaldehído, urea -formaldehído y caseína.

Los adhesivos de resorcinol y de fenol -formaldehído son los más durables e indestructibles. Se recomiendan para estructuras que estarán al exterior o en ambientes de condiciones severas. Por lo general son de color oscuro.

Los adhesivos de melanina y urea son de menor duración, siendo ésta un poco más alta en los de melanina.

Ambos se aplican adecuadamente para servicios de interior, en donde no están sometidos a exposiciones prolongadas de intemperie ni a condiciones de humedad. Se les conoce como del tipo de termo - fraguables, a pesar de que fraguan a la temperatura de ambiente, debido a que no se pueden “refundir” o ablandar con el calor, una vez curados. Recientes investigaciones han revelado que es posible usar adhesivos a base de caucho natural o sintético en madera laminada encolada, sin embargo, se deberá esperar hasta que se tengan resultados concretos de su efectividad.

### **3.10.9 ESPARCIDO DEL ADHESIVO**

Se entiende por esparcido a la cantidad de adhesivo colocado por unidad de superficie, para ello existen varios métodos para esparcir el adhesivo, ya sea con

brocha, rodillos manuales, pistola o esparcidores mecánicos, dependiendo del tipo de pegamento varia de 250 a 450 gramos por metro cuadrado. Para cada tipo de adhesivo, existe un esparcido óptimo con el cual se obtiene el mayor rendimiento y resistencia. Existen dos tipos de esparcido: simple y doble. En el esparcido simple, se encola una cara de la unión. En el esparcido doble, se encolan ambas caras. Para determinar la cantidad de adhesivo que aplica un esparcidor mecánico, se debe usar una tabla de espesor igual de las láminas a encolar. Se mide su área y se pesa antes de encolar. Después de aplicar el adhesivo en ambas caras, se vuelve a pesar, deduciendo de ambas pesadas la cantidad de adhesivo aplicado. Dividiendo este valor por el área se tendrá el esparcido doble.

### **3.10.10 PRENSADO**

El tipo de molde y prensa debe ser el adecuado a la forma de la sección. La forma y método de prensado depende del tipo de producción, el espacio disponible y del rendimiento de la fábrica. El sistema de molde y prensas está constituido en su forma más simple por el número de escuadras que también se usa como prensas y están unidas fijamente al piso dando forma al elemento prensado. Es común utilizar prensas de madera o de acero para la elaboración de moldes y prensas, ambos materiales resultan muy eficientes, pero la durabilidad y mantenimiento de cada uno de ellos es distinto. Una vez que se haya colocado el adhesivo en la última lamina, el sistema de prensado debe ser tan eficiente que el tiempo en prensar las láminas sea el mínimo posible.

Una vez encoladas, las láminas deben ser colocadas en las prensas. Al aplicar la presión, con pernos y tuercas, un operador debe fijar la tuerca móvil, con una llave de torque u otro elemento adecuado. Cuando la presión es aplicada con métodos neumáticos, sólo bastará fijar la presión en un manómetro que esté en buenas condiciones.

La presión recomendable debe ser tal que provoque un escurrimiento parejo del adhesivo, a lo largo de toda la línea de encolado. Es recomendable, para las

coníferas, una presión comprendida entre 5 y 7 kg/cm<sup>2</sup> y para las latifoliadas entre 7 y 15 kg/cm<sup>2</sup>.

Después de 10 a 15 minutos de haber aplicado la presión, es necesario comprobar que no ha existido una pérdida de la presión aplicada, la cual puede ser causada, entre otras razones, por el escurrimiento del adhesivo, debido a la presión aplicada. Si esto ha sucedido, se deberá proceder a un reapriete. Los tiempos entre reaprietes serán cada vez mayores y dependen de la calidad de los materiales que componen el elemento.

Es esencial que el elemento laminado ensamblado permanezca en los moldes, sometido a presión, bajo la temperatura ambiental y humedad relativa requerida, por un período de tiempo tal, que asegure una resistencia suficiente de la línea de encolado. Sólo una vez que exista la certeza de que esto haya ocurrido, se procederá desmoldar la pieza. El tiempo prensado dependerá de la temperatura de fraguado de las líneas de encolado, del tipo de adhesivo usado y del catalizador. Los tiempos de prensado para los diferentes adhesivos son recomendados por los fabricantes. Aún cuando muchos adhesivos producen excelentes líneas de encolado cuando fraguan a temperaturas ambientales, el período de prensado puede ser ampliamente reducido si se aplica calor a las diferentes líneas de encolado.

Una vez que el elemento se ha removido de la prensa, debe quedar inmóvil por un período determinado, antes que se proceda a su procesamiento final. Este período se denomina tiempo de maduración. La resistencia total no se logra durante el período de prensado. Se necesita un período de tiempo para desarrollar totalmente la resistencia de la unión, por lo cual es conveniente dejarlo un tiempo en reposo, a una temperatura adecuada. El tiempo de maduración dependerá del tipo de adhesivo, de la temperatura ambiental donde se ha almacenado el elemento y puede tener una duración comprendida entre una a dos semanas.

### **3.10.10.1 Alternativas de prensado**

Si el material es compactado con presiones moderadas (2 a 50 kgf/cm<sup>2</sup>), el espacio entre las partículas se reduce. Al aumentar la presión, hasta cierto rango particular de cada material, colapsan las paredes celulares, acercándose así a la densidad física o masa seca del material. Las presiones requeridas para alcanzar dichas densidades deben ser superiores a 1000 kgf/cm<sup>2</sup>.

El proceso de compactación está estrechamente relacionado con las presiones ejercidas, la temperatura y las características del material como contenido de humedad y granulometría. La reducción del volumen, dependiente del material, puede llegar hasta 15 veces.

#### **3.10.10.1.1 Sistema de prensado con pistón**

El prensado con pistón es un sistema en el cual un cilindro o pistón se desplaza alternativamente dentro de una matriz o cono, ligeramente ahusado, en el cual cae aserrín dosificado. La acción del pistón produce una compactación del aserrín que es empujado a través de la matriz, así como un calentamiento por fricción del material leñoso. Este calentamiento de la matriz, que puede alcanzar temperaturas superiores a los 100 °C produce un ablandamiento de la lignina, que actúa como ligante natural del material comprimido. La briqueta ya formada sale caliente de la matriz, por lo que se necesita de una sección de enfriamiento no inferior a 15 metros, en la que se solidifica la lignina bajo presión manteniendo unidas las partículas. Con este enfriamiento también se evitan agrietamientos en la briqueta por efecto de las tensiones de vapor liberadas al momento de retirarla del molde. Cuando se han enfriado, las briquetas pueden cortarse fácilmente en trozos de 10 – 30 cm de largo. Estas prensas funcionan generalmente con un motor eléctrico, aunque también pueden ser utilizadas con motores de combustión interna o a vapor. El pistón de prensado puede ser accionado mediante un sistema mecánico, con un volante vía cigüeñal o bien con un sistema hidráulico. Las máquinas de accionamiento mecánico son generalmente de gran tamaño, con presiones en la zona de compresión de 1000 a 1400 kgf/cm<sup>2</sup> y

rangos de producción de 0,45 a 1.3 toneladas/hora. Por su parte las máquinas hidráulicas poseen rangos hasta 0.25 toneladas/ hora, aunque en algunos modelos pueden ser superiores.

En las prensas de pistón hidráulico el principio de operación es el mismo que el de pistón mecánico. La diferencia es que la energía del pistón es generada por un motor eléctrico, mediante un sistema hidráulico de alta presión. De esta forma, las máquinas pueden ser livianas, compactas y de fácil transporte, aunque su mantenimiento en zonas rurales o apartadas puede dificultarse. Las briquetas producidas con este sistema de prensado son de densidad menor a las generadas con prensas mecánicas, debido a las limitaciones de presión en el sistema hidráulico que puede llegar solo a 300 kgf/cm<sup>2</sup>. La densidad que se obtiene menor a los 1000 kgf/cm<sup>3</sup>, traduciéndose en una menor durabilidad de la combustión y una menor resistencia a los golpes, siendo esto último de gran importancia en la manipulación y transporte. Debido a lo anterior, es que este tipo de máquinas se recomienda para la compactación de materia prima como paja, abono, papel, cartulina u otros, no siendo recomendable su empleo para los desechos de madera.

Los parámetros de diseño de las presas de pistón, tales como el tamaño del volante y su velocidad, tamaño del cigüeñal y distancias de golpe del pistón influirán considerablemente en la producción de la máquina. En la práctica, la producción, se puede relacionar directamente con el diámetro de la matriz; en el caso de briquetas de madera elaborada con prensas de pistón mecánico, su valor es de aproximadamente 18.5 kg/hora por cm<sup>2</sup> de sección de la matriz (FAO 1990).

La sección de la matriz definirá el diámetro de la briqueta así como la producción, lo que debe considerarse al momento de decidir a qué mercado se dirigirá el producto, ya que para pequeñas estufas caseras se requieran briquetas de menor tamaño para que los hornos industriales. Algunos modelos de máquinas generan briquetas de mayores secciones pero con largos menores (7 a 10 cm) mejorando así su producción, aunque requieren de mayores potencias de trabajo.

Para una producción continua resulta de vital importancia un adecuado sistema de alimentación, con el fin de evitar problemas serios en la operación de la máquina. Aunque el aserrín posee ventajas para dosificar (densidad, granulometría) respecto a otras materias primas de biomasa, su dosificación debe ser regulada adecuadamente, ya que los vacíos o excesos delante del pistón pueden causar daño al mecanismo. Se debe emplear mecanismos de alimentación de experiencia comprobada en el tipo de materia prima a compactar, puesto que la producción continua de briquetas no es del todo fácil.

#### **3.10.10.1.2 Sistema de prensado por tornillo sin fin**

Hay tres tipos de prensas de tornillo: prensas de tornillo cónico, prensas de tornillo cilíndrico y prensas de tornillo cilíndrico con calentamiento externo del dado o matriz, siendo esta última la más comercializada.

El modelo de tornillo cónico tiene una capacidad de producción de 600 a 1000 kg/hora y ejerce presiones de compactación de 600 a 1000 kgf/m<sup>2</sup>. En la matriz puede ir un dado de 98 mm o varios de 28 mm obteniendo briquetas con densidades entre 1200 – 1400 kg/m<sup>3</sup>. Si bien la calidad de la briqueta es excelente, los costos de mantención y operación involucrados son superiores a los de las prensas de pistón.

Prensas de tornillo cilíndrico, consiste en unos tornillos cilíndricos que presionan el material dentro de una matriz, en la cual se eleva la temperatura con lo que se genera un ablandamiento de la lignina que actúa como aglutinante de las partículas. La alimentación es continua y la presión se ejerce gradualmente a diferencia de los impactos discontinuos generados en las prensas de pistón. Una característica de las briquetas producidas con este sistema es que posee un agujero en el centro debido a al eje del tornillo sin fin. Este agujero actúa como chimenea evacuando el vapor que se genera con altas temperaturas del proceso.

El dado se calienta generalmente con un sistema eléctrico elevando su temperatura entre 250 - 300 °C, la que puede ser regulada de acuerdo a las

características de la materia prima. Generalmente se monta una chimenea para extraer el vapor a la salida de la briqueta. La forma de las briquetas puede ser cuadrada, hexagonal u octagonal y pueden cortarse en diferentes largos. Diámetro externo varía entre 40 y 75 mm y el del agujero central entre 15 a 25mm. La presión de trabajo de estas máquinas es relativamente alta, lo cual combinado con las altas temperaturas limita el contenido de humedad de la materia prima que, dependiendo del tipo, debe estar entre un 15 a 20 %. En el caso de briquetas de aserrín, el sistema incluye previamente un secador de partículas el cual baja la humedad a un 10%, resultando un producto terminado con un contenido de humedad de un 7% aproximadamente.

No se aprecian grandes diferencias en el consumo de energía entre las prensas de tornillo y las prensas de pistón. En máquinas que elaboran briquetas de madera de 55 mm de diámetro con una cantidad de producción de 180 kg/hora. Las briquetas generadas con este tipo de prensas son generalmente de mejor calidad que las producidas con prensas de pistón, siendo más resistentes y con menos grietas.

### **3.10.11 TERMINACIONES**

El acabado de la columna consiste en un pulido de su superficie para retirar los residuos de la cola y darle uniformidad. En muchos casos se aplica inmunizantes, generalmente de tipo oleo solubles, los que tienen además un efecto de impermeabilización. Finalmente se aplica productos de acabado como barnices y lacas.

## **3.11 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.11.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS**

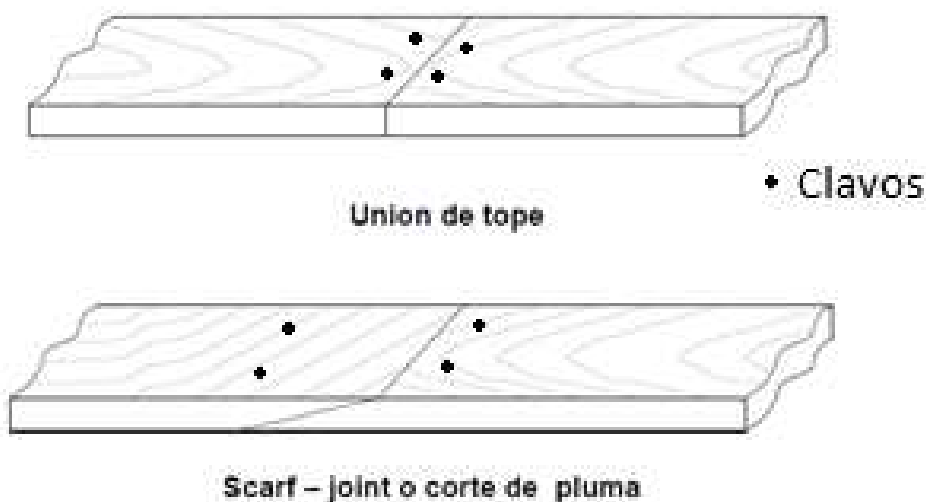
Se construirá las muestras que se describen en la tabla 3.4., las mismas que tendrán diferente tipo de unión, ya sea a tope o con bisel, y unidas mediante adhesivo que se compone de la mezcla 1000 gramos de blancola y 200 gramos

de cementos, estos son los resultados obtenidos de la tesis de grado de la Escuela Politécnica Nacional “Estudio experimental de conexiones de madera estructural sujeta a carga axial. Obando L., Tinoco L. Quito. 1993. Página 83.”, con la cantidad de adhesivo, presión, tiempo de fraguado de acuerdo al Manual de Diseño del Grupo Andino.

Para la elaboración de las muestras se dividirá en cuatro etapas las mismas que dependen de la longitud de las muestras, por lo cual se cortará y se prensará todas las muestras que tengan la longitud en común, es decir, doce muestras por etapa, se utilizará una sierra circular para los cortes de las láminas, ya sea a tope o bisel.

Para el esparcido de la mezcla de adhesivo se utilizará una espátula asegurándose que la cantidad de adhesivo sea la adecuada. En el caso de secciones clavadas se utilizará clavos de una y media pulgada, en una distribución de cuatro clavos por unión, como se especifica en la figura 3.17. Para el prensado se utilizará gatos mecánicos tipo tijera, más prensas de un metro y medio de longitud, que sumadas a los gatos mecánicos se dará la presión requerida según el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino.

Figura 3.17. Adhesivo más clavos



Fuente: Norma chilena de la construcción



**TABLA 3.4. Características de las muestras**

<b>Probeta</b>	<b>Especie</b>	<b>Longitud (cm.)</b>	<b>Base (cm.)</b>	<b>Ancho (cm.)</b>	<b>Peso (Gr.)</b>	<b>Unión</b>	<b>Adhesivo</b>	<b>Prensado (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Fraguado (Horas)</b>
1	Eucalipto	49.6	11.7	11.9	4728.2	Tope	Blancola + cemento	6.9	36
2	Colorado	49.8	12	12	5015	Tope	Blancola + cemento	6.7	36
3	Pino	50	12	12	3582.1	Tope	Blancola + cemento	6.7	36
4	Eucalipto	49.8	12	12	4875.4	Bisel	Blancola + cemento	6.7	36
5	Colorado	49.9	11.8	11.8	5190.2	Bisel	Blancola + cemento	6.8	36
6	Pino	50	12	12	4306.5	Bisel	Blancola + cemento	6.7	36
7	Eucalipto	49.4	11.8	12	5059.1	Tope	Blancola + cemento + clavos	6.9	36
8	Colorado	49.7	12	12	5190.8	Tope	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
9	Pino	50	12	12	3461	Tope	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
10	Eucalipto	50	12	11.8	5031.4	Bisel	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
11	Colorado	50	12	12	5133.6	Bisel	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
12	Pino	49.7	12	12	3311.6	Bisel	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
13	Eucalipto	50	12	12	6694	Maciza	Maciza		
14	Eucalipto	75	11.7	12	9438.5	Tope	Blancola + cemento	6.8	36
15	Colorado	74.9	11.8	11.7	7084.1	Tope	Blancola + cemento	6.8	36
16	Pino	74.6	12	11.8	5999.9	Tope	Blancola + cemento	6.7	36
17	Eucalipto	74.8	11.8	11.9	9019.7	Bisel	Blancola + cemento	6.8	36
18	Colorado	74.8	11.7	11.7	7748.7	Bisel	Blancola + cemento	6.9	36
19	Pino	74.8	12	12	7037.7	Bisel	Blancola + cemento	6.7	36
20	Eucalipto	74.7	11.7	11.9	8617.1	Tope	Blancola + cemento + clavos	6.9	36

**TABLA 3.4. CONTINUACIÓN.** Características de las muestras

Probeta	Especie	Longitud (cm.)	Base (cm.)	Ancho (cm.)	Peso (Gr.)	Unión	Adhesivo	Prensado (Kg/cm <sup>2</sup> )	Fraguado (Horas)
21	Colorado	74.7	12	11.7	5931.4	Tope	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
22	Pino	74.9	12	11.5	7900	Tope	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
23	Eucalipto	74.3	12	11.7	8117.5	Bisel	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
24	Colorado	74.5	11.7	11.8	8103.4	Bisel	Blancola + cemento + clavos	6.9	36
25	Pino	74.2	12	12	6862.7	Bisel	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
26	Eucalipto	74.9	12	12	10266.5	Maciza	Maciza		
27	Eucalipto	99.8	11.6	11.8	11415.4	Tope	Blancola + cemento	6.9	36
28	Colorado	99.5	11.6	11.7	10378.2	Tope	Blancola + cemento	6.9	36
29	Pino	99.7	11.5	11.8	7457.1	Tope	Blancola + cemento	7.0	36
30	Eucalipto	98.8	11.6	11.8	12085.4	Bisel	Blancola + cemento	7.0	36
31	Colorado	99.3	11.5	11.9	10179.7	Bisel	Blancola + cemento	7.0	36
32	Pino	99.5	11.8	12	8079.9	Bisel	Blancola + cemento	6.8	36
33	Eucalipto	100	11.6	12	11504.3	Tope	Blancola + cemento + clavos	6.9	36
34	Colorado	99.5	11.5	12	10615.5	Tope	Blancola + cemento + clavos	7.0	36
35	Pino	99.6	11.8	12	8763.3	Tope	Blancola + cemento + clavos	6.8	36
36	Eucalipto	99.8	11.6	11.9	10373.4	Bisel	Blancola + cemento + clavos	6.9	36
37	Colorado	99	11.5	11.9	10358.2	Bisel	Blancola + cemento + clavos	7.0	36
38	Pino	99.4	12	12	7938.4	Bisel	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
39	Eucalipto	100	12	12	13943.8	Maciza	Maciza		
40	Eucalipto	124.5	11.6	12	12103.8	Tope	Blancola + cemento	6.9	36

**TABLA 3.4. CONTINUACIÓN.** Características de las muestras

Probeta	Especie	Longitud (cm.)	Base (cm.)	Ancho (cm.)	Peso (Gr.)	Unión	Adhesivo	Prensado (Kg/cm <sup>2</sup> )	Fraguado (Horas)
41	Colorado	125	11.3	11.8	12656	Tope	Blancola + cemento	7.1	36
42	Pino	124.5	11.9	11.9	10060.1	Tope	Blancola + cemento	6.7	36
43	Eucalipto	124.1	11.7	12	14352.7	Bisel	Blancola + cemento	6.9	36
44	Colorado	124.7	11.6	12	12699.1	Bisel	Blancola + cemento	6.9	36
45	Pino	124.2	11.7	12	9890.8	Bisel	Blancola + cemento	6.9	36
46	Eucalipto	124.6	11.5	12	14448.8	Tope	Blancola + cemento + clavos	7.0	36
47	Colorado	124.5	11.5	11.8	12022.4	Tope	Blancola + cemento + clavos	7.0	36
48	Pino	124.5	11.3	12	11029.7	Tope	Blancola + cemento + clavos	7.1	36
49	Eucalipto	124.2	12	12	13594.3	Bisel	Blancola + cemento + clavos	6.7	36
50	Colorado	124	11.3	11.8	11790.2	Bisel	Blancola + cemento + clavos	7.1	36
51	Pino	124	11.6	12	9878.3	Bisel	Blancola + cemento + clavos	7.0	36
52	Eucalipto	125	12	12	17458	Maciza	Maciza		
53	Eucalipto	15	5	5	310.8	Maciza	Maciza	<b>Ensayo perpendicular a la fibra</b>	
54	Colorado	15	5	5	362.1	Maciza	Maciza		
55	Pino	15	5	5	186.1	Maciza	Maciza		
56	Eucalipto	20	5	5	427.7	Maciza	Maciza	<b>Ensayo paralelo a la fibra</b>	
57	Colorado	20	5	5	499.1	Maciza	Maciza		
58	Pino	20	5	5	258.3	Maciza	Maciza		
59	Eucalipto	5.8	5.88	6.15	174.07	Maciza	Maciza	<b>Contenido de humedad</b>	
60	Colorado	5.95	6	6	210.38	Maciza	Maciza		
61	Pino	6.15	6.16	6.5	107.03	Maciza	Maciza		

Realizado por: Emilio Dávalos

### 3.11.2 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

Una vez realizadas las probetas de acuerdo a las especificaciones del capítulo IV, se miden y pesan las muestras con una precisión de  $\pm 0.3\%$ . Para ensayar las muestras en la máquina universal, se aplica una carga continua en sentido paralelo a las fibras de la madera, en este caso, a las láminas de madera, midiendo las deformaciones por la aplicación de la carga hasta llegar al punto de falla de la probeta.

Se debe tomar las lecturas de las deformaciones de la probeta cada cierto rango de carga, es aconsejable para este caso cada tonelada de peso. Se registra la carga máxima y el modo de falla.

### 3.11.3 ANÁLISIS DE DATOS

Los datos carga - deformación consignados en laboratorio, se trasladan a un programa de cálculo, por ejemplo, Microsoft Excel, para realizar los cálculos esfuerzo - deformación unitaria convencional.

Se debe ser cuidadoso con el tratamiento de unidades, y de acuerdo a la ley de Hooke:

$$\delta = \frac{PL}{EA}$$

Donde:

$\delta$  = Deformación de la probeta

E = Módulo de elasticidad

A = Área de la sección

L = Longitud de la probeta

Se calcula el módulo de elasticidad de las diferentes especies de madera, con una probeta de 20 x 5 x 5 centímetros, tomando lecturas de carga deformación, y luego se aplica la ley de Hooke en el rango elástico.

Posteriormente, se construye las gráficas Fuerza - Deformación ( $F - \delta$ ) y Deformación unitaria - Esfuerzo ( $\epsilon - \sigma$ ), donde se puede observar el rango elástico e inelástico de las probetas de madera laminada.

De acuerdo al Manual de Diseño para maderas del Grupo Andino se clasifica las probetas como columnas cortas, intermedias o largas de acuerdo a la esbeltez de las mismas. Según el tipo de columnas en capítulos anteriores se analizó y estableció fórmulas para el cálculo del esfuerzo admisible, las mismas se aplicarán y se determinará el esfuerzo admisible teórico. Una vez que se determine el esfuerzo admisible teórico se comparará con los esfuerzos admisibles prácticos y se establecerá un factor  $\gamma$ , el cual, en una sección sólida o maciza  $\gamma = 1$ , sin embargo, en caso contrario, si las partes la sección no están unidas por ningún ligante  $\gamma = 0$ , por lo tanto, dependiendo de la calidad del ligante el valor de  $\gamma$  variará entre  $0 < \gamma < 1$ .

Se realiza un análisis del tipo de falla de la sección para comprobar resultados.

Se realiza los cálculos y operaciones para obtener los valores teóricos como se describe en párrafos anteriores, y posteriormente, se realiza una curva Carga - Longitud con valores teóricos y experimentales, que servirá para comparar la eficiencia del sistema dependiendo del tipo de madera, y unión entre las mismas.

## CAPÍTULO 4

### 4.1 ANÁLISIS DE COSTOS

TABLA 4.1. Comparación de costos según el tipo de unión y adhesivo

Tipo de terminación	Tipo de unión	Costo por metro lineal de madera (Usd. /m.)		
		<u>Colorado</u>	<u>Eucalipto</u>	<u>Pino</u>
Tope	Adhesivo	8.95	7.40	7.70
Tope	Adhesivo + clavos	9.00	7.45	7.75
Bisel	Adhesivo	9.05	7.50	7.80
Bisel	Adhesivo + clavos	9.10	7.55	7.85
Maciza		7.95	6.57	6.84

Elaborado por: Emilio Dávalos

El realizar los cortes del bisel a cuarenta y cinco grados incrementa el costo en la mano de obra, por lo cual el incremento resulta aproximadamente en dos por ciento del costo total de pieza por metro lineal. Además el incorporar clavos incrementa aproximadamente en uno por ciento del costo total de la pieza por metro línea. Entre el costo de una pieza maciza y una pieza de madera laminada existe una diferencia aproximada del doce por ciento, lo que no marca una diferencia marcada de precios, considerando ventajas y desventajas de los dos tipos de secciones y por ello la madera laminada puede ser considerada una alternativa al momento de escoger un sistema constructivo.

En el mercado Ecuatoriano las dimensiones de las piezas están impuestas por los comerciantes de madera, razón por la cual el momento de mandar a fabricar una pieza con dimensiones específicas resulta muy costoso, además cuanto más

grandes son las dimensiones de las piezas de madera maciza, más costoso resulta el comprar la misma, debido a una escasez de árboles maduros y a la dificultad de movilización y ventas. Por todo lo mencionado anteriormente el realizar piezas de madera laminada resulta más económico cuanto más grande sea la sección, y realizando una comparación entre las ventajas y desventajas de la madera laminada que mencionamos en el capítulo cuatro, no cabe duda, que la madera laminada es una alternativa e incluso menos costosa dependiendo de las características de la sección y de la estructura donde serán utilizadas.

## 4.2 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

**TABLA 4.2.** Comparación de capacidad de carga teórica y práctica, según especie, longitud y tipo de unión

Tipo de terminación	Tipo de unión	Especie de madera	Longitud (cm.)							
			50		75		100		125	
			Carga Crítica (Kg.)		Carga Crítica (Kg.)		Carga Crítica (Kg.)		Carga Crítica (Kg.)	
			Teórica	Práctica	Teórica	Práctica	Teórica	Práctica	Teórica	Práctica
Tope	Adhesivo	Colorado	59947	47000	59947	46000	59947	45000	39089	38000
		Eucalipto	55924	46000	55924	42000	55924	42000	35893	28000
		Pino	37871	37000	37871	37000	37871	36000	27794	27000
Tope	Adhesivo y clavos	Colorado	59947	51000	59947	51000	59947	49000	39089	38000
		Eucalipto	55924	47000	55924	46000	55924	46000	35893	35000
		Pino	37871	34000	37871	34000	37871	34000	27794	27000
Bisel	Adhesivo	Colorado	59947	22000	59947	22000	59947	22000	39089	22000
		Eucalipto	55924	23000	55924	23000	55924	23000	35893	23000
		Pino	37871	26000	37871	26000	37871	26000	27794	26000
Bisel	Adhesivo y clavos	Colorado	59947	19000	59947	19000	59947	19000	39089	19000
		Eucalipto	55924	21000	55924	21000	55924	21000	35893	21000
		Pino	37871	23000	37871	23000	37871	23000	27794	23000
Maciza		Eucalipto	55924	62000	55924	58000	55924	58000	35893	35500

Elaborado por: Emilio Dávalos



**TABLA 4.3.** Variación del coeficiente  $\gamma$ , eficiencia del adhesivo

Tipo de terminación	Tipo de unión	Especie de madera	Longitud (cm.)			
			<u>50</u>	<u>75</u>	<u>100</u>	<u>125</u>
			$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$
Tope	Adhesivo	Colorado	0.78	0.77	0.75	0.97
		Eucalipto	0.77	0.75	0.75	0.78
		Pino	0.98	0.98	0.95	0.97
Tope	Adhesivo y clavos	Colorado	0.85	0.85	0.82	0.97
		Eucalipto	0.79	0.82	0.82	0.98
		Pino	0.90	0.38	0.90	0.97
Bisel	Adhesivo	Colorado	0.37	0.37	0.37	0.56
		Eucalipto	0.39	0.41	0.41	0.64
		Pino	0.69	0.69	0.69	0.94
Bisel	Adhesivo y clavos	Colorado	0.32	0.32	0.32	0.49
		Eucalipto	0.35	0.38	0.38	0.59
		Pino	0.61	0.61	0.61	0.83

Elaborado por: Emilio Dávalos

**TABLA 4.4.** Comparación carga máxima según el Manual de Maderas del Grupo Andino y carga práctica

Madera	$\bar{\delta}_B$ (gr./cm <sup>3</sup> )	Grupo	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	F <sub>s</sub>	L (cm.)	b (cm.)	h (cm.)	$\lambda = L/h$	C <sub>k</sub>	Columna	P <sub>máx. Grupo A.</sub> (Kg.)	P <sub>máx. Práctico</sub> (Kg.)	%
Colorado	0.71	B	100000	110	4	50	12	12	4.17	10.6	Corta ( $\lambda < C_k$ )	60343	59947	99
						75			6.25		Corta ( $\lambda < C_k$ )	60343	59947	99
						100			8.33		Corta ( $\lambda < C_k$ )	60343	59947	99
						125			10.42		Intermedia ( $10 < \lambda < C_k$ )	41518	39089	94
Eucalipto	0.67	B	100000	110	4	50	12	12	4.17	10.6	Corta ( $\lambda < C_k$ )	60343	55924	93
						75			6.25		Corta ( $\lambda < C_k$ )	60343	55924	93
						100			8.33		Corta ( $\lambda < C_k$ )	60343	55924	93
						125			10.42		Intermedia ( $10 < \lambda < C_k$ )	41518	35893	86
Pino	0.41	C	90000	80	4	50	12	12	4.17	11.8	Corta ( $\lambda < C_k$ )	38400	37871	99
						75			6.25		Corta ( $\lambda < C_k$ )	38400	37871	99
						100			8.33		Corta ( $\lambda < C_k$ )	38400	37871	99
						125			10.42		Intermedia ( $10 < \lambda < C_k$ )	30577	27794	91

Elaborado por: Emilio Dávalos

**TABLA 4.5.Tenacidad**

Tipo de terminación	Tipo de unión	Especie de madera	Longitud (cm.)			
			<u>50</u>	<u>75</u>	<u>100</u>	<u>125</u>
			Tenacidad (J)	Tenacidad (J)	Tenacidad (J)	Tenacidad (J)
Tope	Adhesivo	Colorado	1082.41	1399.44	511.56	1337.70
		Eucalipto	1239.70	940.80	1008.42	535.08
		Pino	873.18	824.67	635.04	529.69
Tope	Adhesivo y clavos	Colorado	676.20	1058.40	1510.18	1299.48
		Eucalipto	1566.04	1125.04	1566.04	931.00
		Pino	753.13	919.24	1532.72	941.78
Pino	Adhesivo	Colorado	127.40	294.00	229.32	441.98
		Eucalipto	279.30	192.08	301.84	462.07
		Pino	560.56	360.64	623.28	519.40
Pino	Adhesivo y clavos	Colorado	183.75	135.24	57.33	428.26
		Eucalipto	318.99	172.48	216.58	317.52
		Pino	442.47	428.26	363.09	721.28
Maciza		Eucalipto	1234.80	1234.80	800.66	716.38

Elaborado por: Emilio Dávalos

Al comparar la capacidad de carga entre la madera de eucalipto y la madera de colorado son muy similares, sin embargo, la madera de pino posee una capacidad de carga aproximadamente del 60 por ciento de las maderas antes mencionadas. Una ventaja de la madera de pino es poseer menor densidad y mayor porosidad lo que permite una mejor penetración del adhesivo y por ende mayor resistencia de la sección, por ello, la falla en las probetas de pino fueron a causa de la madera y no del adhesivo en su mayoría.

Si comparamos la madera con terminación a tope unida por adhesivo con la madera con terminación a tope unida por adhesivo más clavos, observamos que no existe una diferencia notoria, teniendo en cuenta que dicha diferencia puede ser causada por defectos de fabricación, anisotropía, entre otras. Caso similar se observa entre la madera con terminación biselada unida por adhesivo con la madera con terminación biselada unida por adhesivo más clavos.

La unión biselada resulta poco eficiente al comparar con la madera unida con terminación a tope, la capacidad de carga de la madera biselada posee aproximadamente el 50 por ciento de la capacidad de carga de la madera unida con terminación a tope.

La madera laminada de eucalipto unida con terminación a tope posee aproximadamente el 85 por ciento de la capacidad de carga de una madera sólida de iguales características. La madera laminada de eucalipto unida con terminación con bisel posee aproximadamente 42 por ciento de la capacidad de carga de una madera sólida de iguales características.

Comparando resultados teóricos con resultados prácticos se observa que los resultados prácticos están por debajo de los resultados teóricos aproximadamente de un 15 a 30 por ciento, dependiendo del tipo de unión. Comparando la capacidad de carga práctica de la madera sólida que se encuentra 1.65 por ciento por debajo de la capacidad de carga teórica. La capacidad de carga teórica se basa en el factor de esbeltez  $\lambda$ . Dependiendo de la esbeltez de la sección, se puede clasificar a las columnas y por ende el tipo de falla que esta

tendrá. Las columnas cortas fallan por aplastamiento y no por pandeo lateral, por lo cual su capacidad de carga es mayor que una columna intermedia o larga. Las columnas intermedias fallan por una combinación de aplastamiento y pandeo lateral, aún así poseen mayor capacidad de carga que una columna larga ya que esta falla por pandeo lateral únicamente.

Al comparar los resultados prácticos con los obtenidos utilizando el Manual de Diseño para maderas del Grupo Andino, se observa que los resultados prácticos son inferiores en un 10 por ciento, esto se debe a que el manual generaliza los parámetros mecánicos de las maderas de acuerdo a su densidad básica, por ende dependiendo de la madera existirá maderas que sus valores sean cercanos y otras maderas cuyos valores sean distantes, pero dentro de un rango apropiado. Además el factor de seguridad de 4 garantiza que las maderas se resistan las cargas dentro de este grupo ya que este factor de seguridad es alto.

## CAPÍTULO 5

### 5.1 CONCLUSIONES

El adhesivo utilizado no proporciona la adherencia suficiente entre las láminas, la mayoría de fallas se produce debido a la poca resistencia. Se debe utilizar un adhesivo que provea la adherencia suficiente entre láminas, de tal manera que la falla se produzca en la madera.

No se distingue una diferencia entre probetas clavadas y desclavadas en cuanto a capacidad de carga, por ello, los clavos tan sólo confinan, mejorando el comportamiento de la pieza en el momento que falla, impidiendo una falla violenta o explosiva manteniendo las láminas unidas pese a que ha fallado la pieza. Resulta ventajoso el uso de clavos y el costo entre secciones clavadas y pegadas en relación con láminas únicamente pegadas no es significativo.

El pino al ser menos denso que el colorado y el eucalipto, permite una mejor absorción del adhesivo y por ende una mejor capacidad de carga. En el pino al tener una menor capacidad de carga que el colorado y el eucalipto, el adhesivo presenta mejores resultados.

En el caso de las probetas con longitudes de 50, 75 y 100 centímetros clasifican como columnas cortas, ya que  $\lambda < 10$ , mientras que las probetas de 125 centímetros de longitud se clasifican como columnas intermedias.

El esfuerzo máximo de la madera de pino corresponde al 60 % del esfuerzo máximo de la madera de colorado.

Ya que la resistencia del adhesivo no es la adecuada, las uniones con biseles no resultan adecuadas, por ello, la capacidad de carga se ve drásticamente afectada. La capacidad de carga de uniones con bisel es apenas el 50 por ciento de las uniones a tope.

Conforme se aumenta la longitud de la sección se reduce a la capacidad de carga, en el caso de madera de eucalipto de sección maciza, los resultados teóricos y prácticos son muy semejantes variando de 1.65 por ciento dependiendo de la longitud. La madera laminada de eucalipto unida con terminación a tope posee aproximadamente 85 por ciento de la capacidad de carga de una madera sólida de iguales características. La madera laminada de eucalipto unida con terminación con bisel posee aproximadamente 40 por ciento de la capacidad de carga de una madera sólida de iguales características.

El realizar los cortes del bisel a cuarenta y cinco grados incrementa el costo en la mano de obra, por lo cual el incremento resulta aproximadamente en dos por ciento del costo total de pieza por metro lineal. Además el incorporar clavos incrementa aproximadamente en uno por ciento del costo total de la pieza por metro línea. Entre el costo de una pieza maciza y una pieza de madera laminada existe una diferencia aproximada del doce por ciento, lo que no marca una diferencia marcada de precios, considerando ventajas y desventajas de los dos tipos de secciones y por ello la madera laminada puede ser considerada una alternativa al momento de escoger un sistema constructivo.

En el mercado Ecuatoriano las dimensiones de las piezas están impuestas por los comerciantes de madera, razón por la cual el momento de mandar a fabricar una pieza con dimensiones específicas resulta muy costoso, además cuanto más grandes son las dimensiones de las piezas de madera maciza, más costoso resulta el comprar la misma, debido a una escasez de árboles maduros y a la dificultad de movilización y ventas. Por todo lo mencionado anteriormente el realizar piezas de madera laminada resulta más económico cuanto más grande es la pieza, y realizando una comparación entre las ventajas y desventajas de la madera laminada que mencionamos en el capítulo cuatro, no cabe duda, que la madera laminada es una alternativa e incluso menos costosa dependiendo de las características de la pieza y de la estructura donde serán utilizadas.

El uso de mejores adhesivos mejora la capacidad de carga, además el uso de técnicas más sofisticadas en el proceso constructivo mejora la resistencia y

minimiza el costo de producción, incluso se puede prefabricar estructuras, reduciendo tiempo de construcción y con ello reducción de mano de obra y costos.

El peso de la madera laminada es aproximadamente 40 por ciento más liviana que la madera sólida.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Ananias Rubén. (2009). Física de la madera. Chile. Departamento de Ingeniería en Maderas. Universidad de Biobío

Boletín Informativo. (1994). Corporación chilena de la Madera. Chile. Corma

Bravo Hernán. (2010). Proyecto de la norma ecuatoriana de construcción sección maderas. Quito

Cervera Miguel. (2001). Resistencia de materiales. España. Editorial UPC. Segunda edición.

Delgado Antonio. (1996). Estructuras de Madera. España. E.T.S de Arquitectura. Universidad de Sevilla

Deutsche Normen. Din code 1052. (1969). Alemania

Fernández Francisco. (1991). Estructuras de madera. México. Limusa

García Julián. (2006). Apuntes de Construcción en Madera. España. Visión net

Jiménez Luis. (1994). Conexiones de elementos estructurales de madera sometidos a carga perpendicular a la fibra. Quito. Tesis de grado Escuela Politécnica Nacional

National Forest Products Association. (1982). National Design Specification. Wood Construction. Estados Unidos

Obando Luis. y Tinoco Luis.(1993). Estudio experimental de conexiones de madera estructural sujeta a carga axial. Quito.Tesis de grado Escuela Politécnica Nacional

Padt - Refort. Manual de diseño para maderas del grupo andino. Perú.Junta del Acuerdo de Cartagena

Padt - Refort.(1984). Cartilla de construcción con madera.Perú. Junta del Acuerdo de Cartagena

Timoshenko Stephen. (1957). Resistencia de materiales. Madrid. Espasa - Calpe

Timoshenko Stephen. &YoungD. (1979). Resistencia de materiales. España.Montaner y Simón S.A.

Urbina Gerardo. y Agnic Slaven.(2005). Tecnología de la madera. Red madera. Chile. Libro 1. Talca

Urbina Gerardo.(2005). Preservación de la madera. Chile .Red madera. Libro 2. Talca

Urbina Gerardo. & Villagra Rodrigo. (2005).Re - manufactura de la madera, tableros contrachapados. Chile. Libro 3. Talca

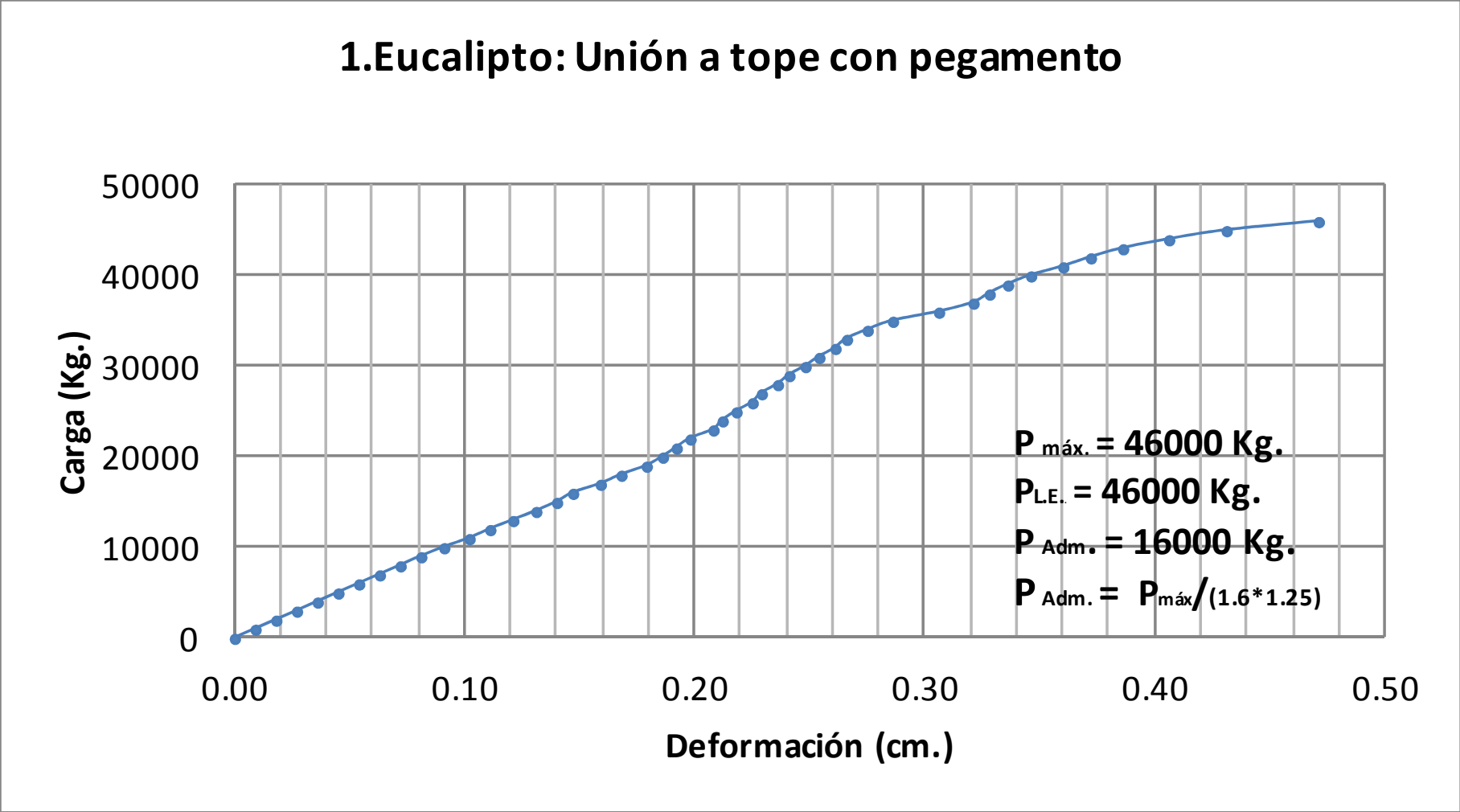
Vignote S. &Martínez L. (2006).Tecnología de la Madera. España. Grupo Mundi - Prensa. Tercera edición

Vintimilla Jorge. Curso de Ingeniería de las construcciones de Madera.Quito.

## **ANEXOS**

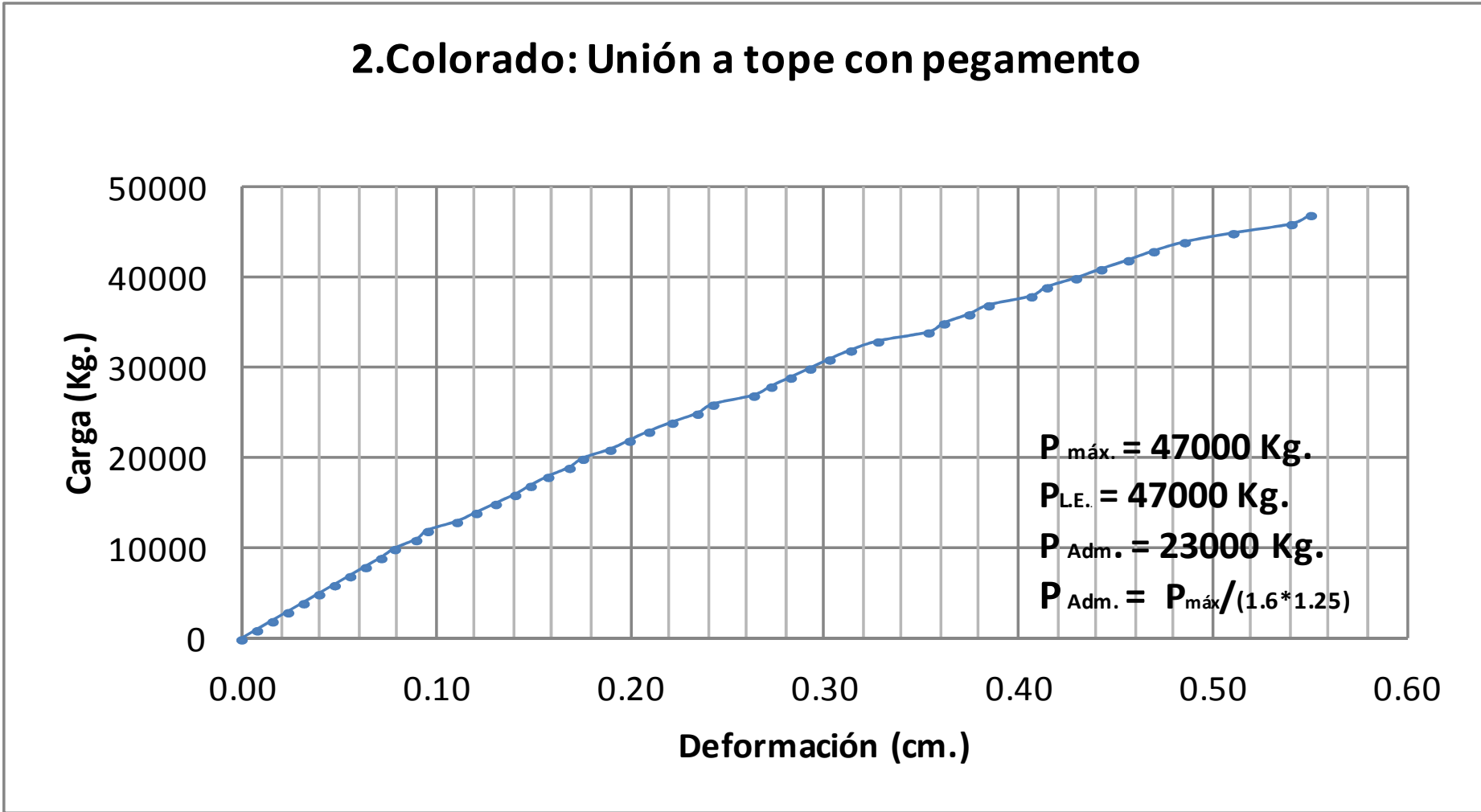
**ANEXO N<sup>o</sup> 1**  
**GRÁFICAS CARGA - DEFORMACIÓN**

GRÁFICO 1. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 1



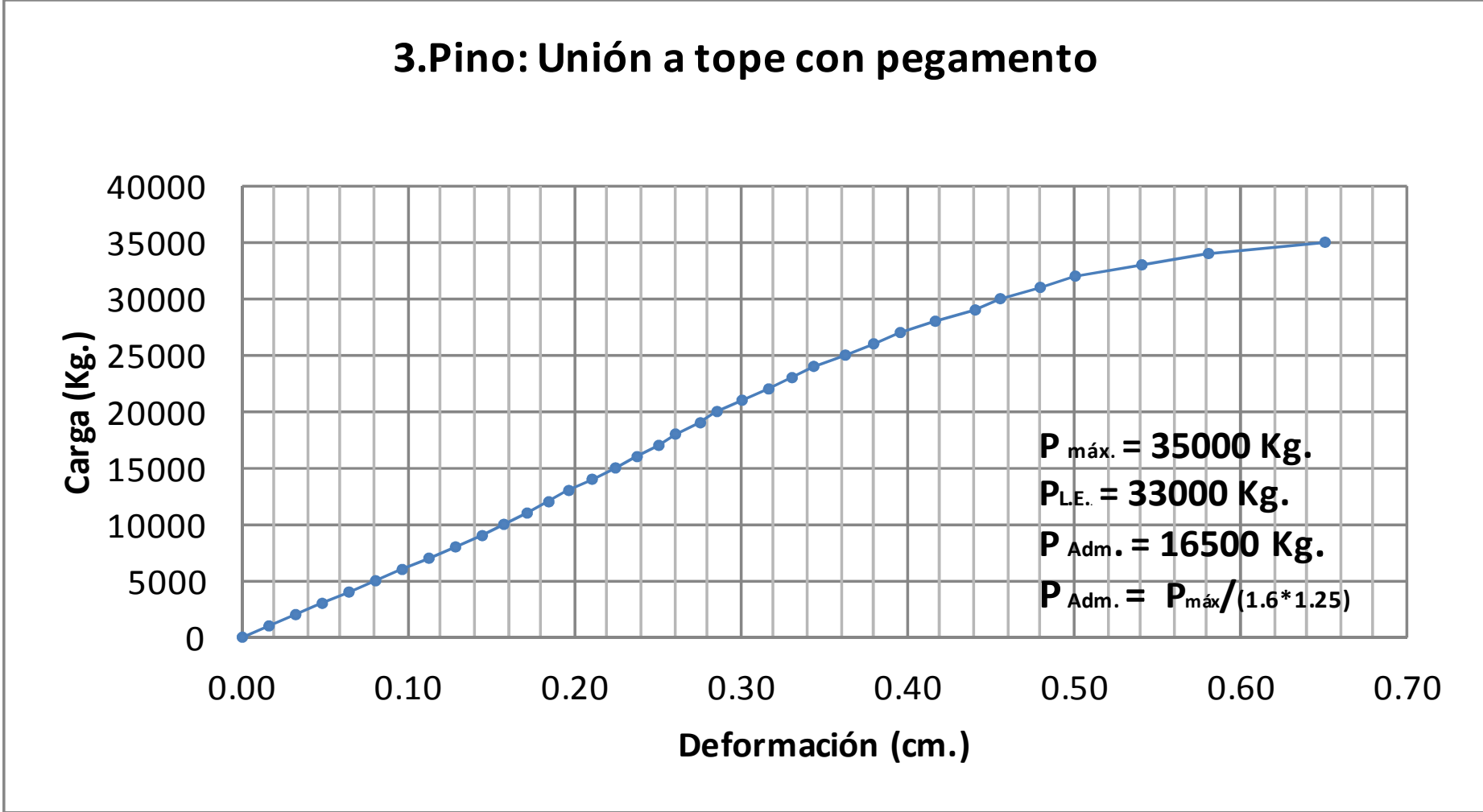
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 2. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 2



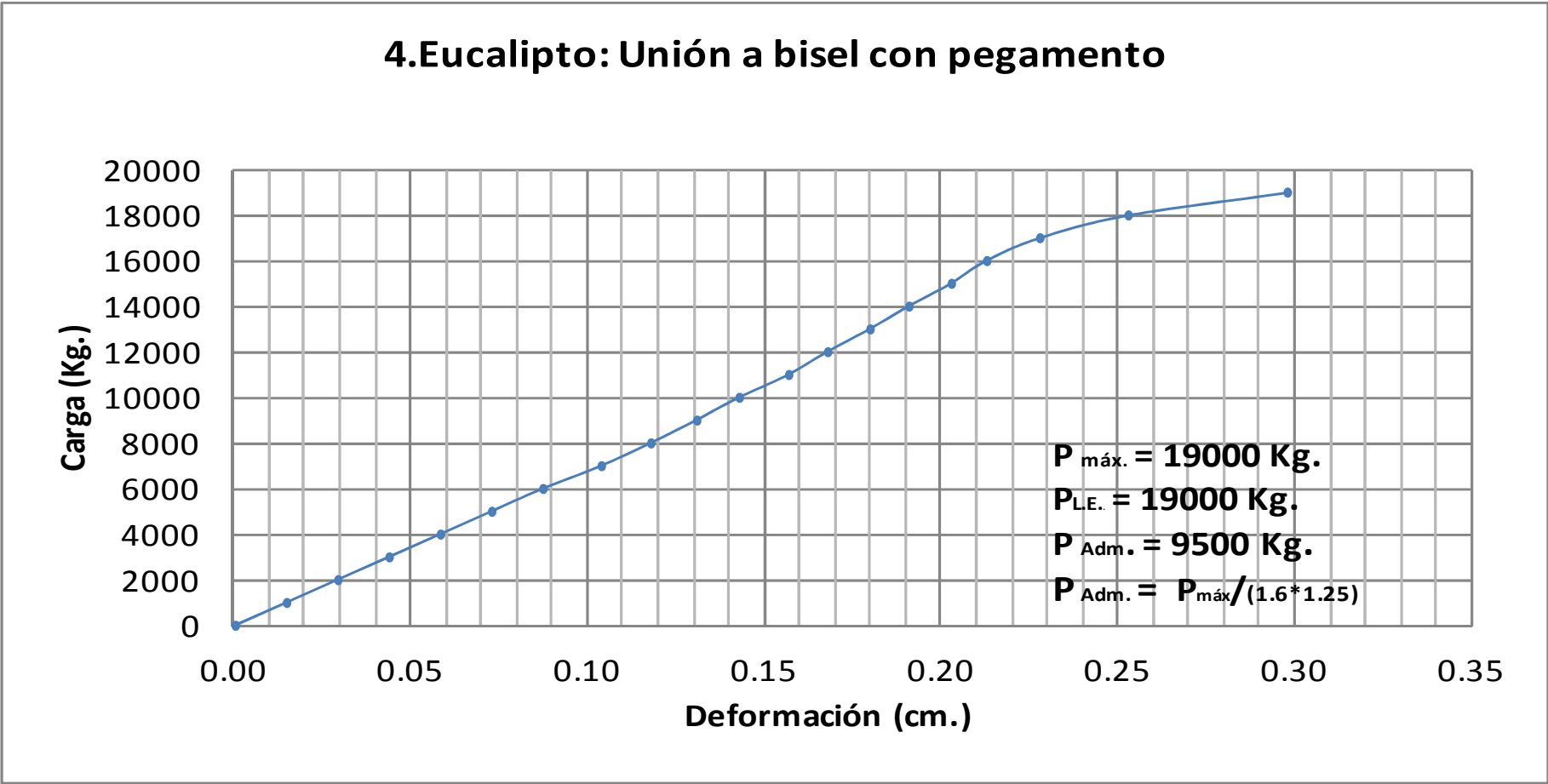
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 3. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 3



Elaborado por: Emilio Dávalos

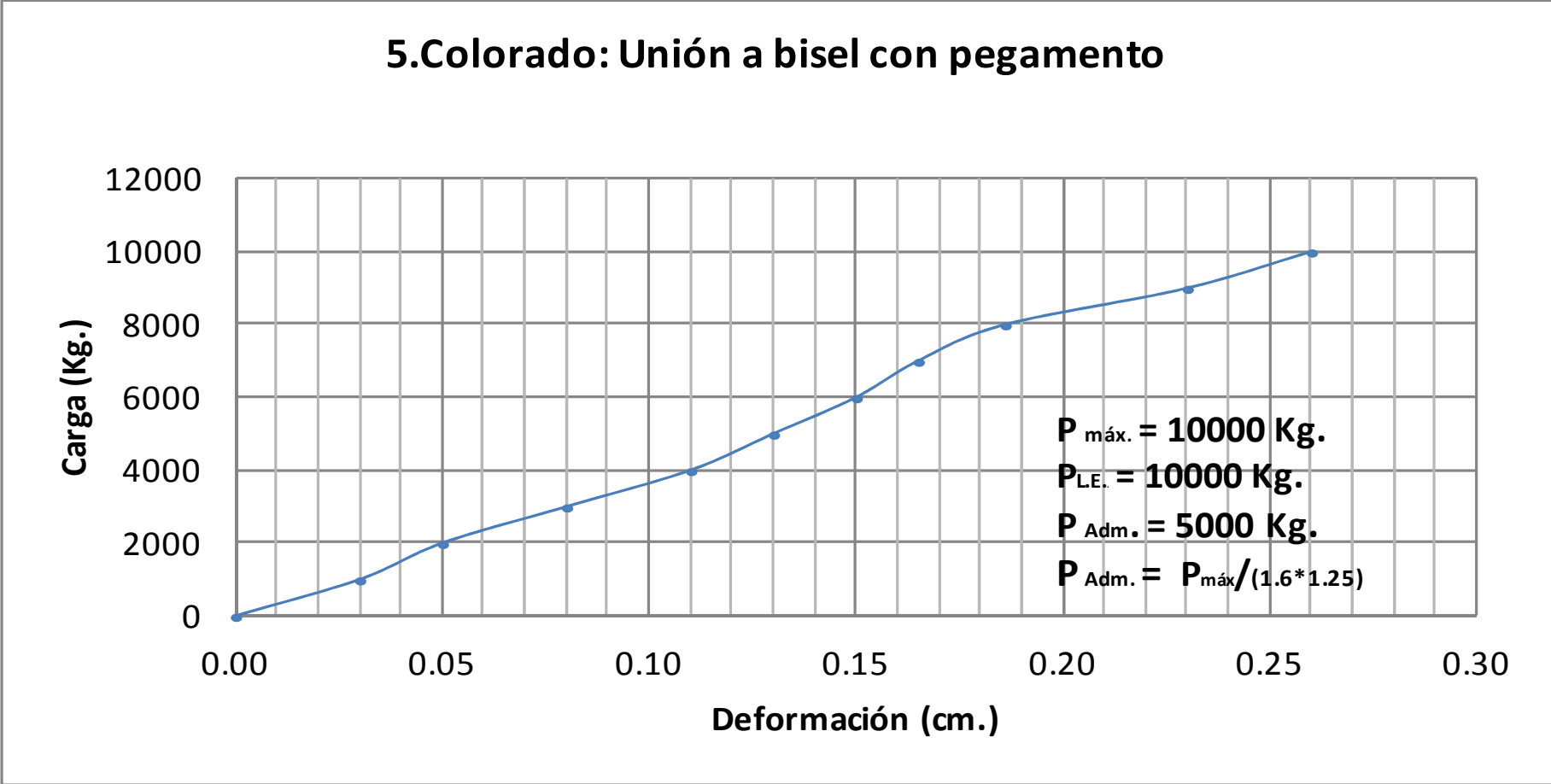
GRÁFICO 4. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 4



Elaborado por: Emilio Dávalos

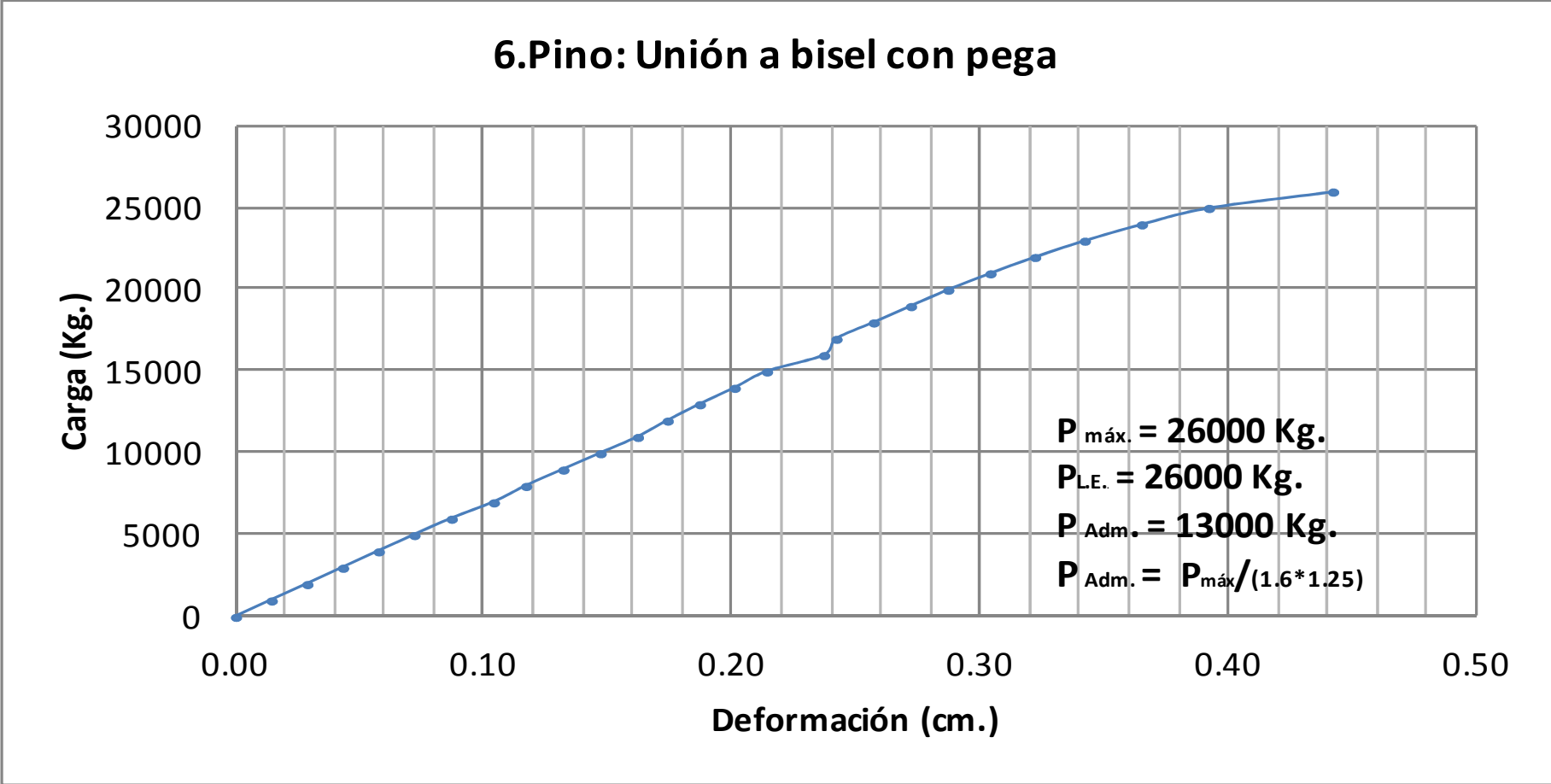


GRÁFICO 5. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 5



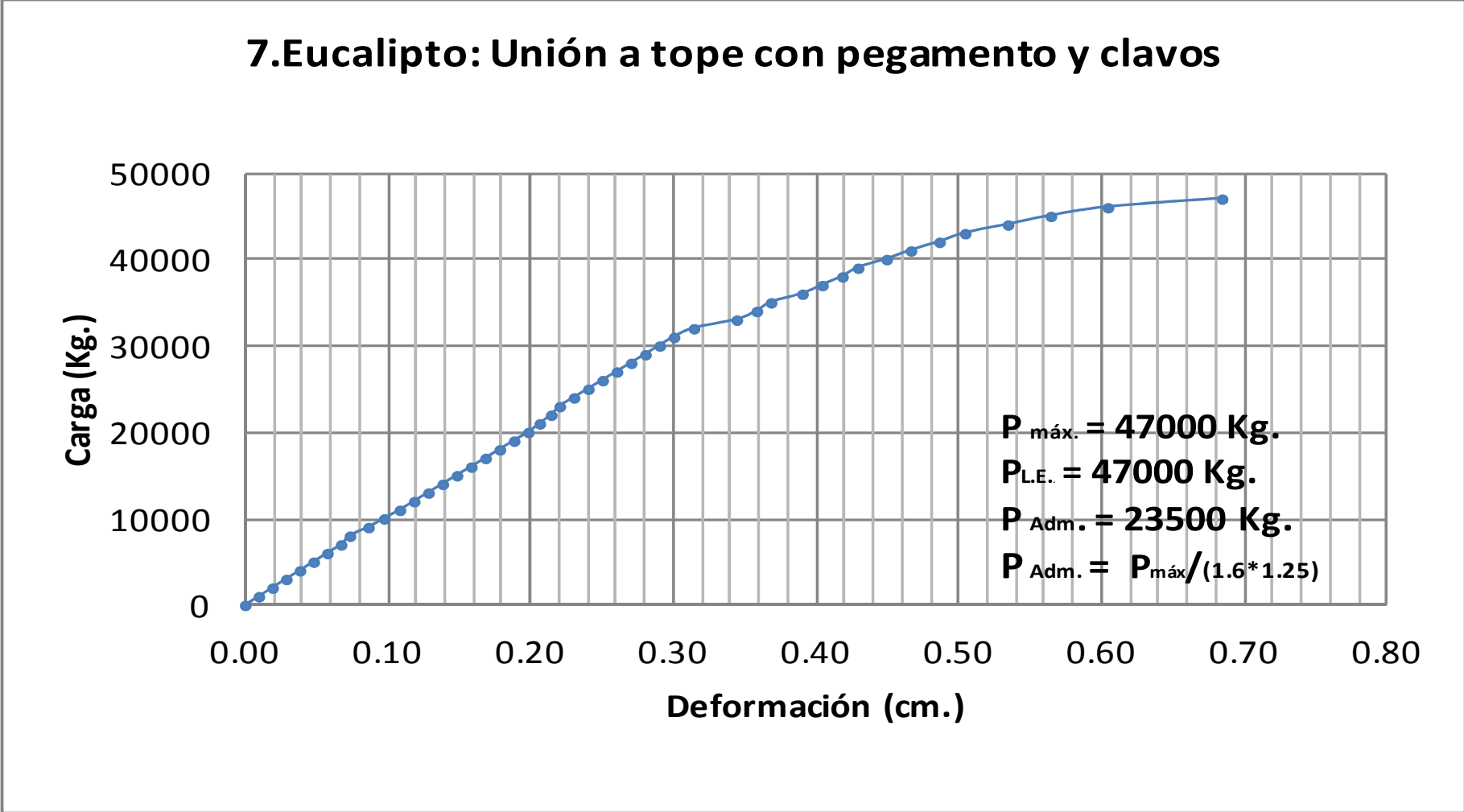
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 6. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 6



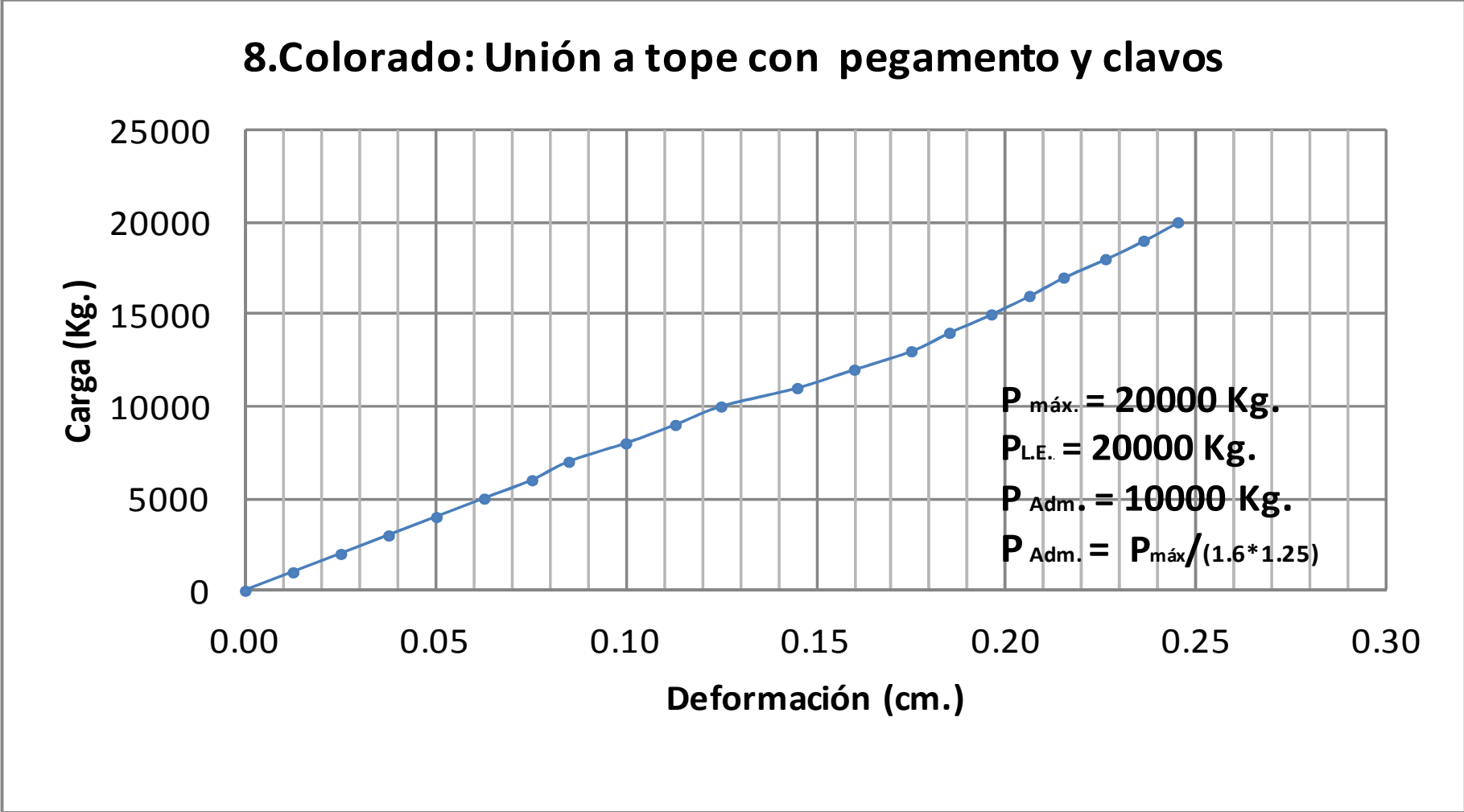
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 7. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 7



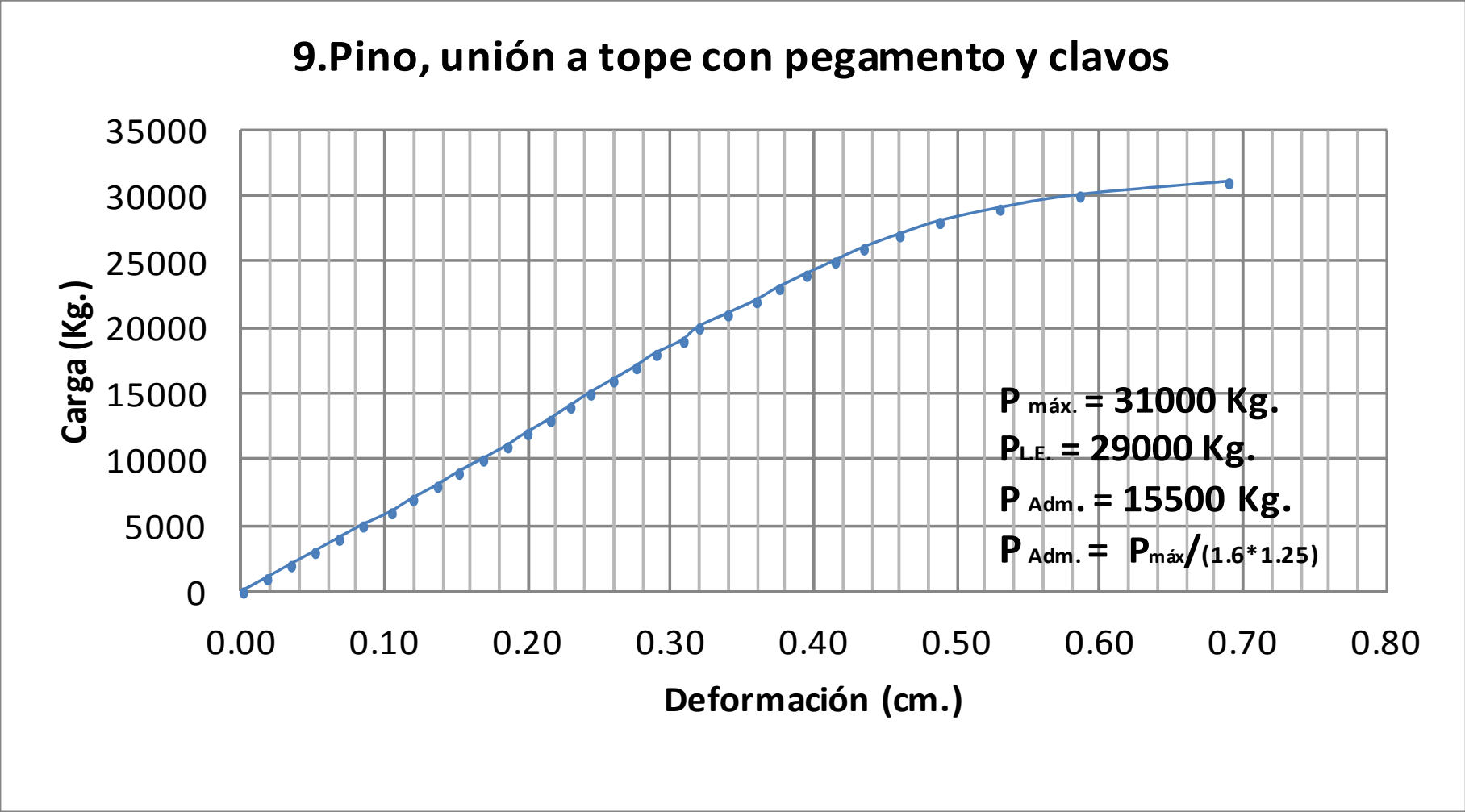
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICA 8. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 8



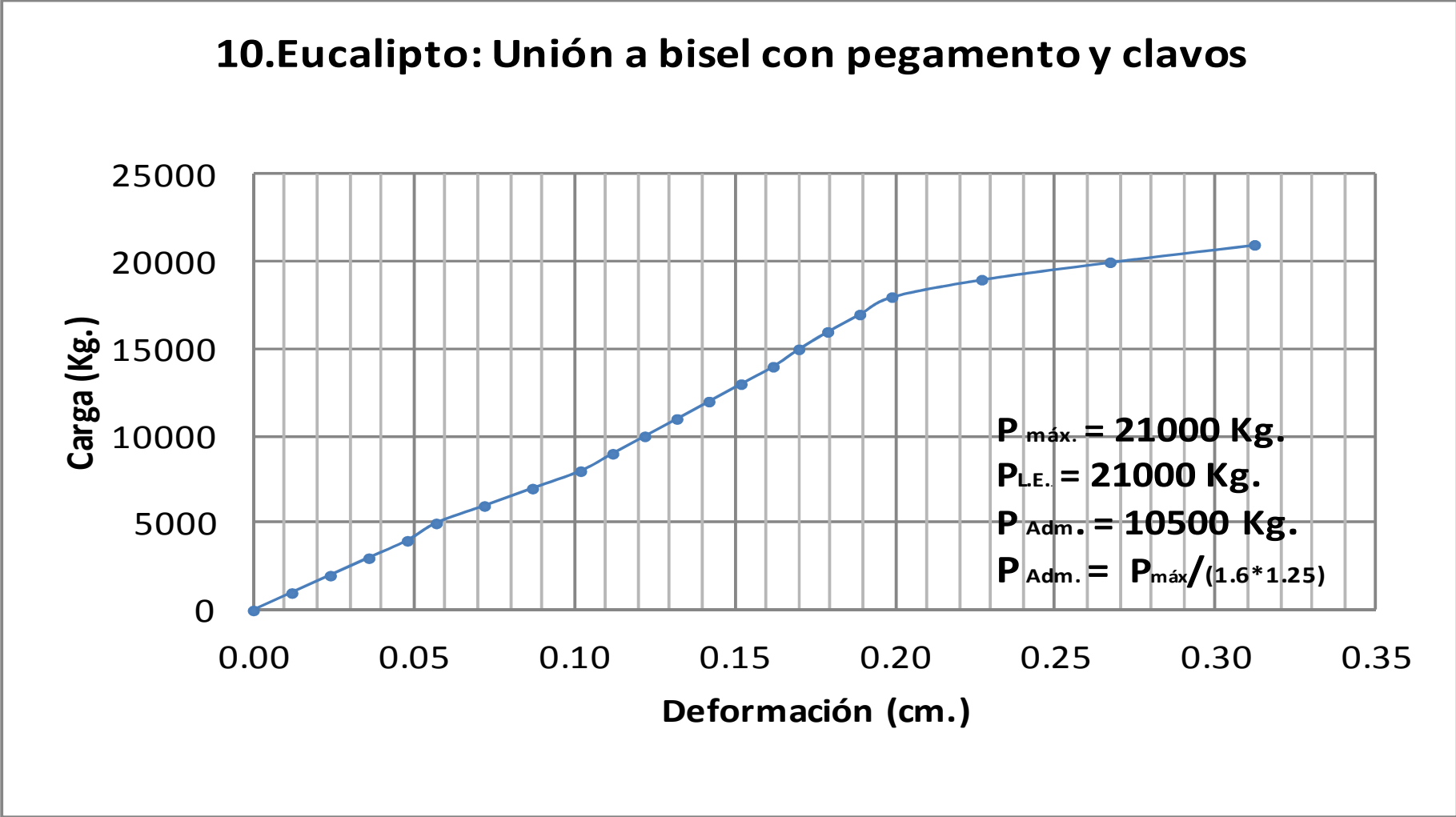
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 9. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 9



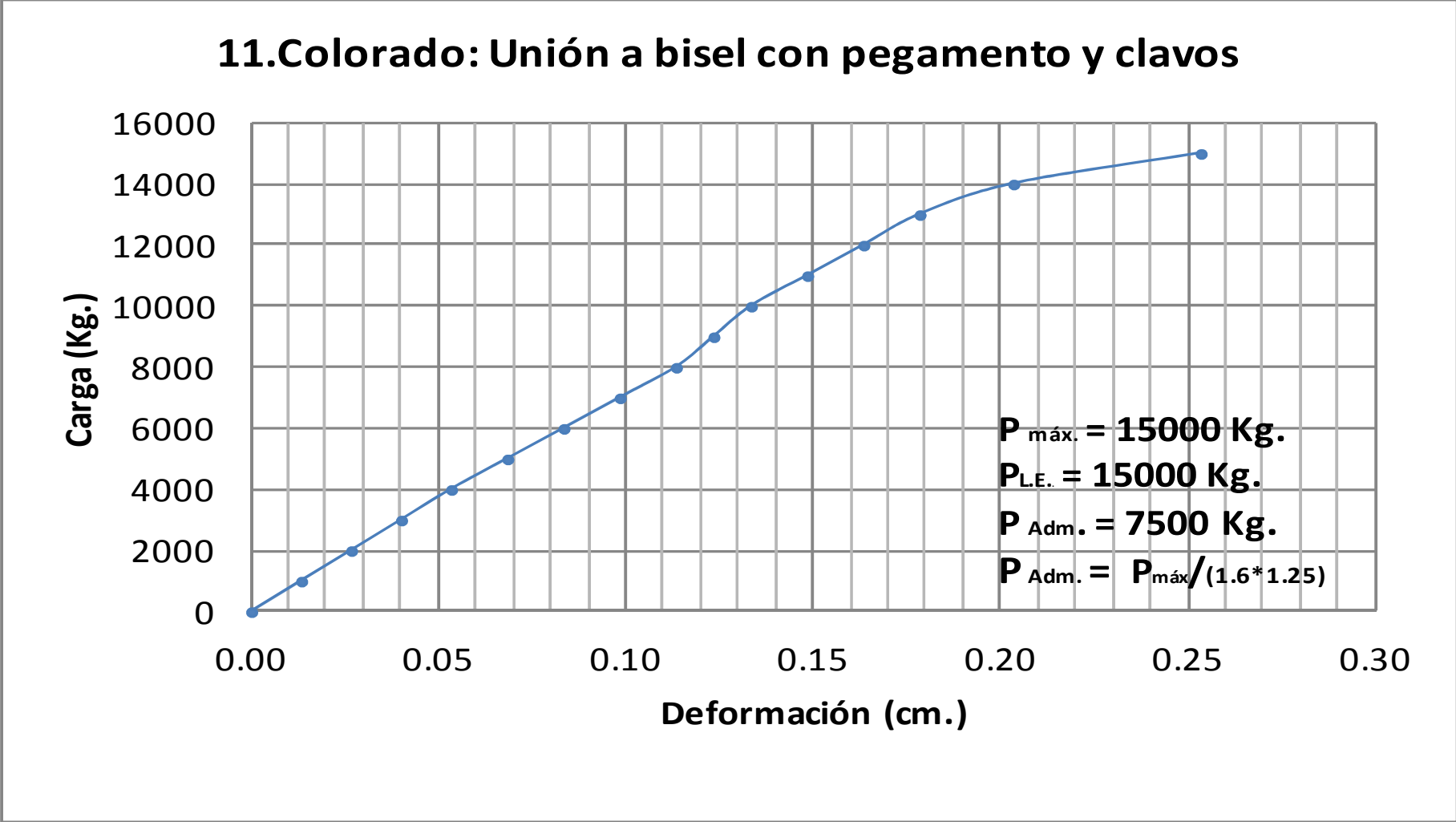
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 10. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 10



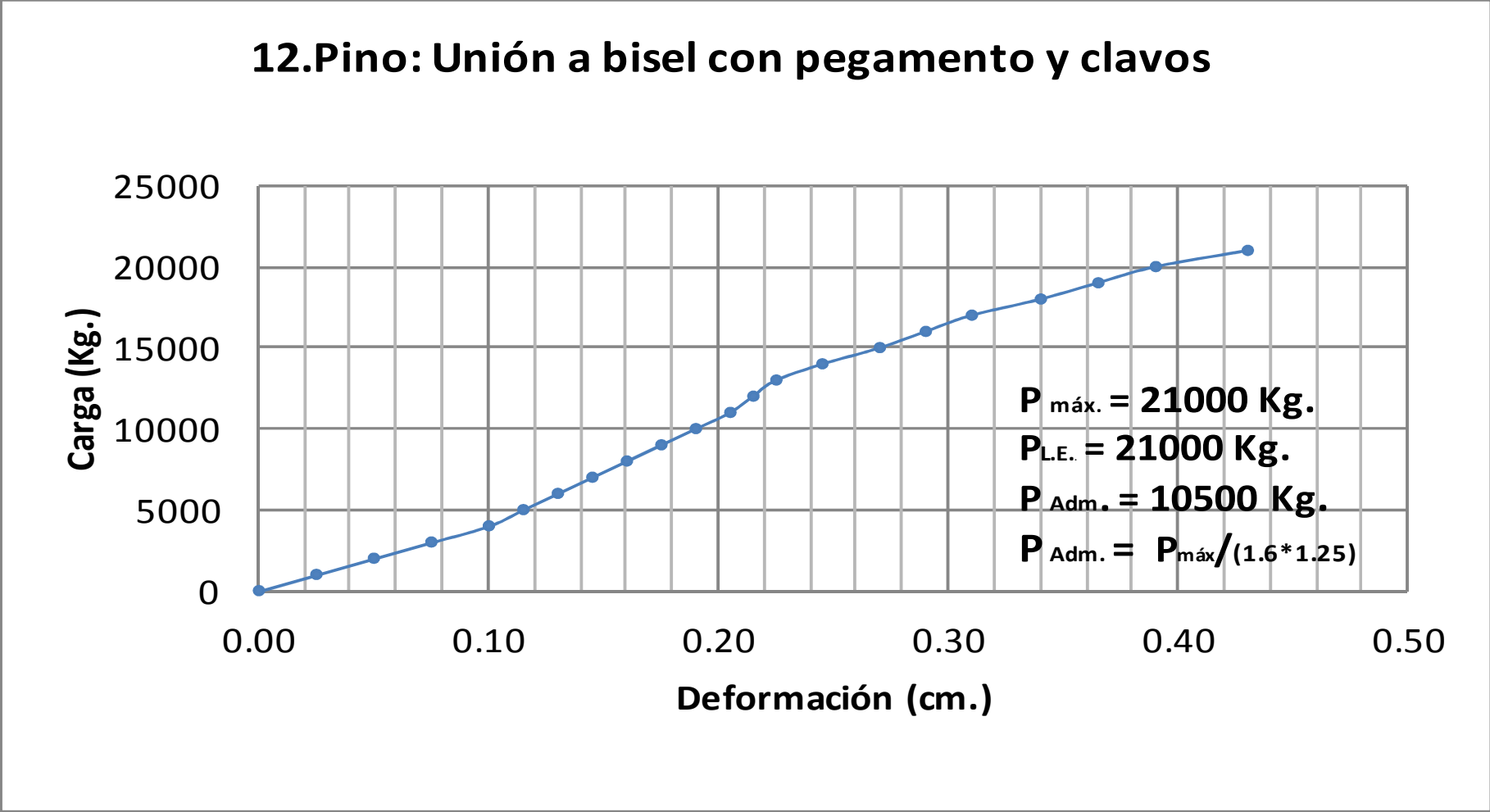
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 11. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 11



Elaborado por: Emilio Dávalos

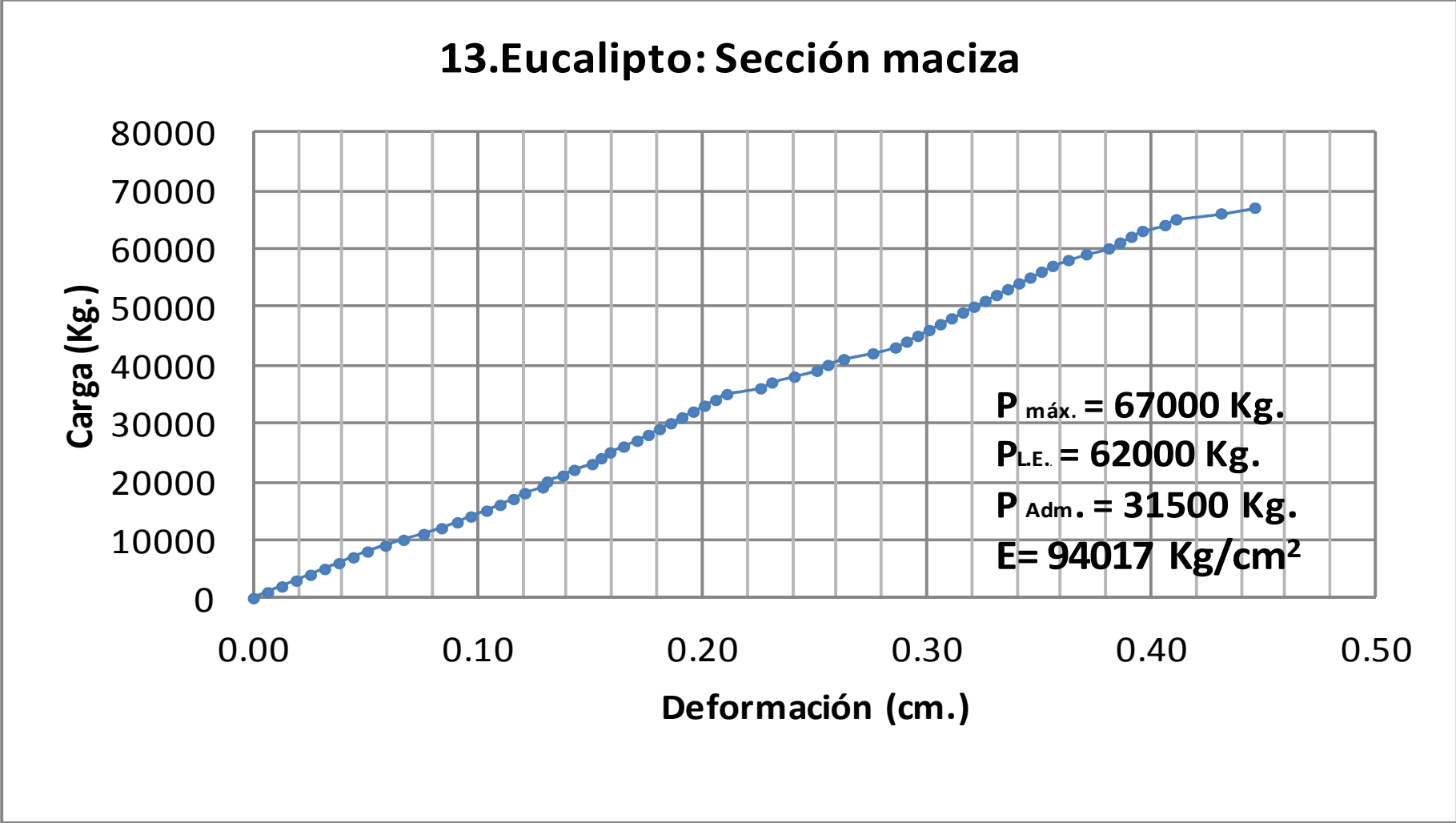
GRÁFICO 12. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 12



Elaborado por: Emilio Dávalos

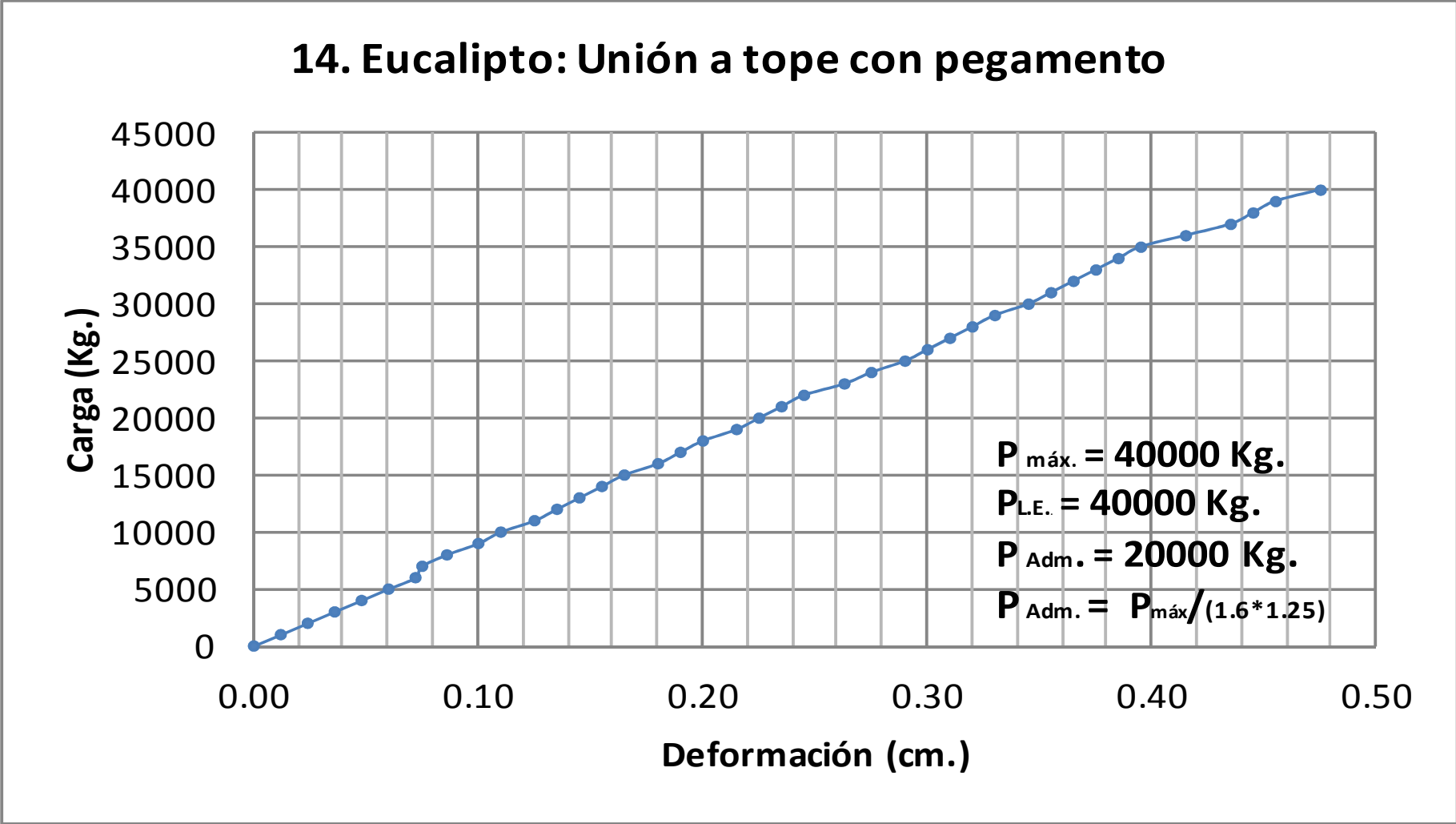


GRÁFICO 13. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 13



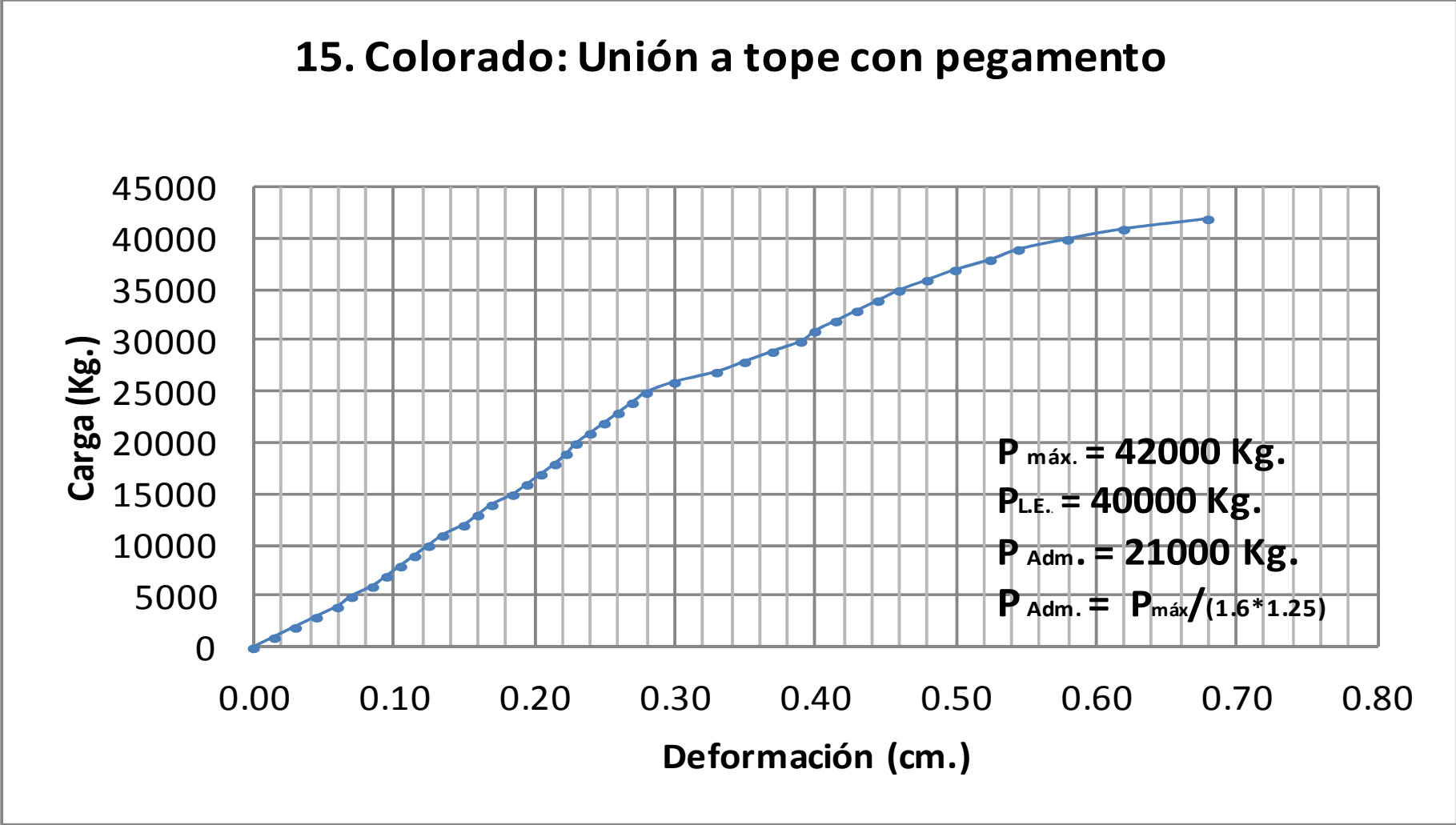
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 14. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 14



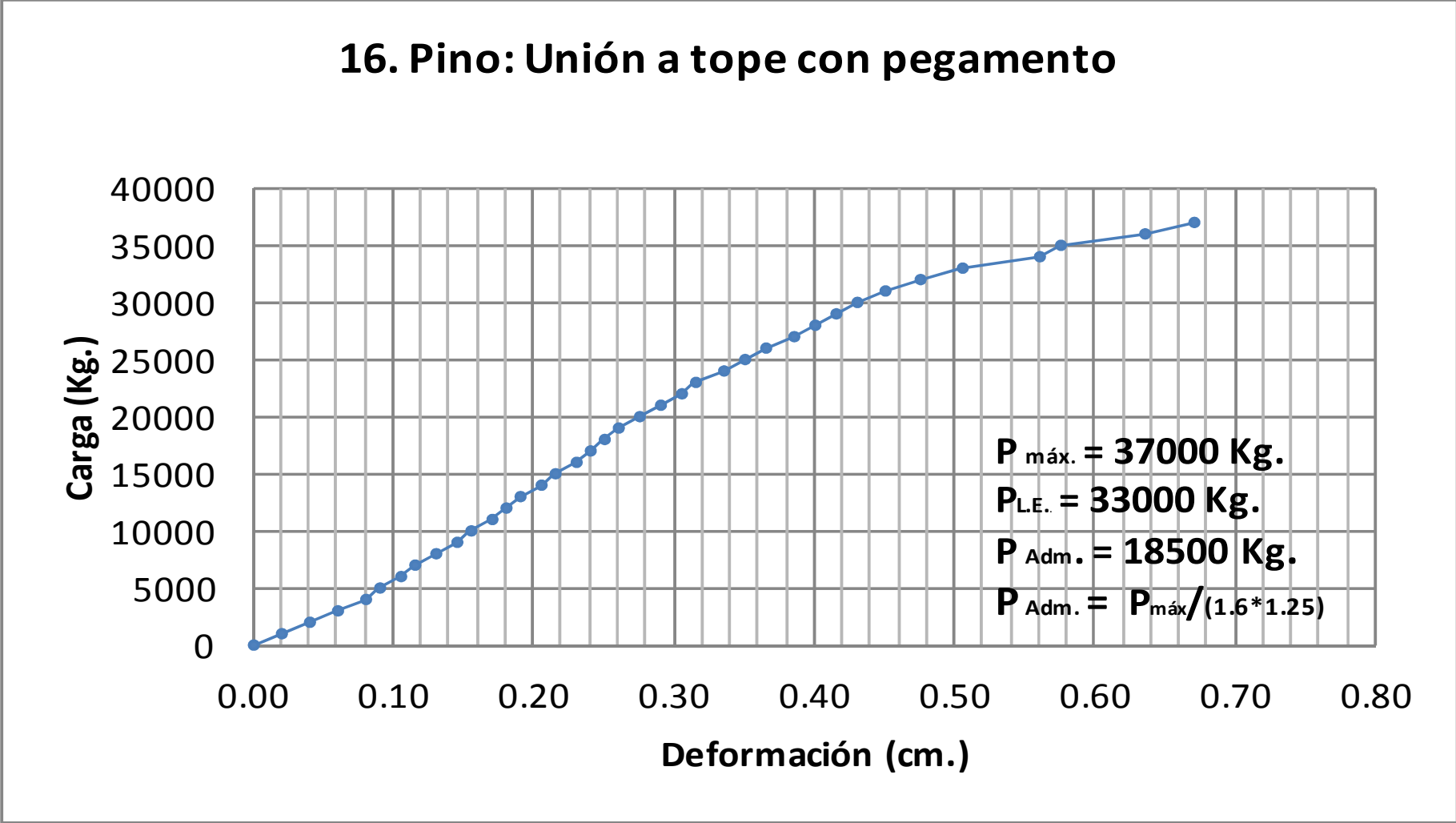
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 15. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 15



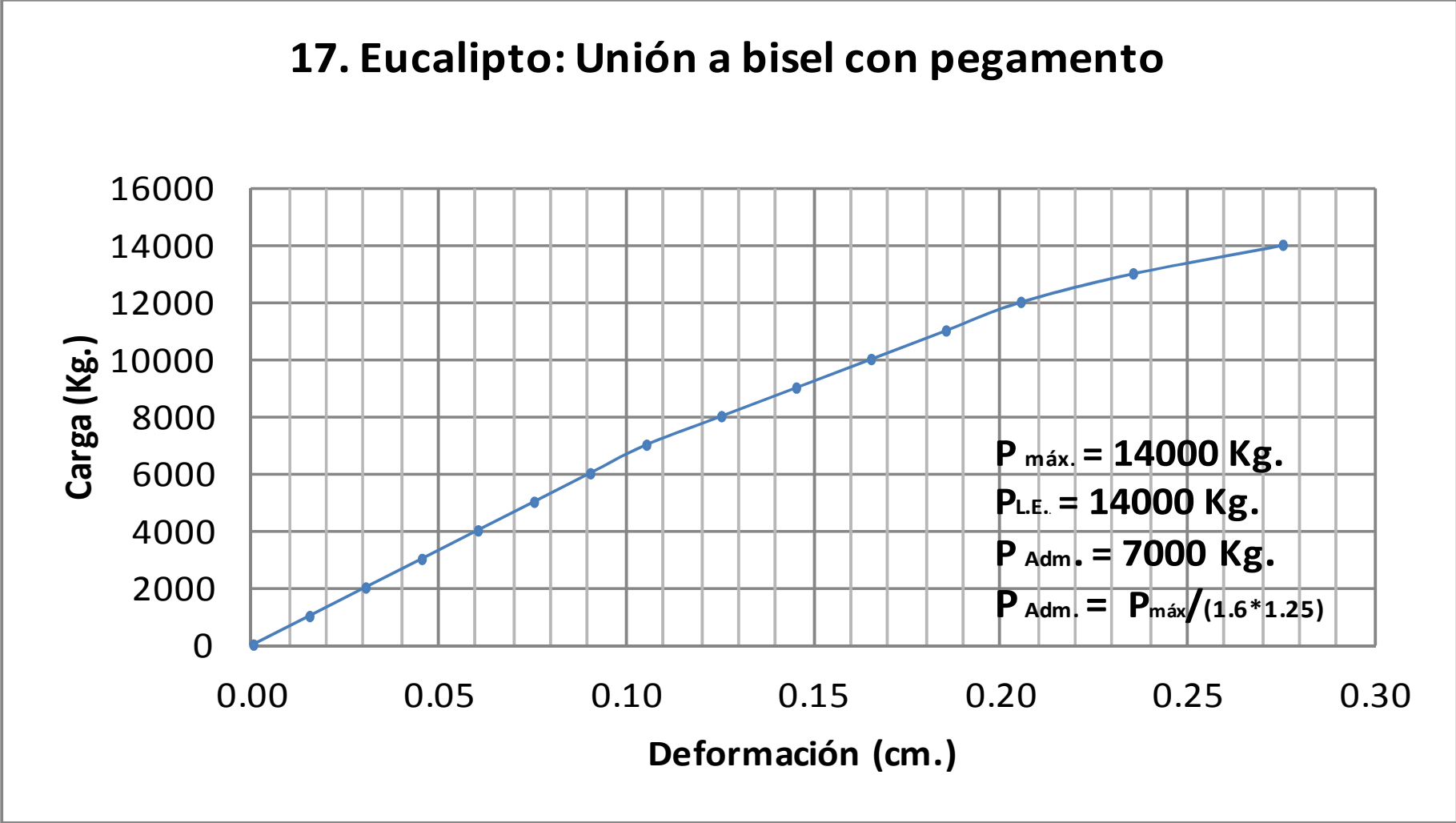
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 16. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 16



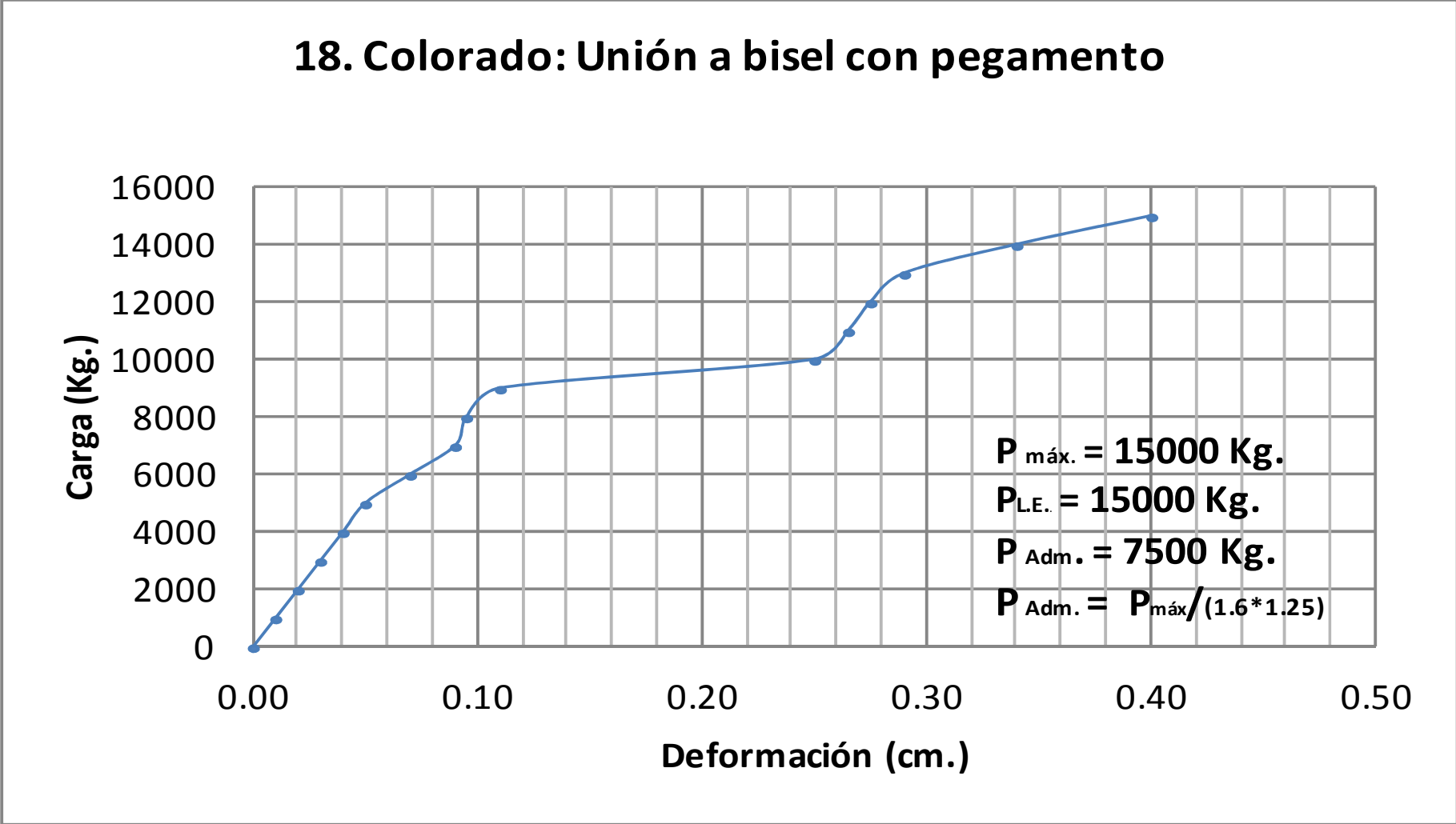
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 17. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 17



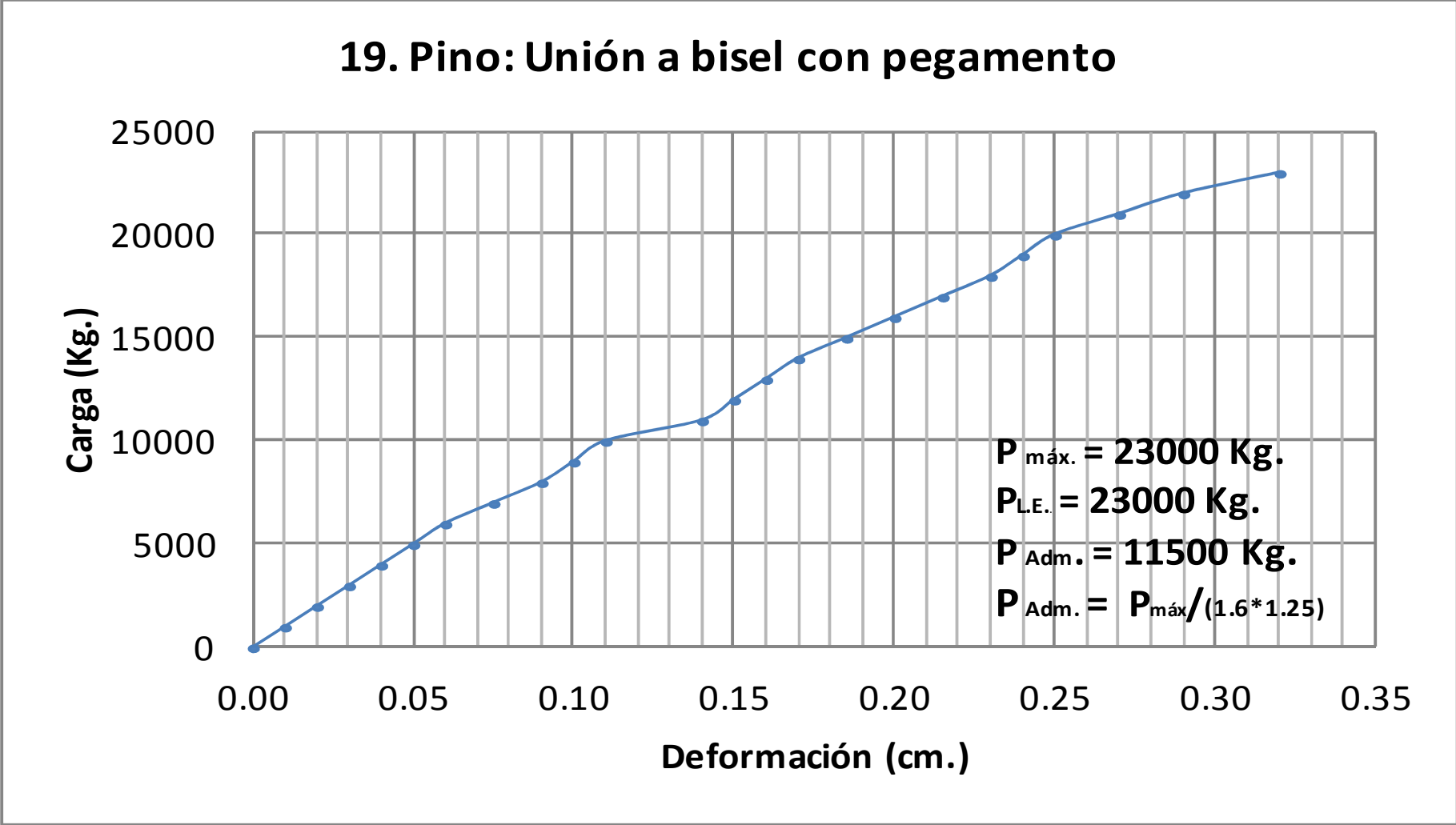
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 18. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 18



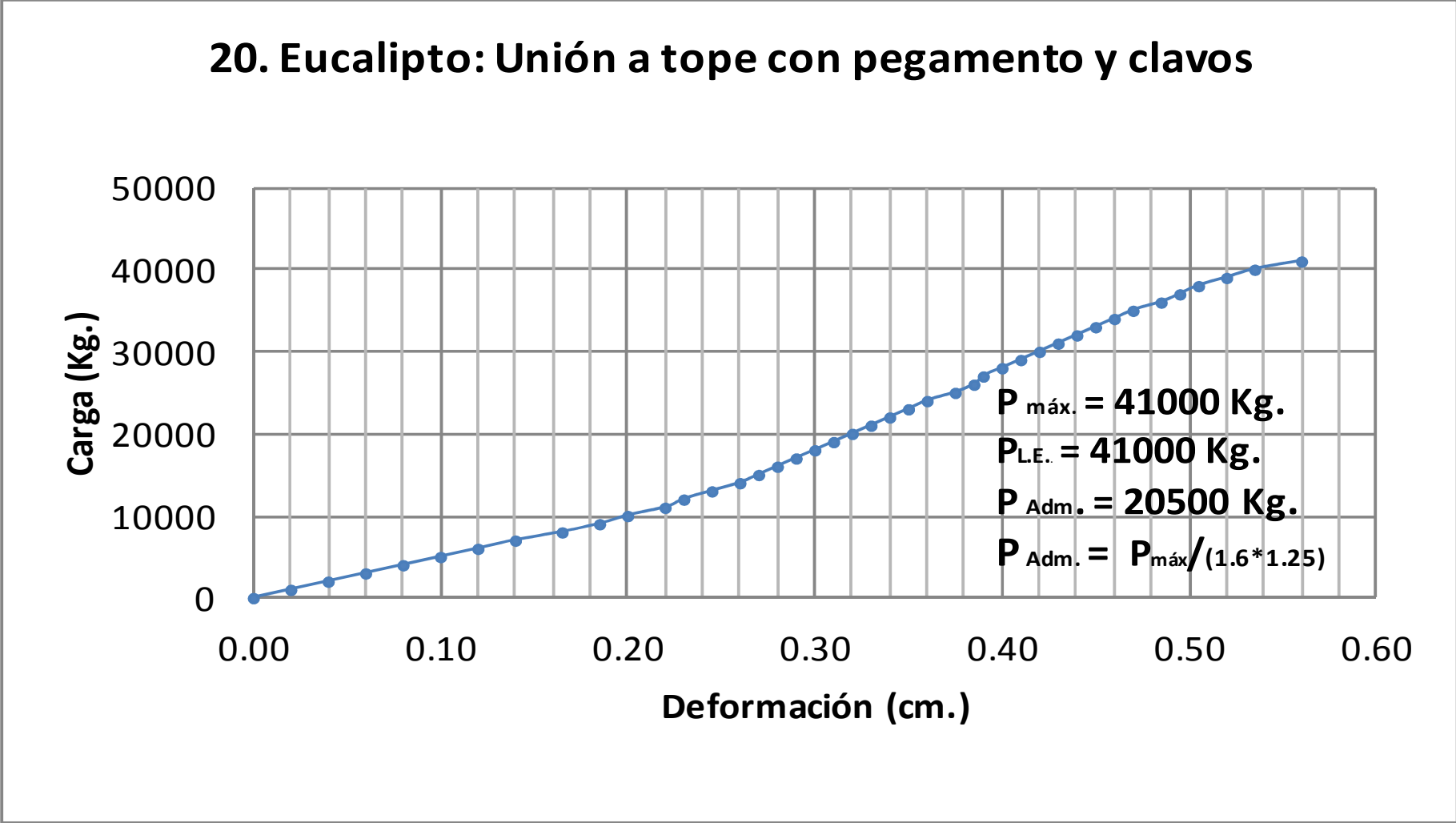
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 19. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 19



Elaborado por: Emilio Dávalos

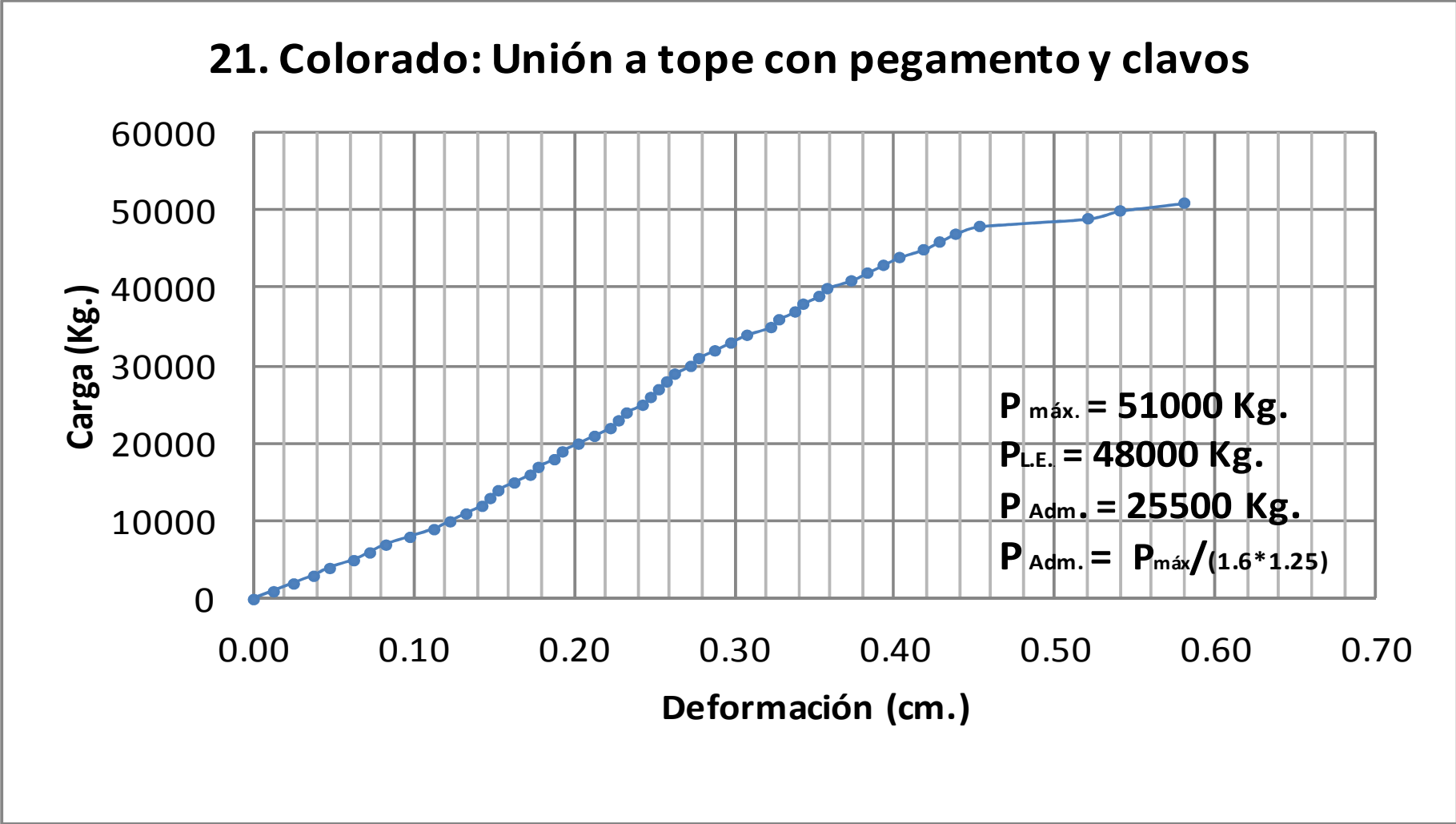
GRÁFICO 20. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 20



Elaborado por: Emilio Dávalos

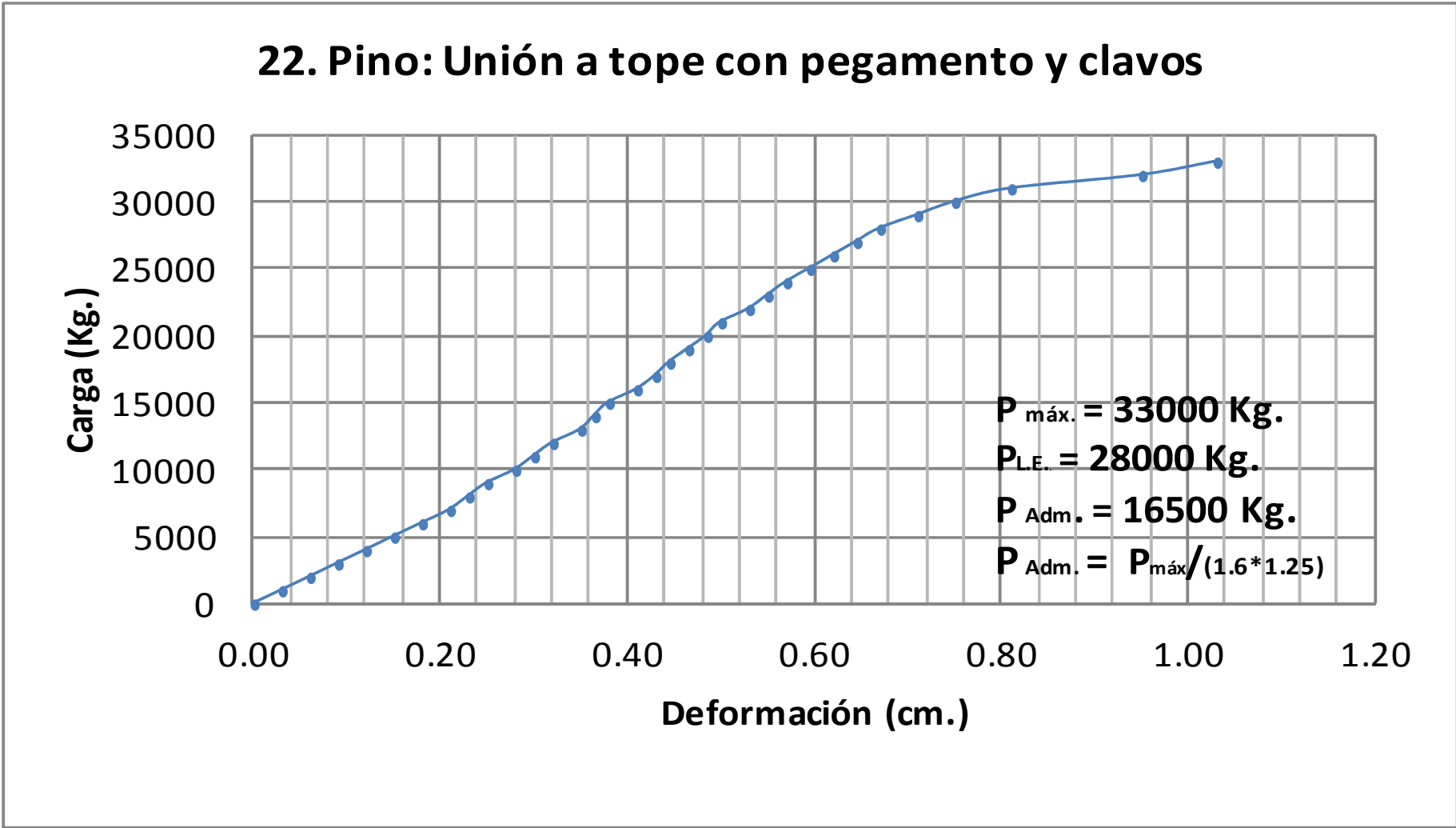


GRÁFICO 21. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 21



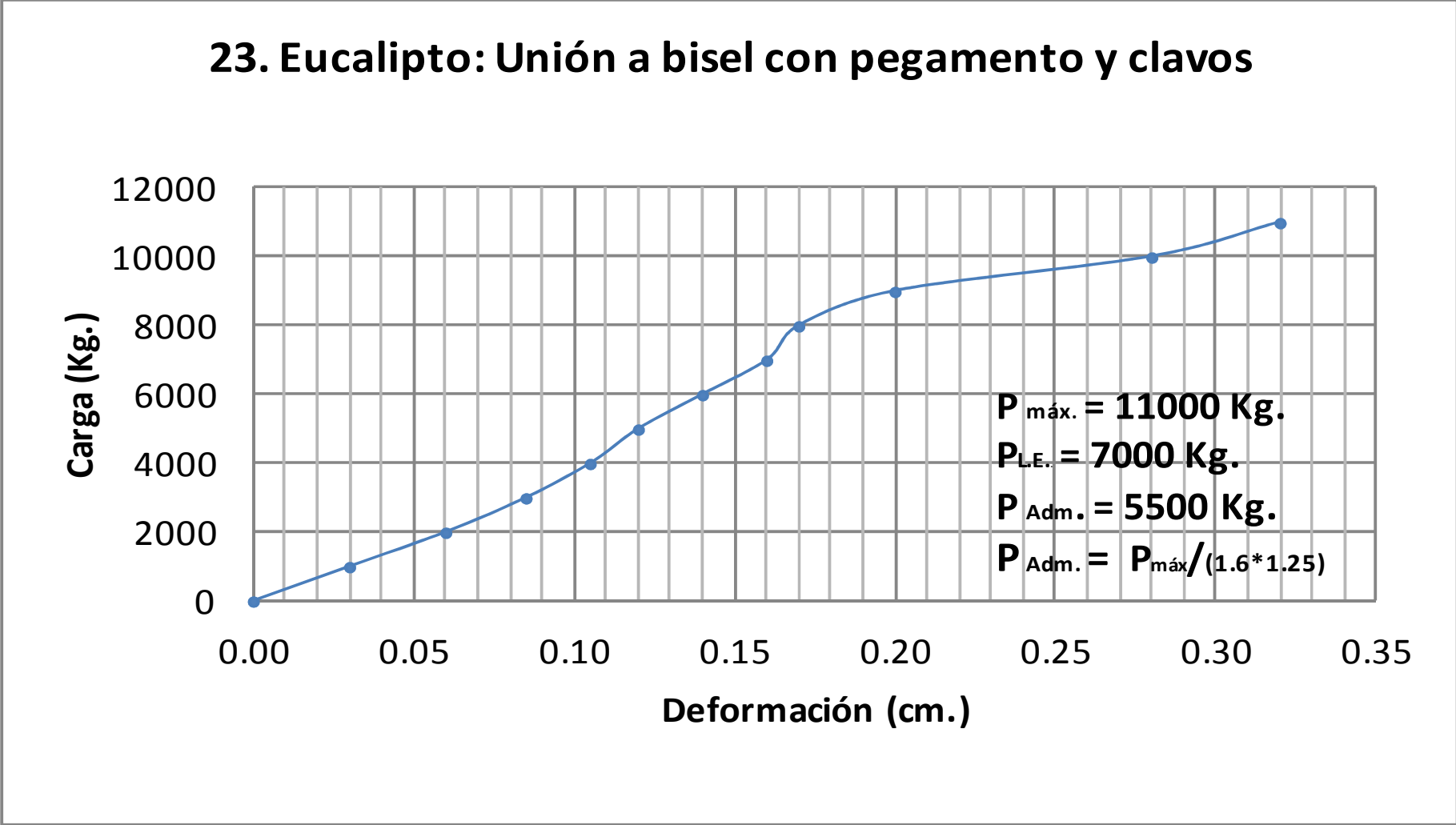
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 22. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 22



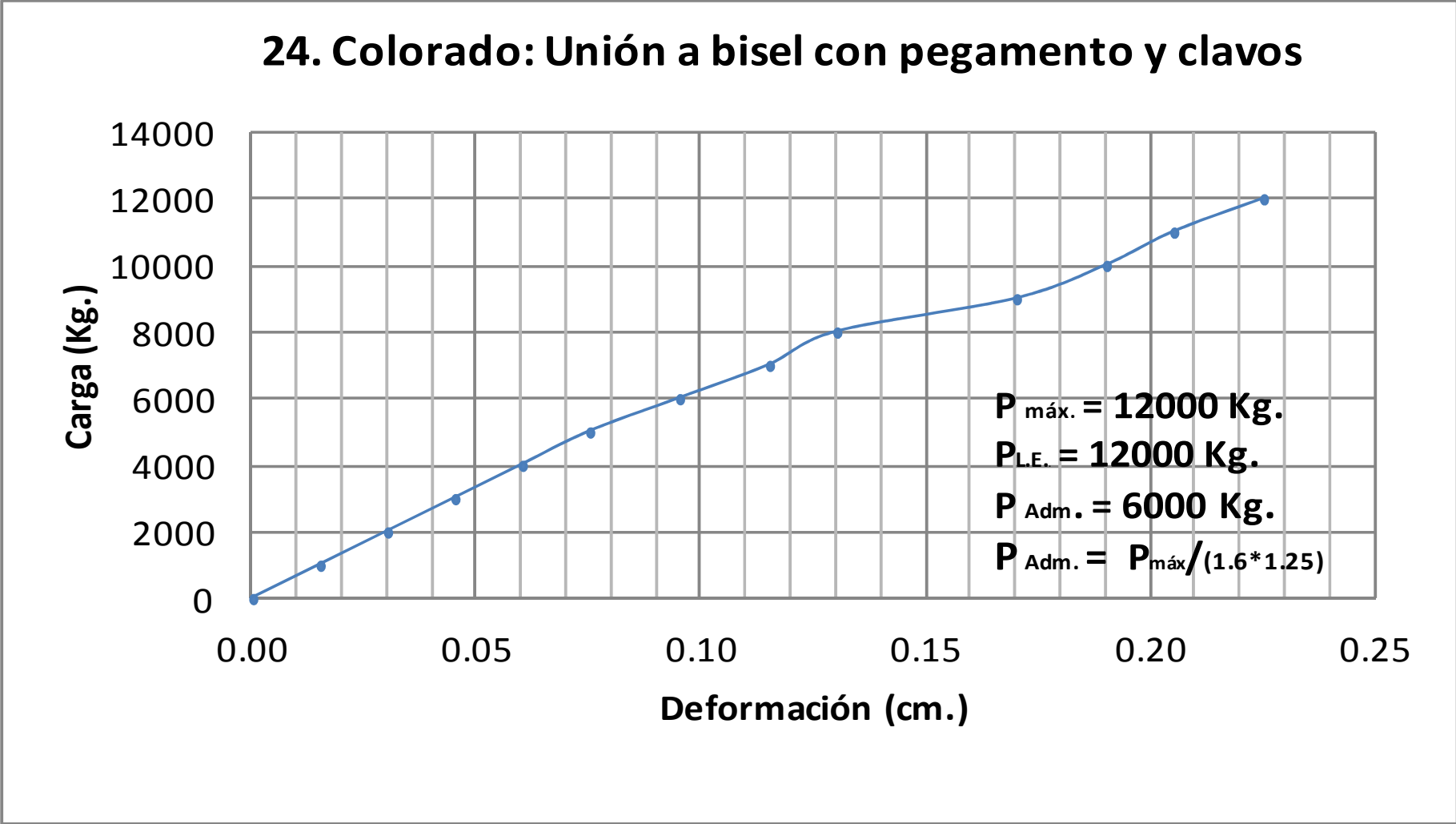
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 23. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 23



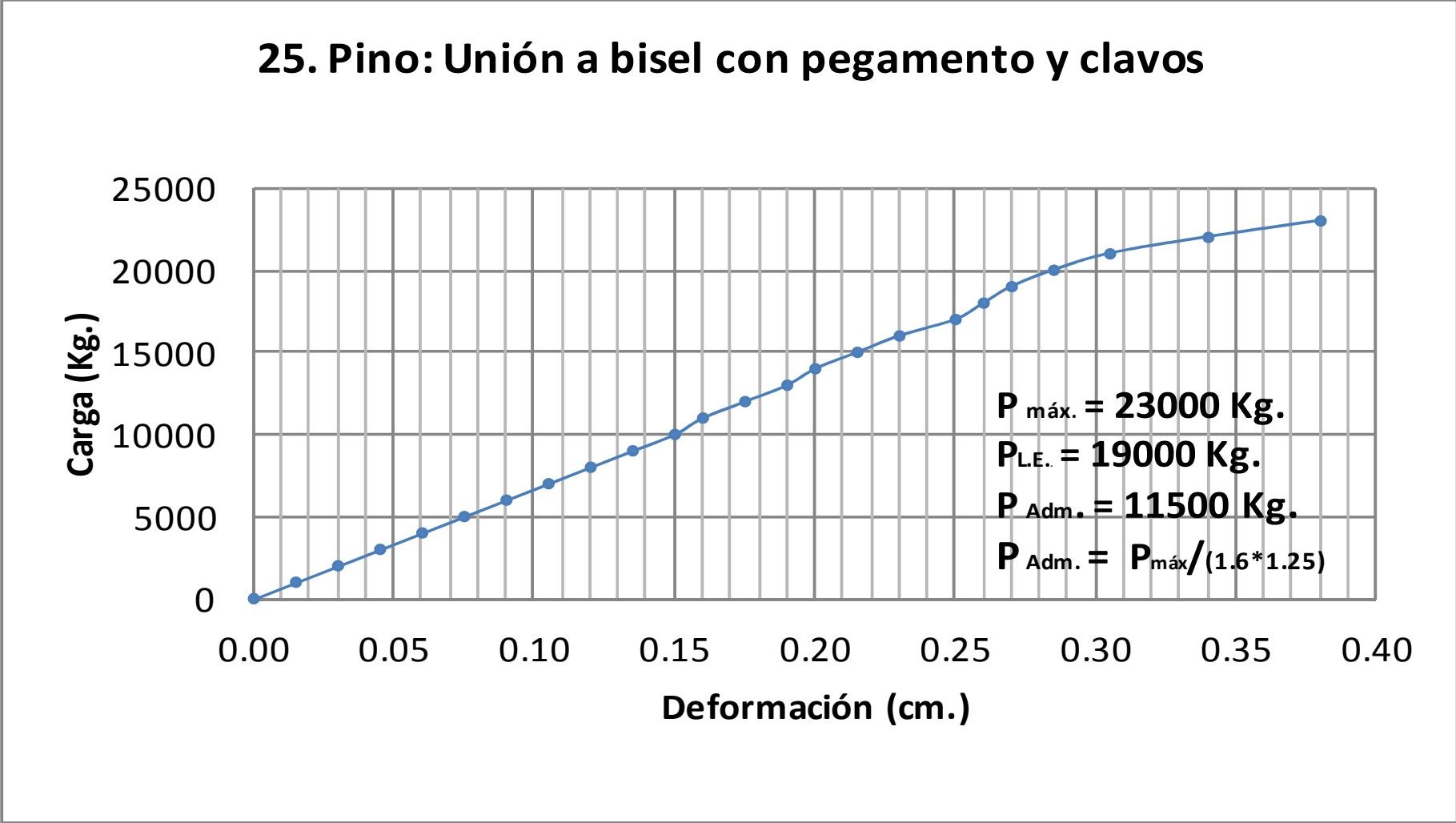
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICA 24. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 24



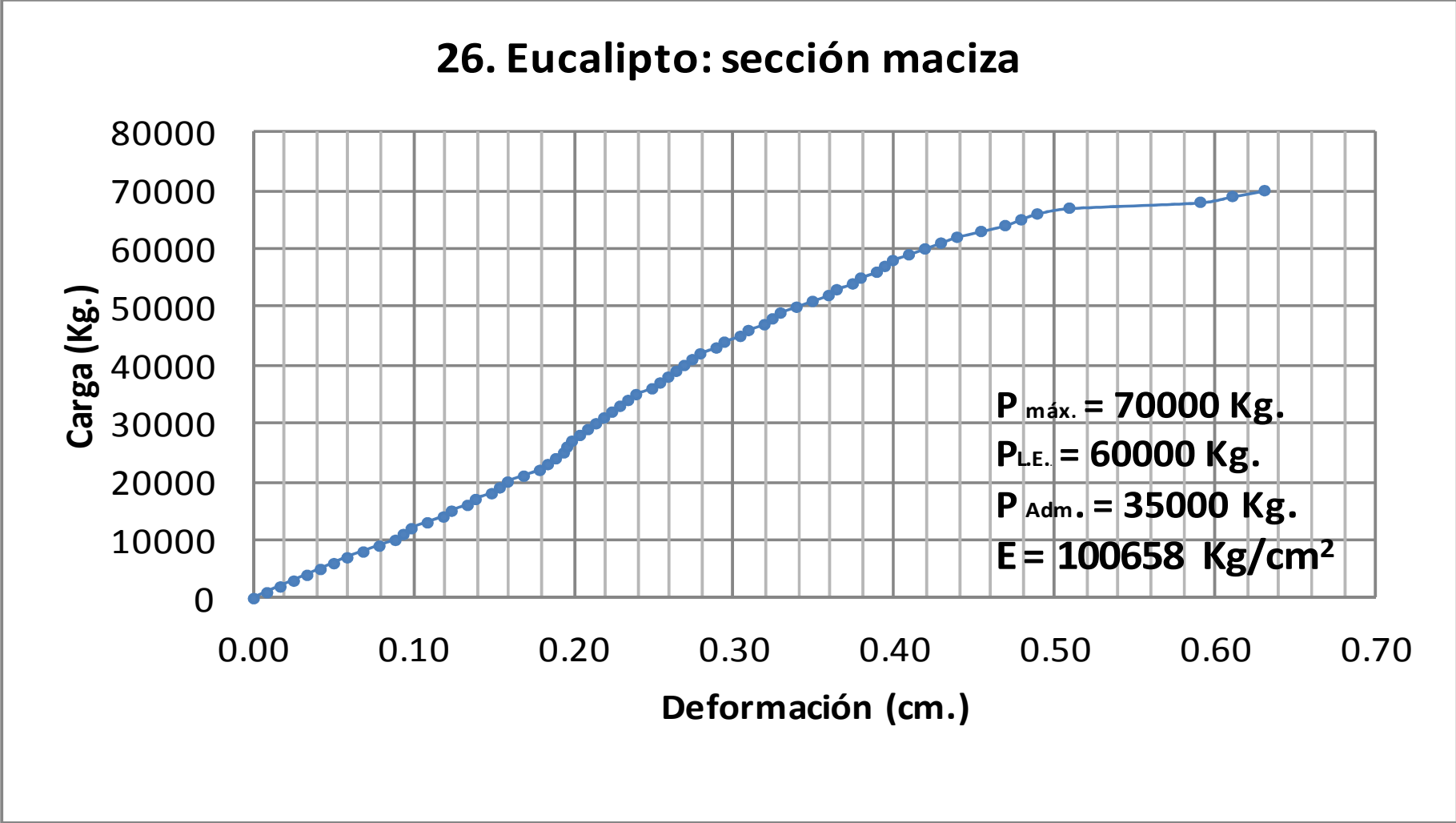
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICA 25. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 25



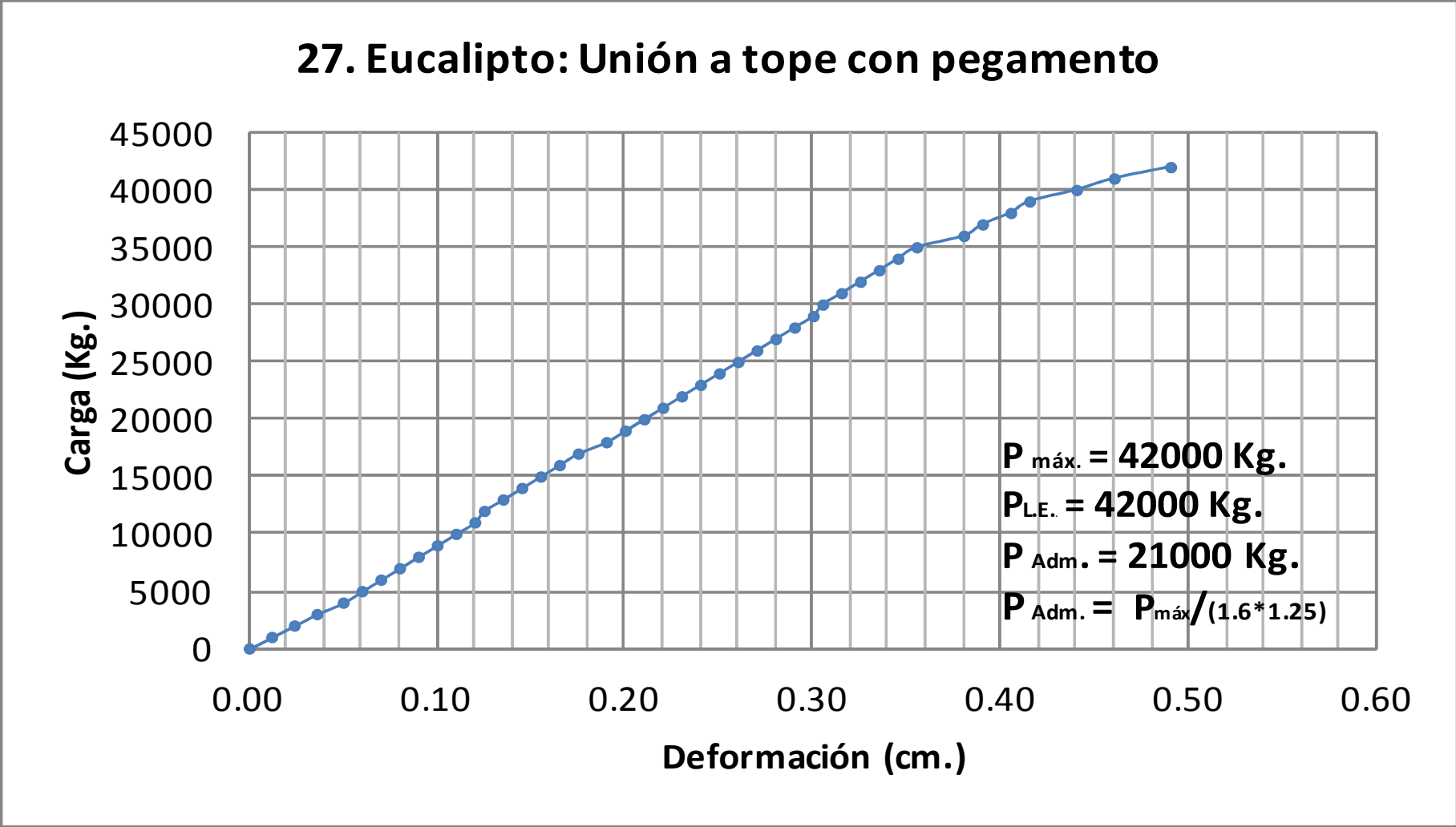
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 26. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 26



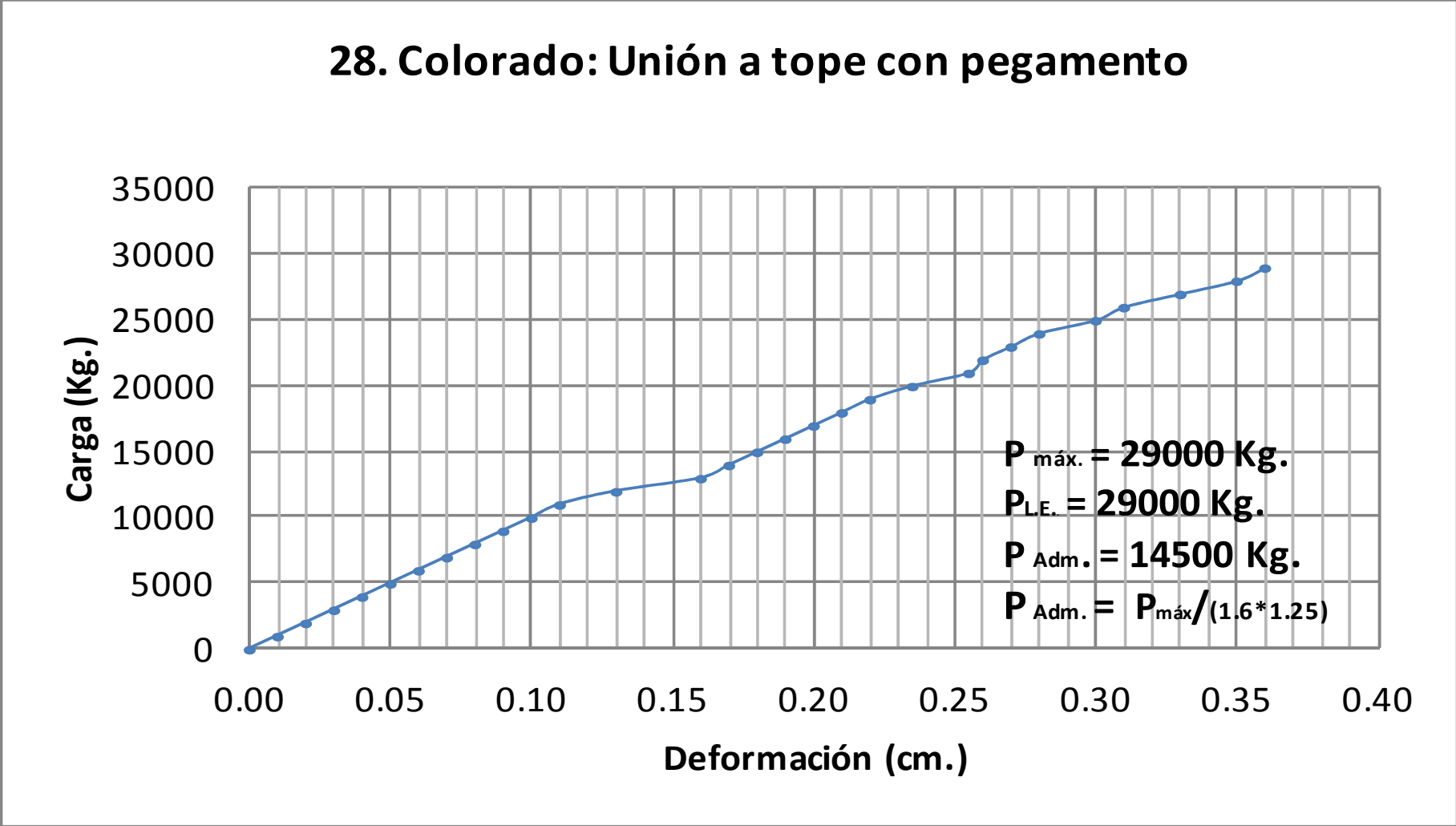
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 27. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 27



Elaborado por: Emilio Dávalos

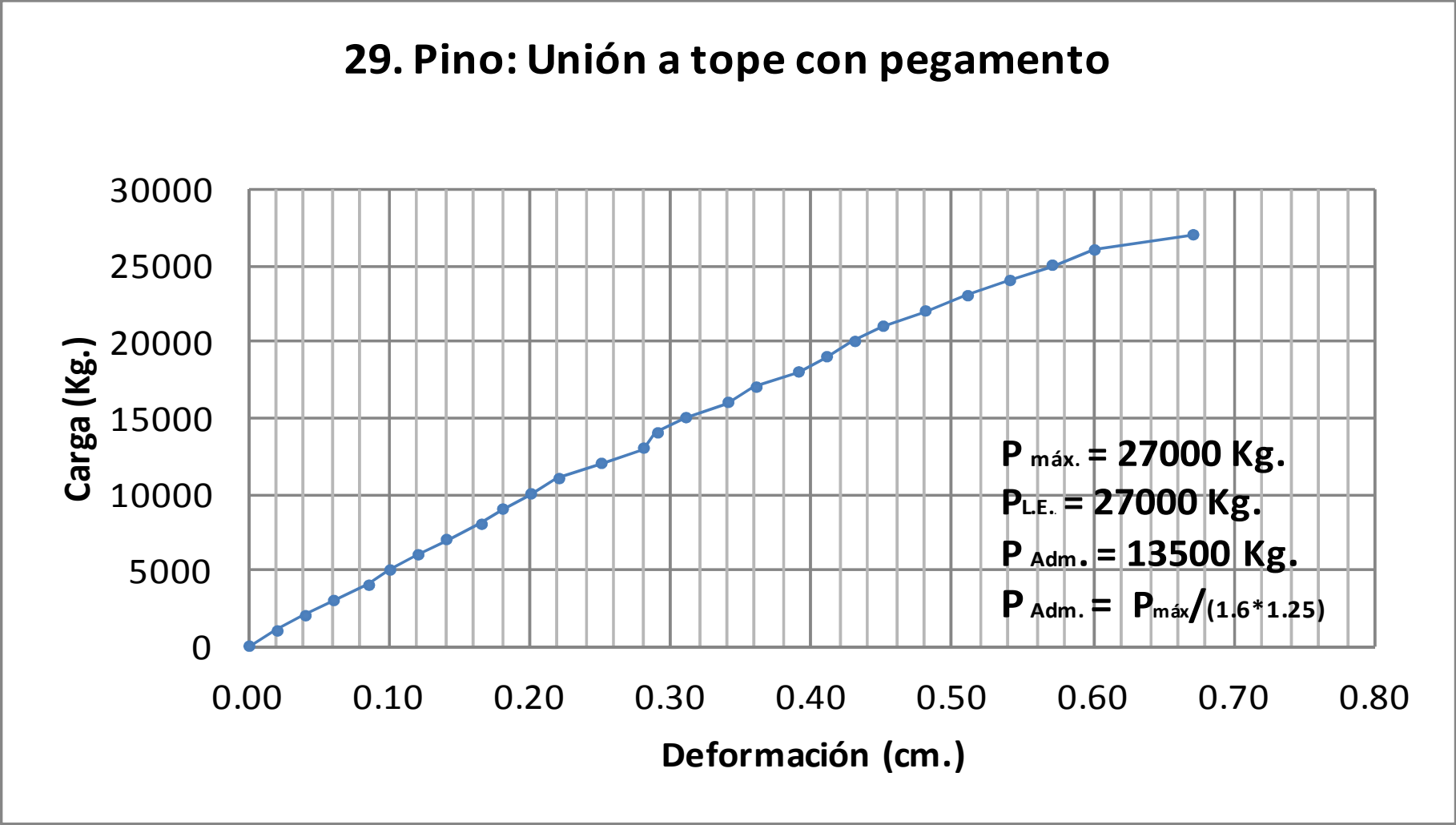
GRÁFICO 28. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 28



Elaborado por: Emilio Dávalos

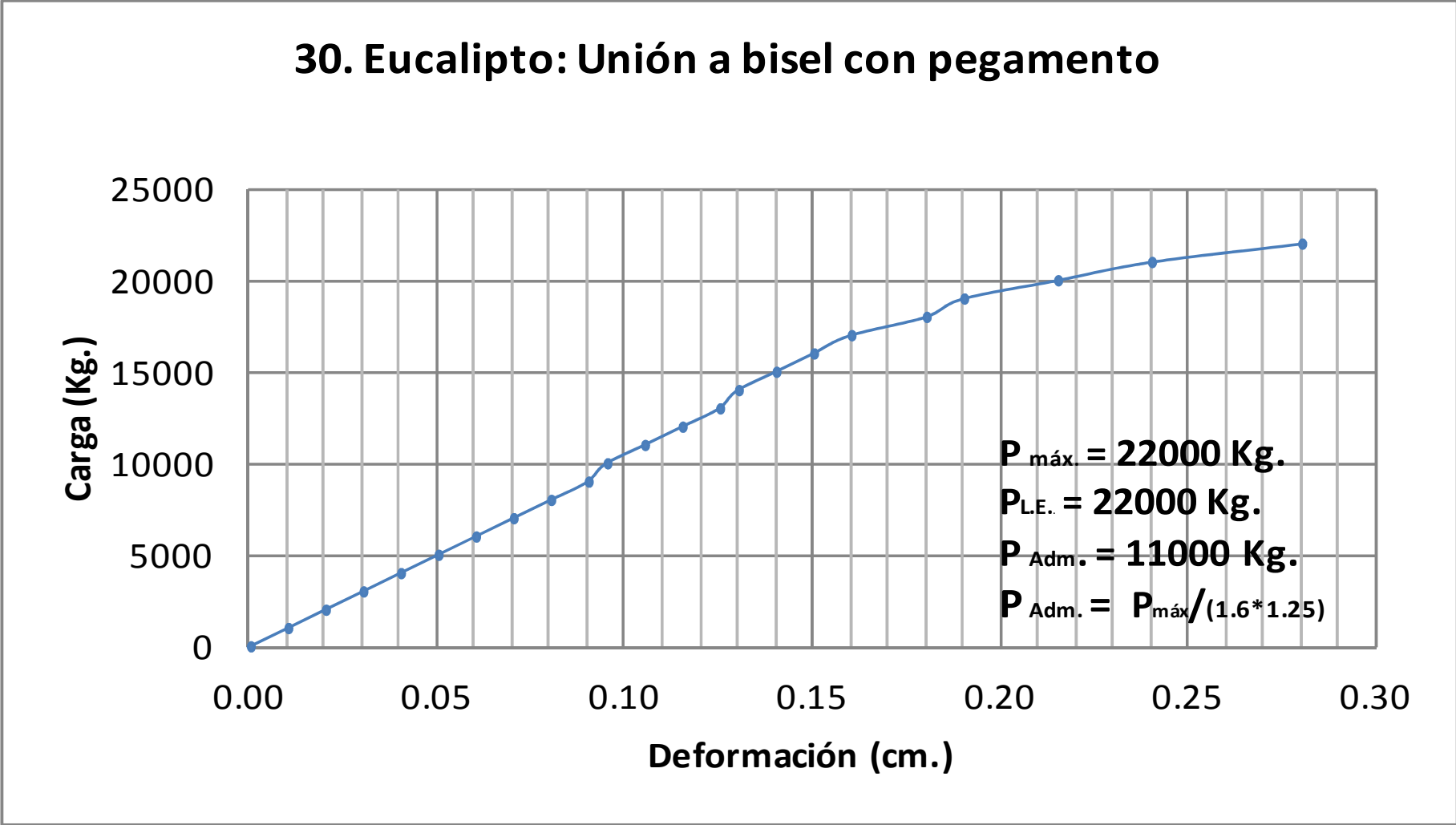


GRÁFICO 29. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 29



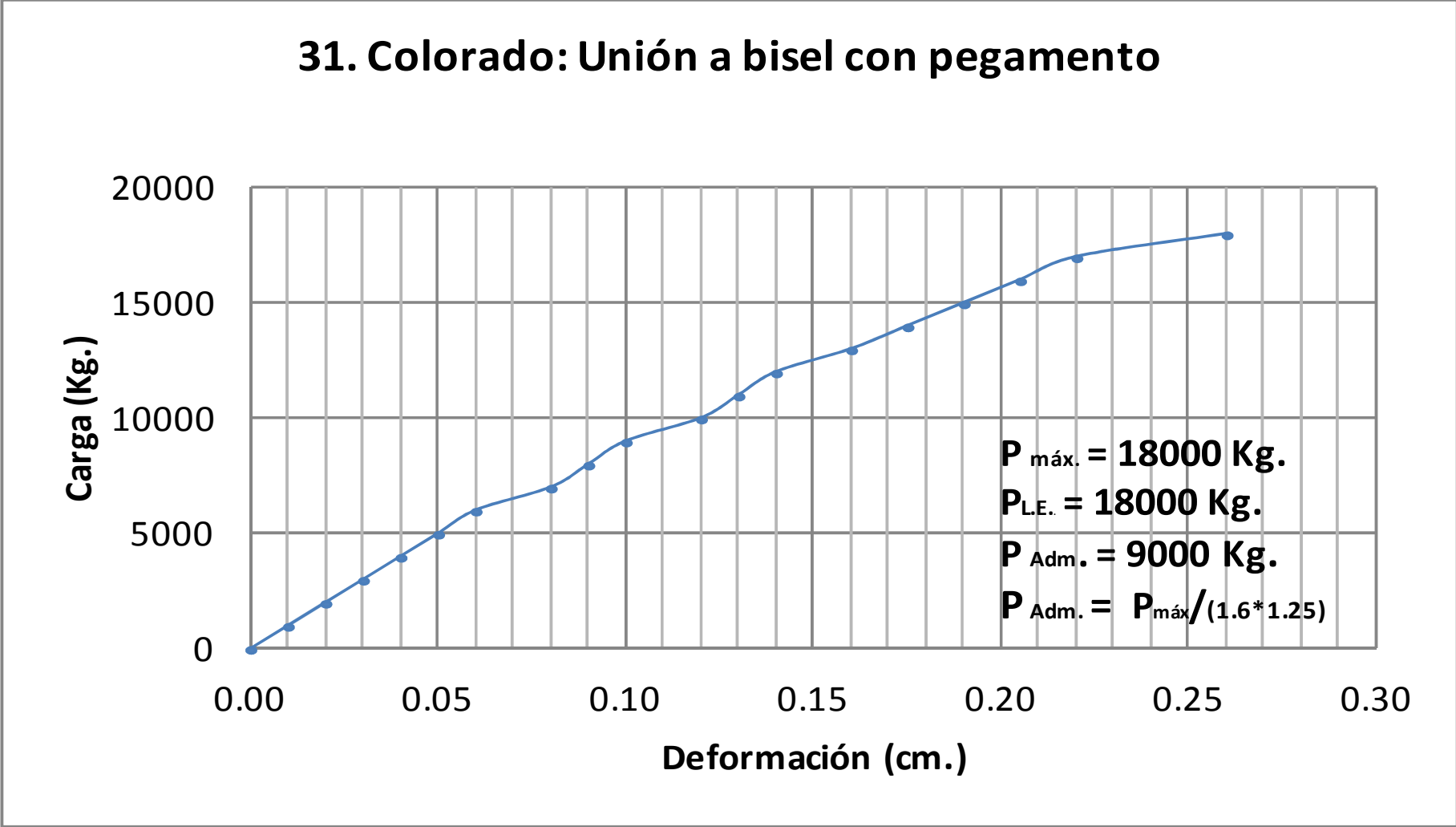
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 30. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 30



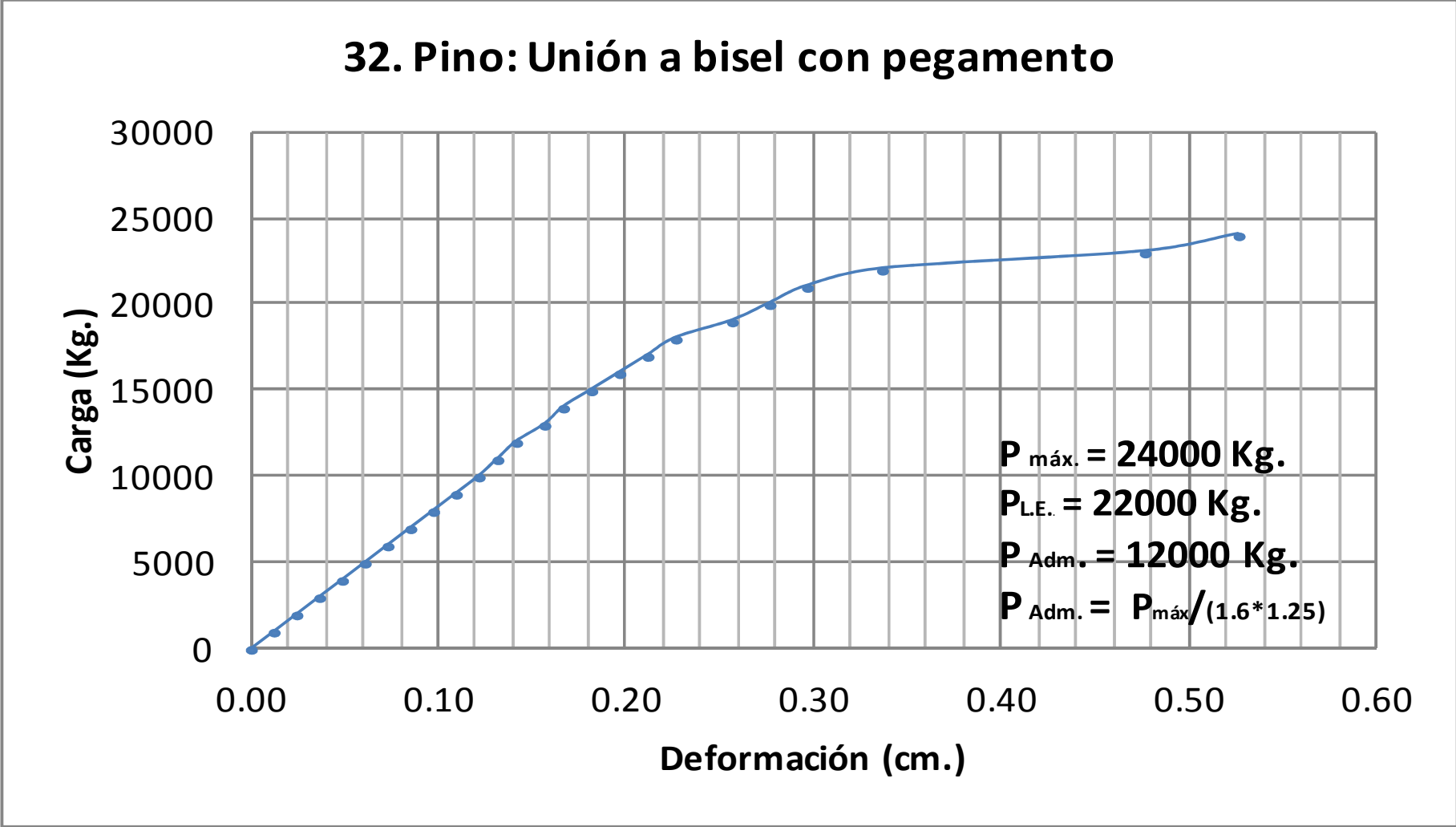
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 31. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 31



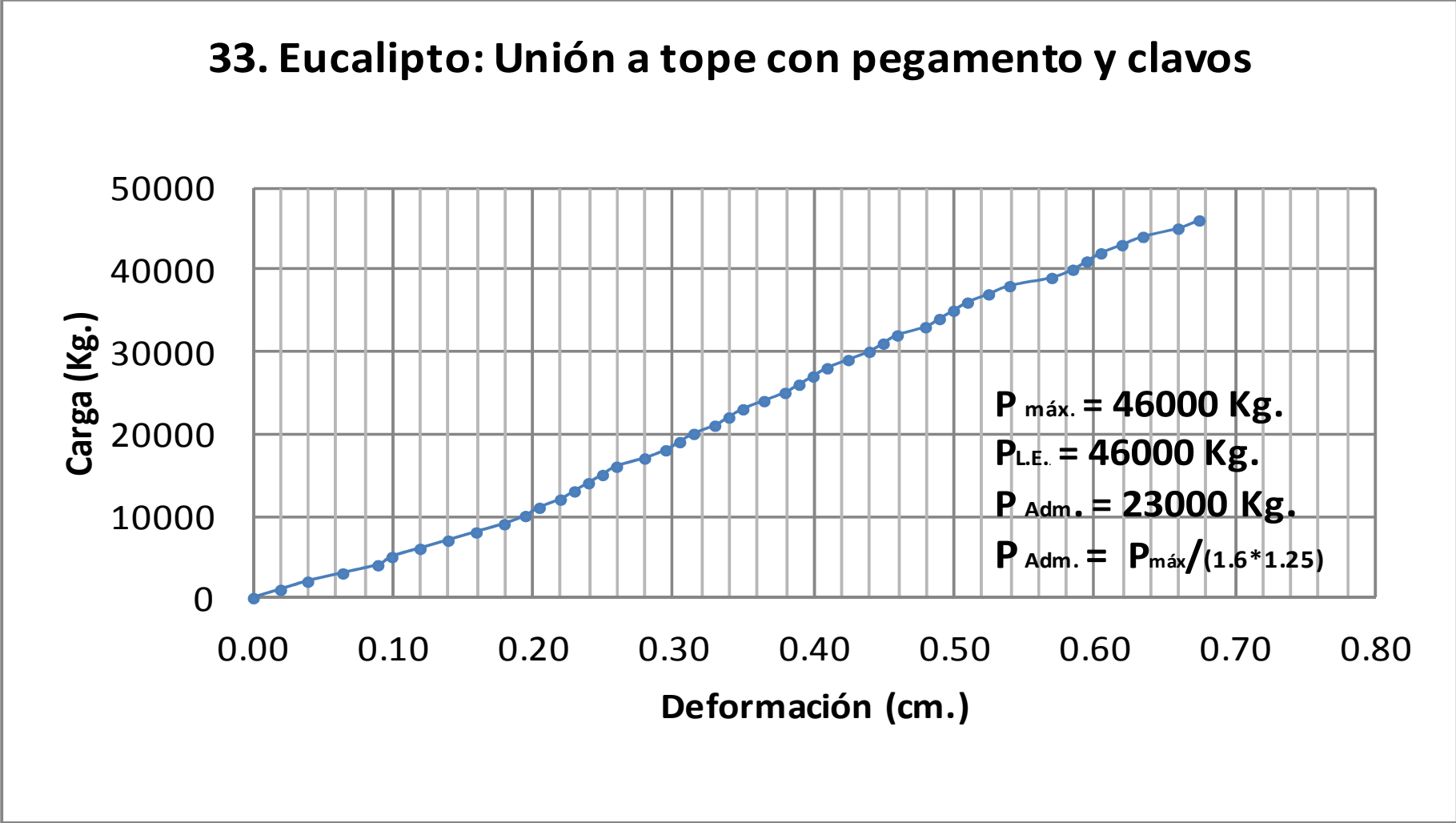
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 32. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 32



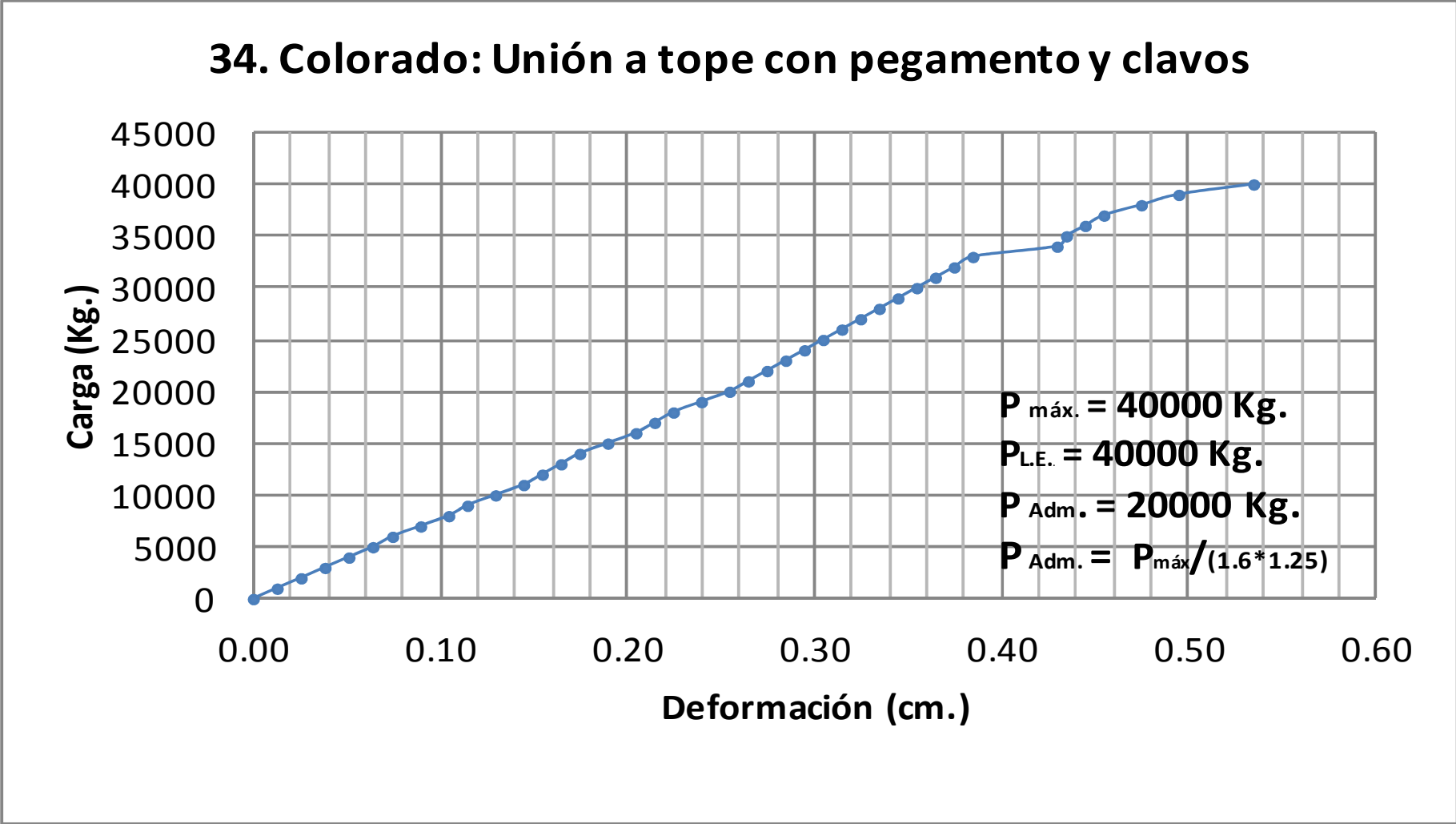
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 33. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 33



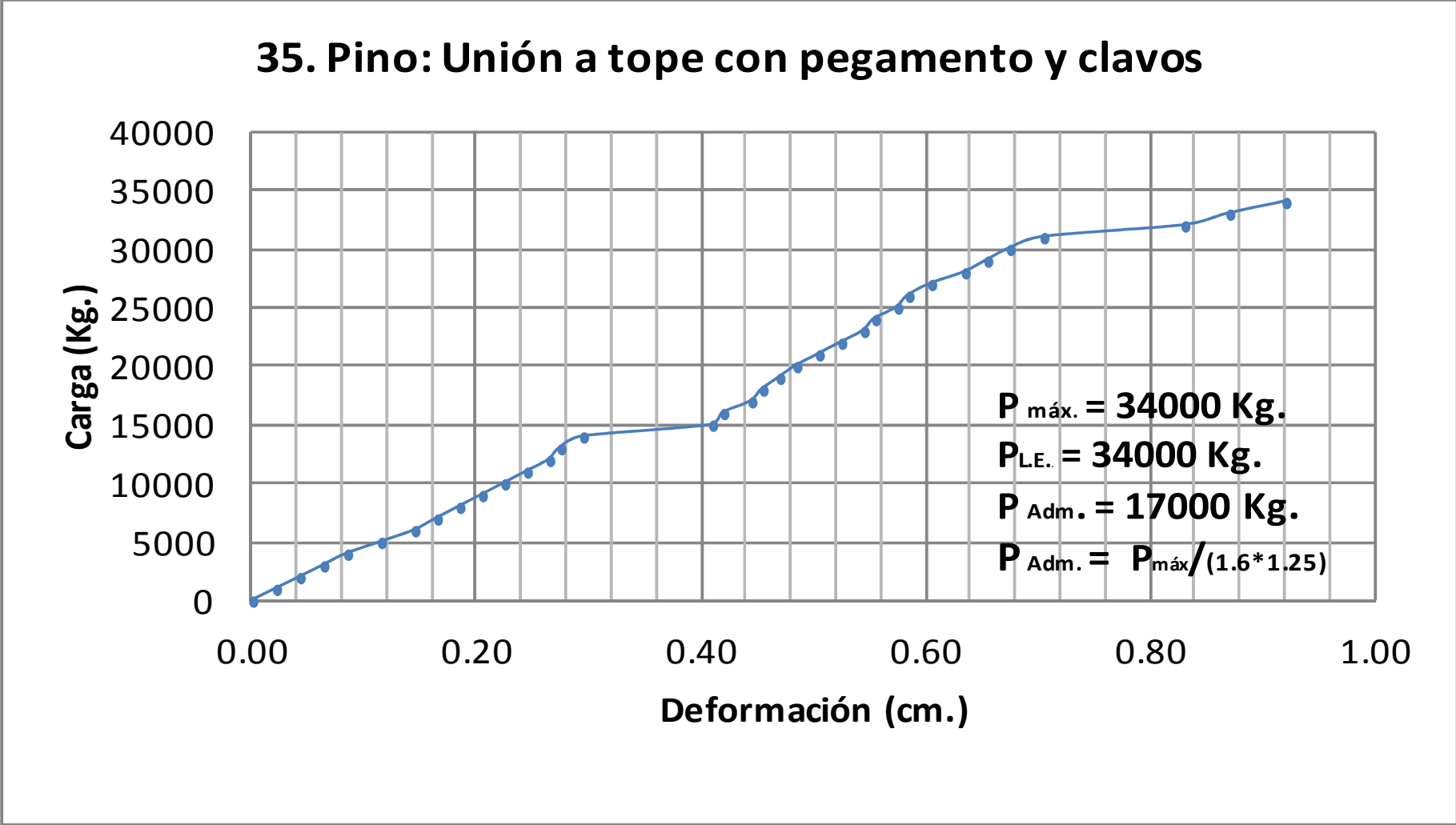
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 34. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 34



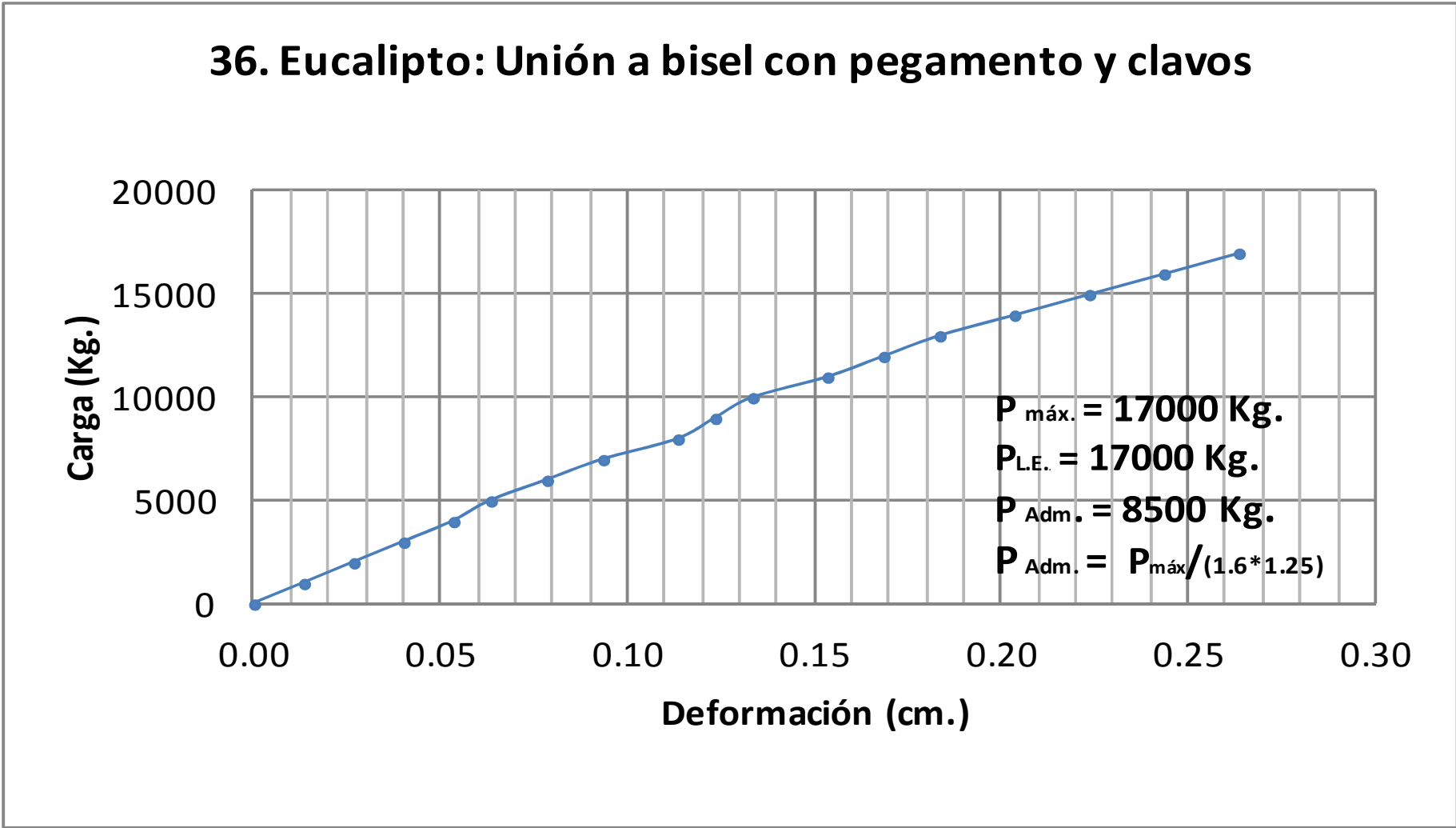
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 35. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 35



Elaborado por: Emilio Dávalos

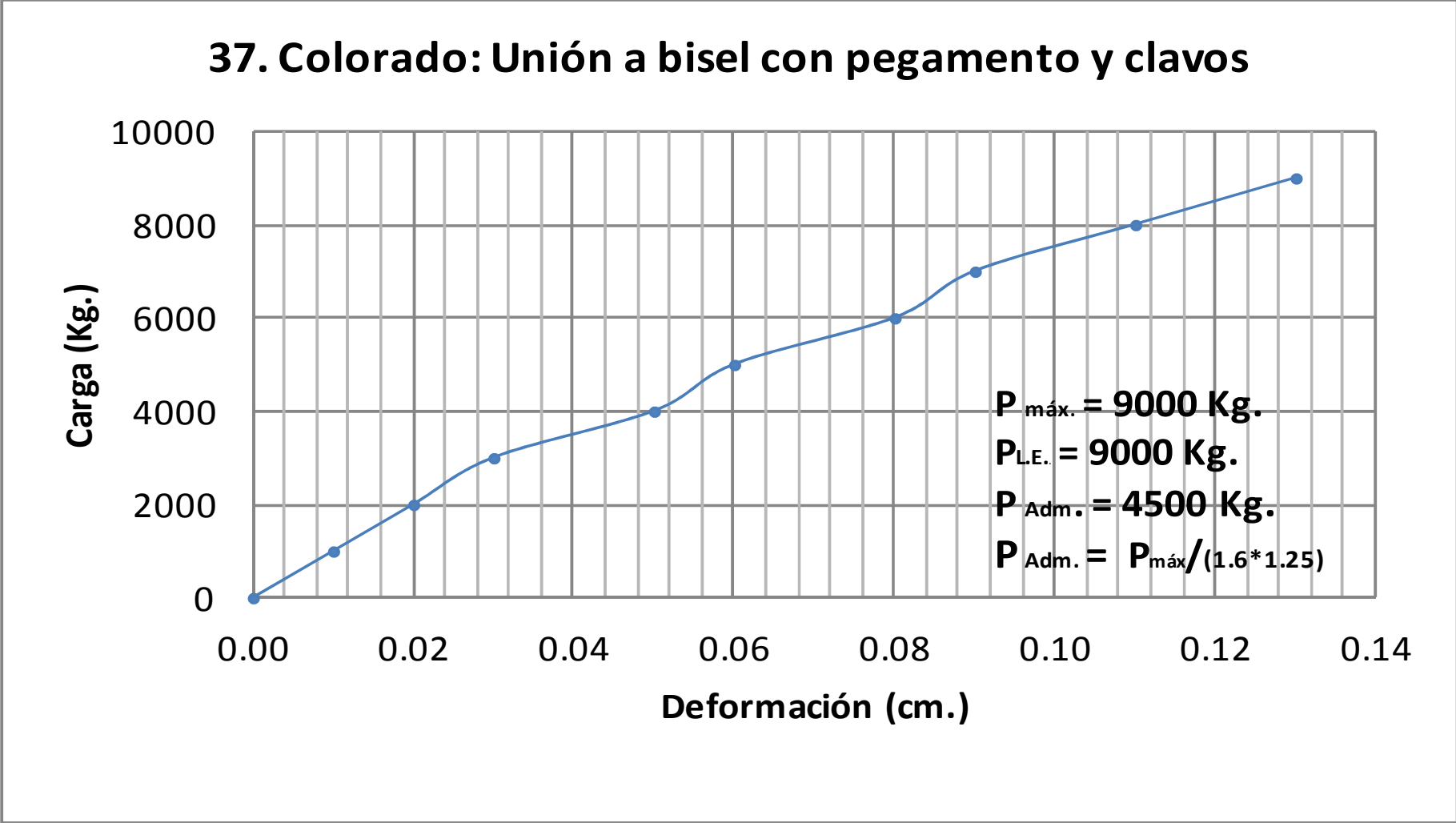
GRÁFICO 36. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 36



Elaborado por: Emilio Dávalos

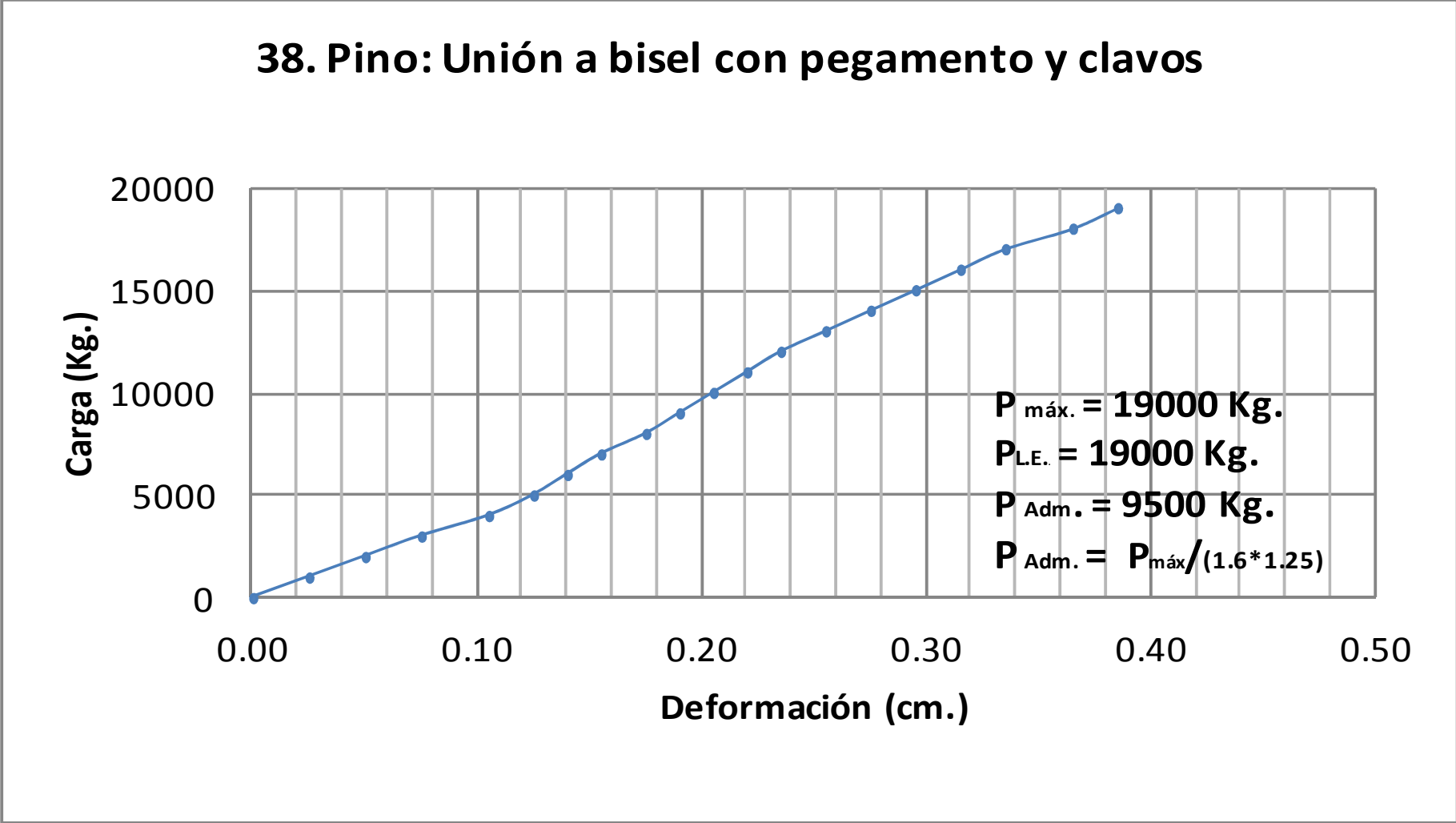


GRÁFICO 37. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 37



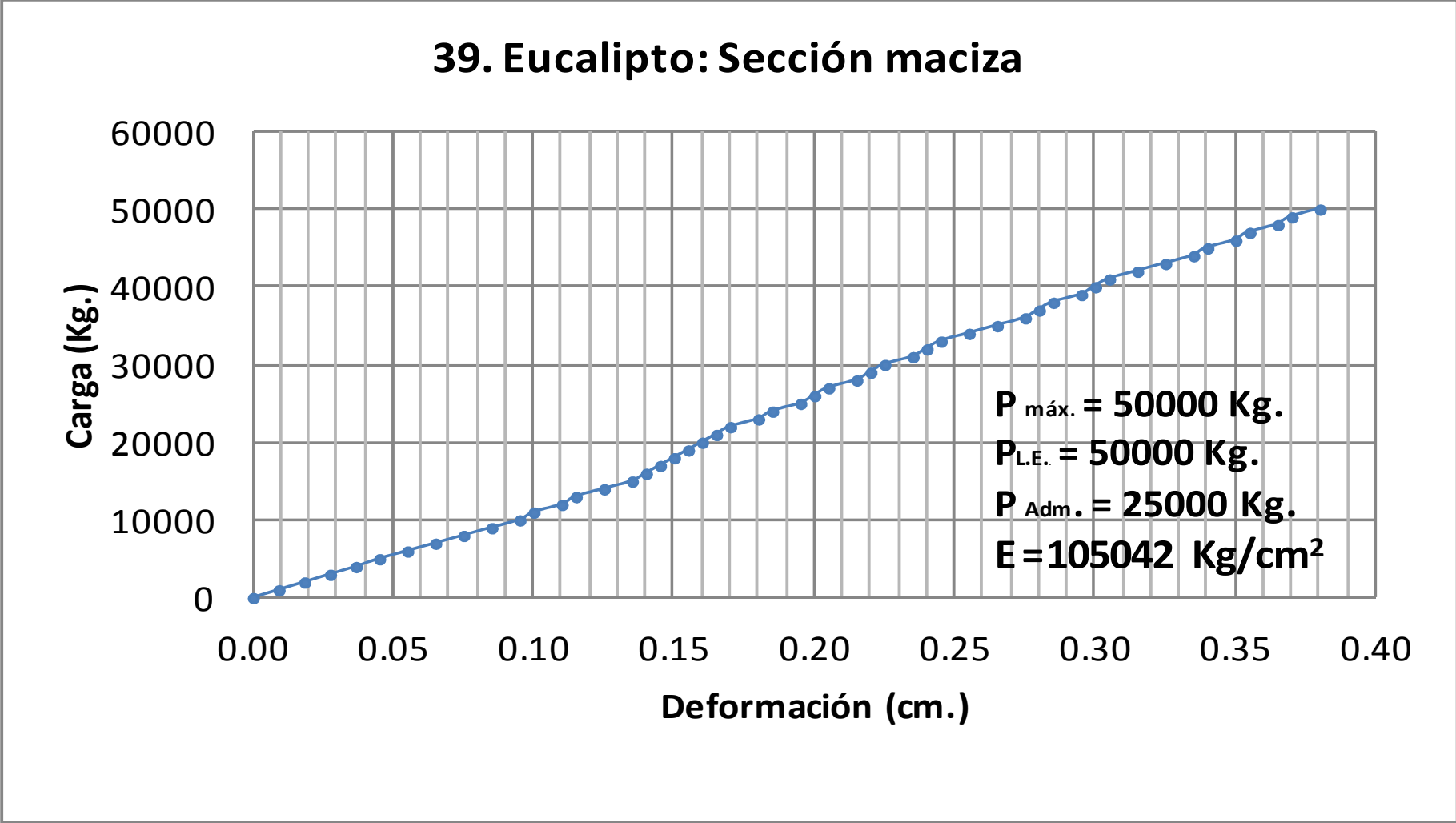
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 38. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 38



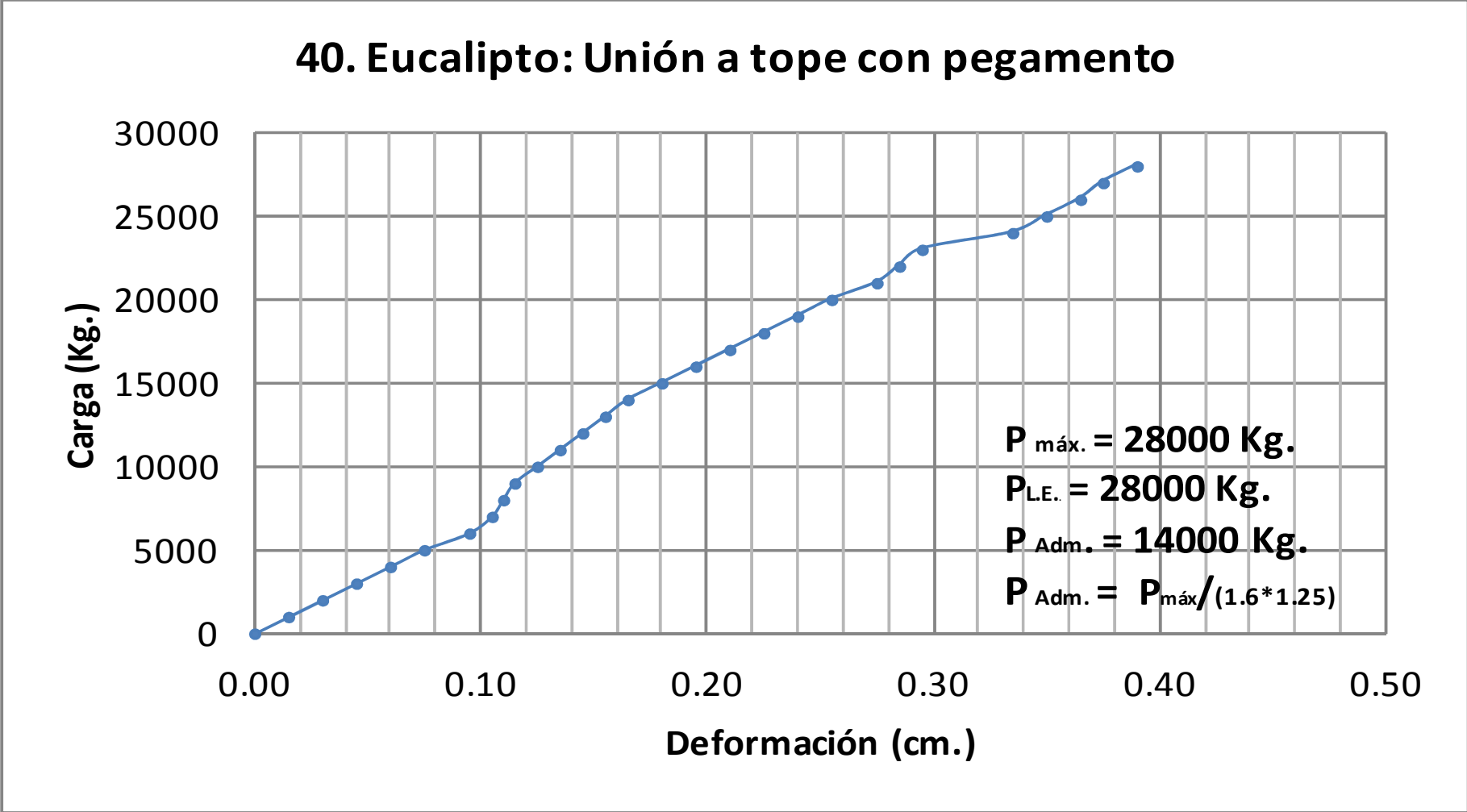
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 39. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 39



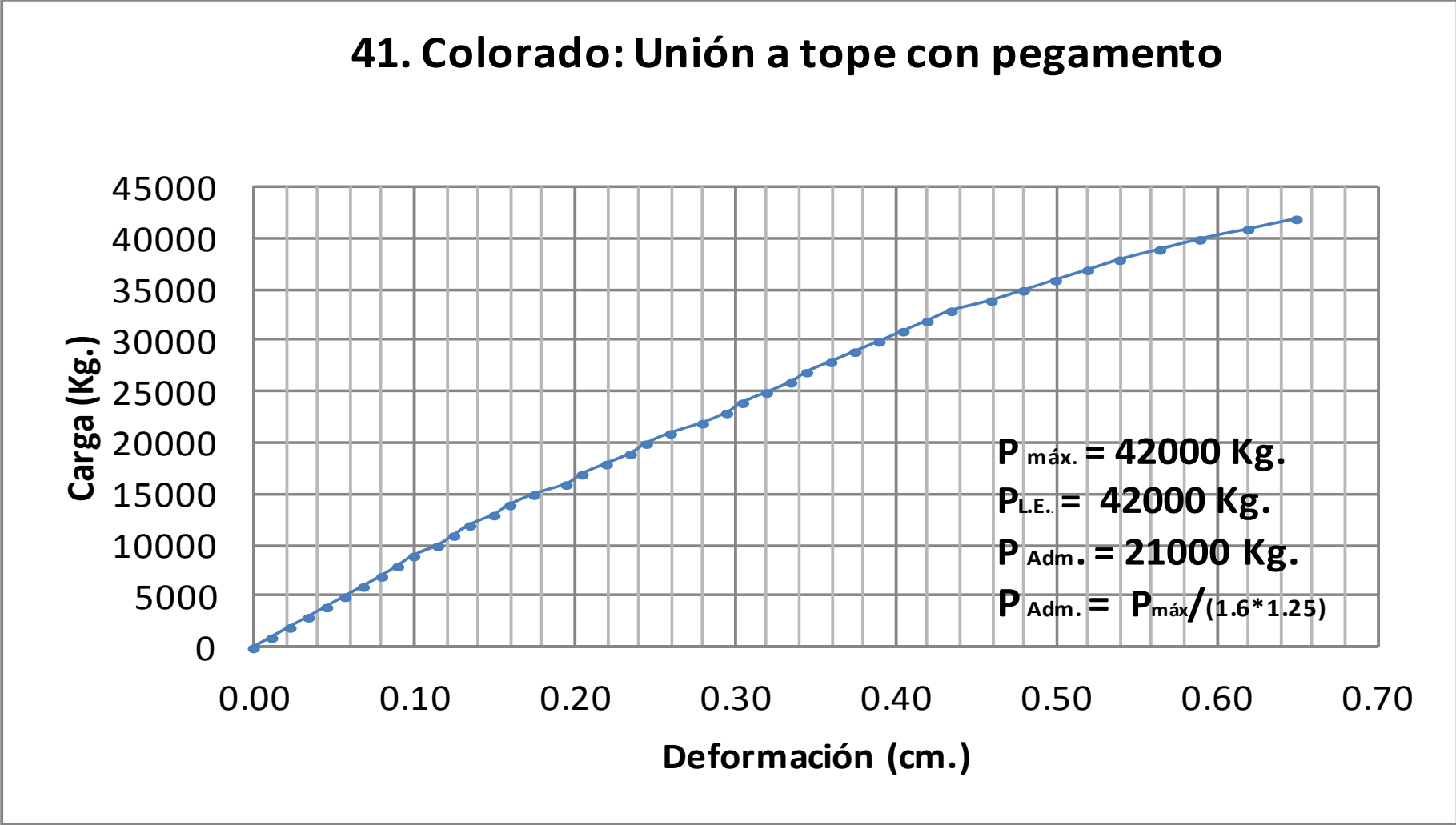
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 40. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 40



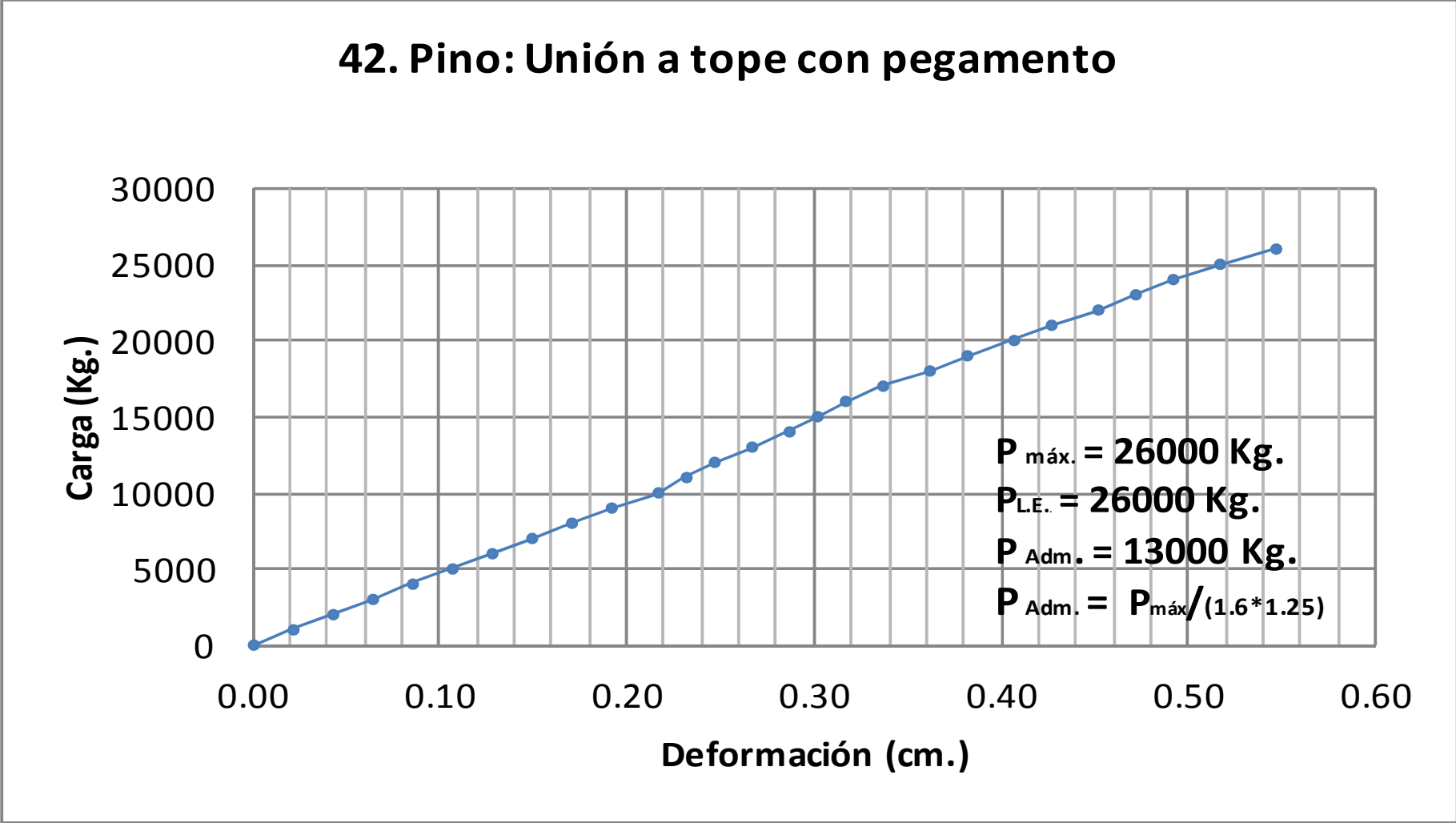
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 41. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 41



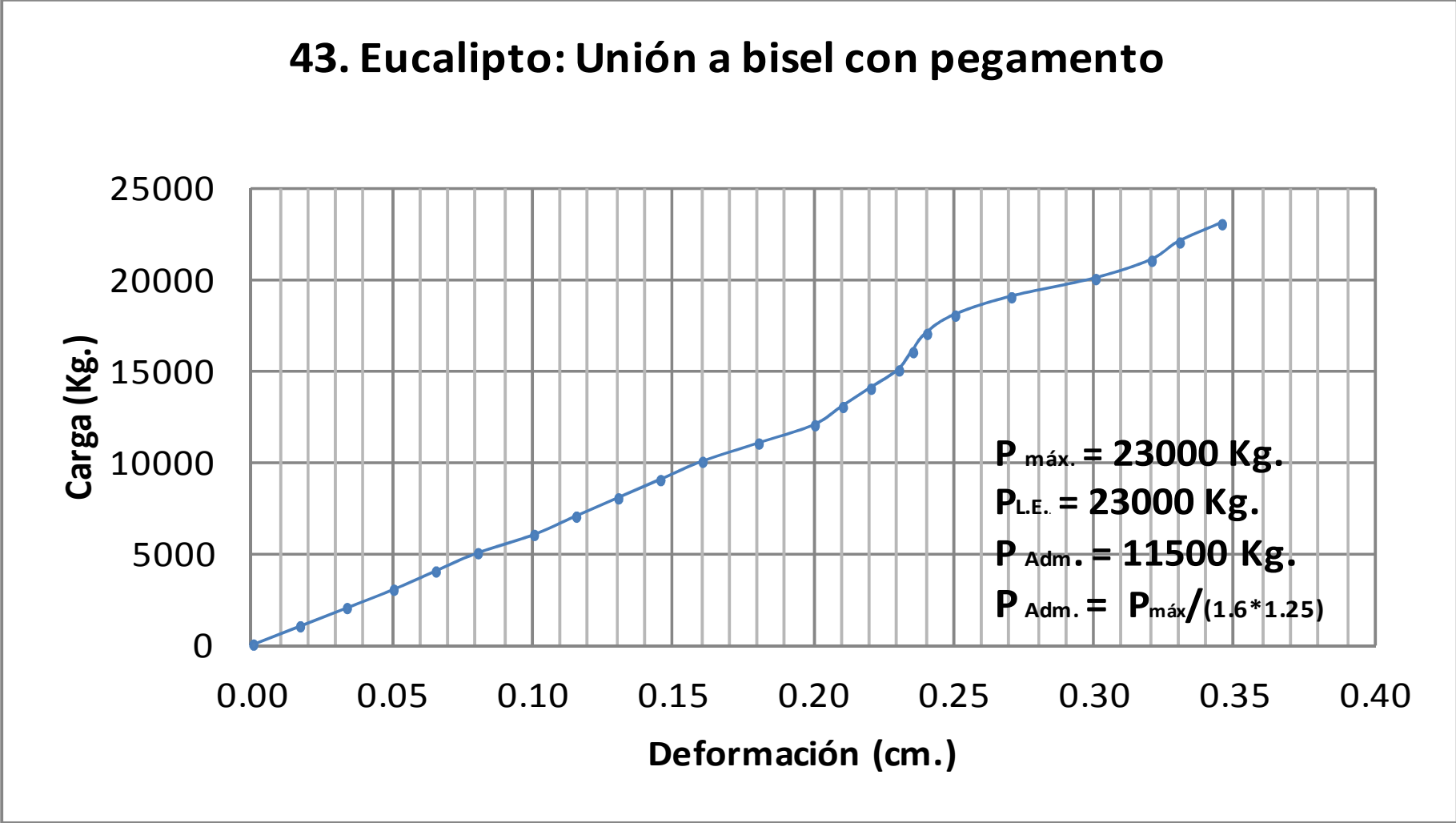
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 42. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 42



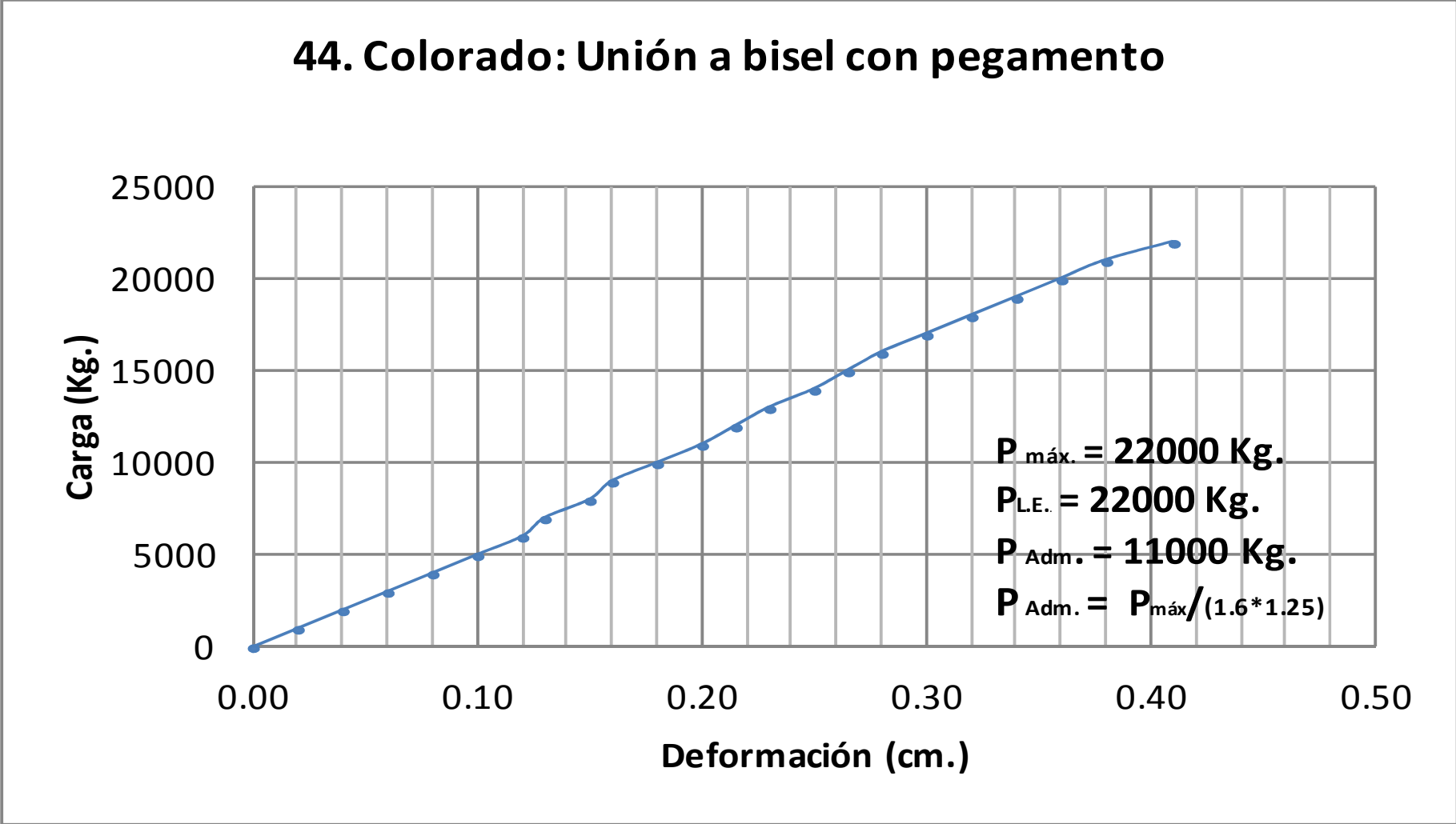
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 43. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 43



Elaborado por: Emilio Dávalos

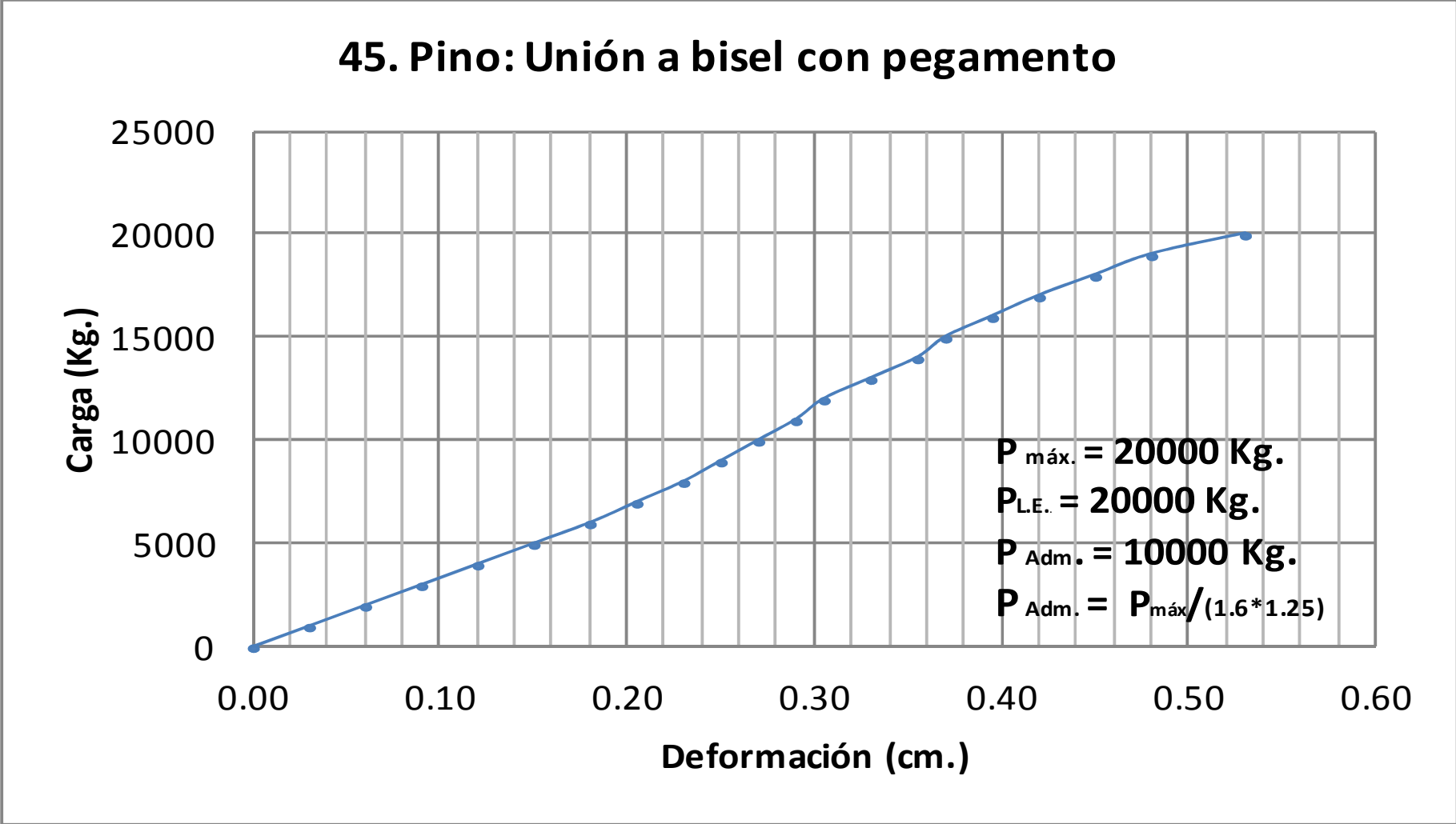
GRÁFICO 44. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 44



Elaborado por: Emilio Dávalos

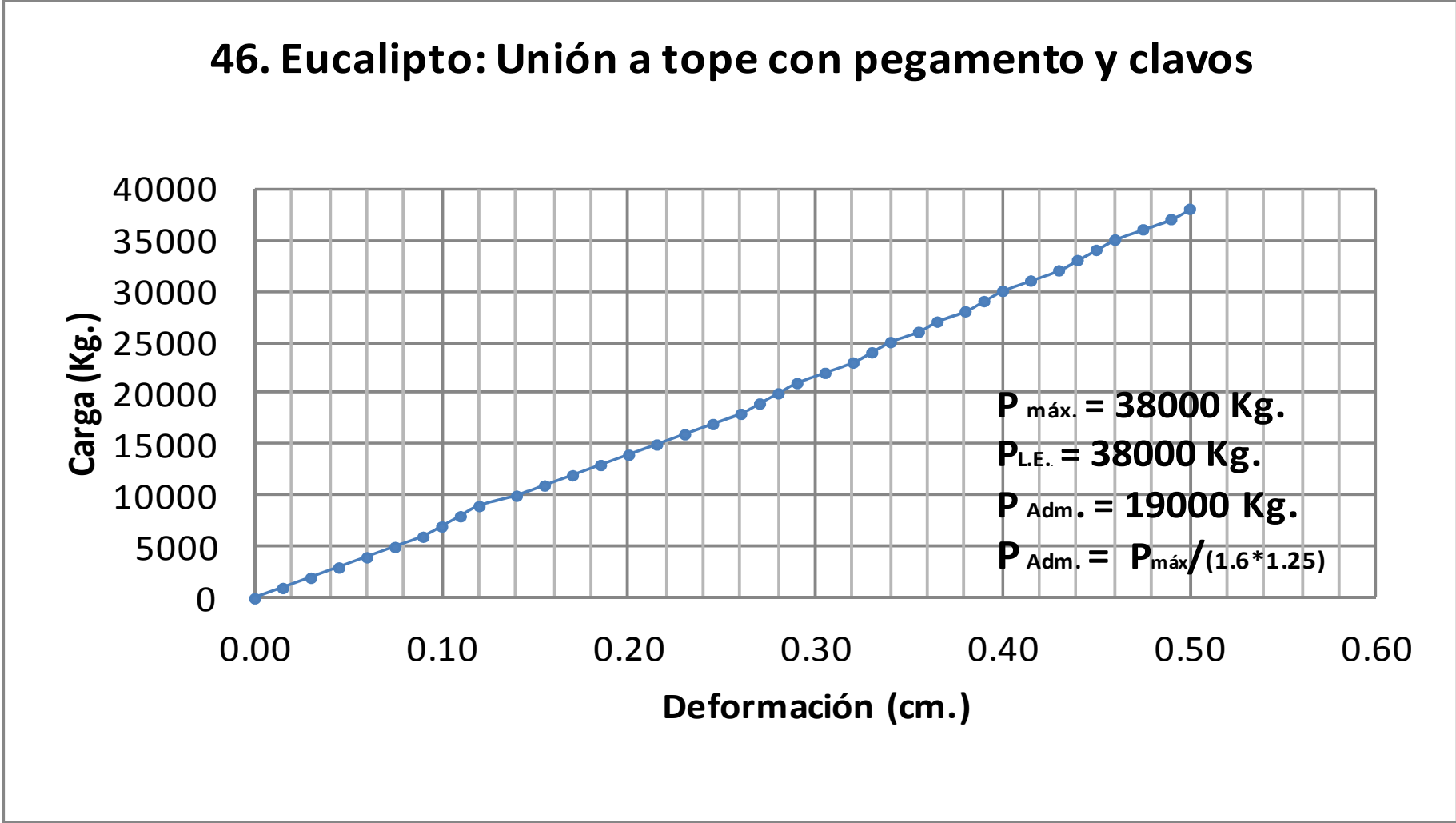


GRÁFICO 45. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 45.



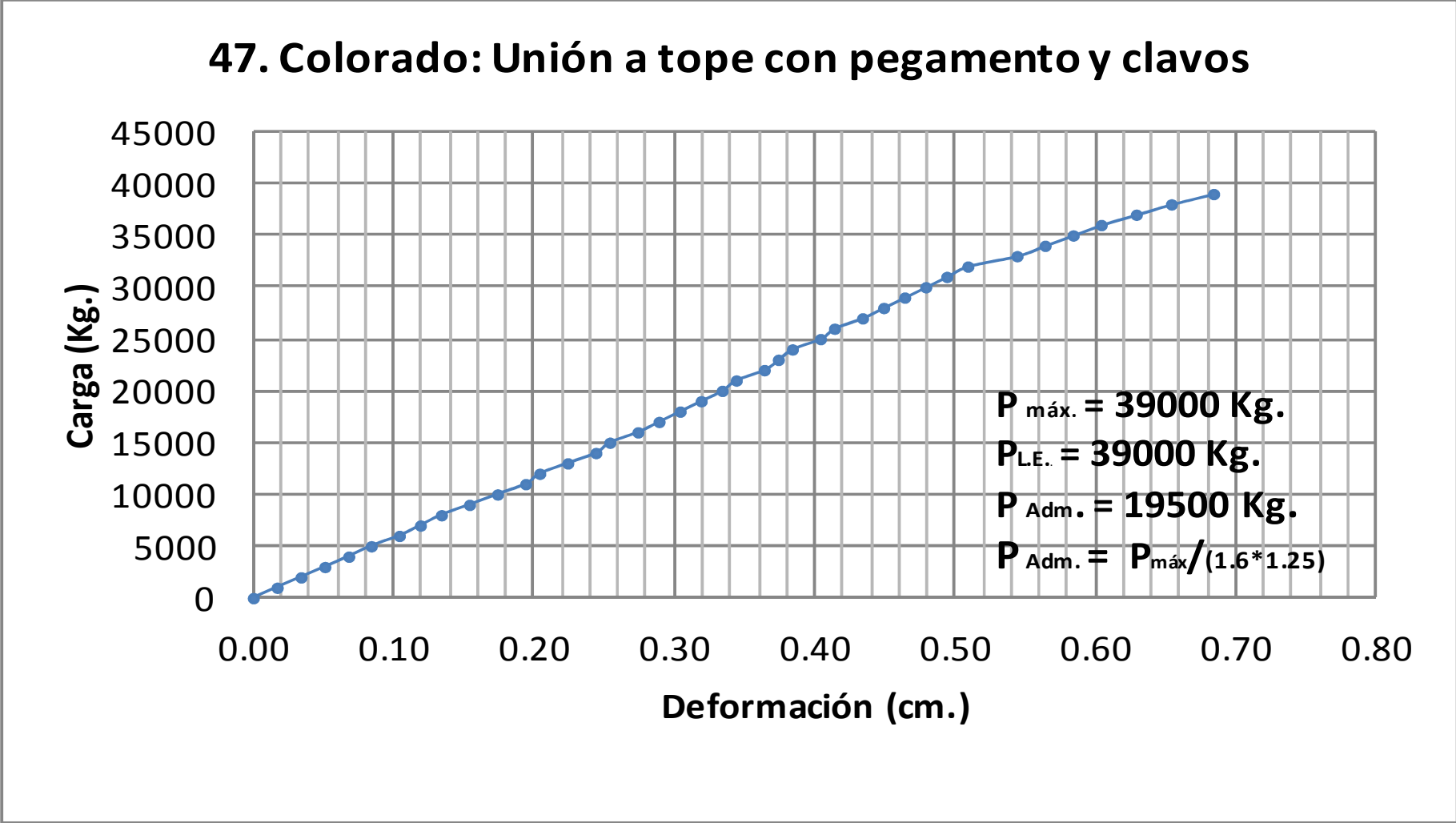
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICA 46. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 46



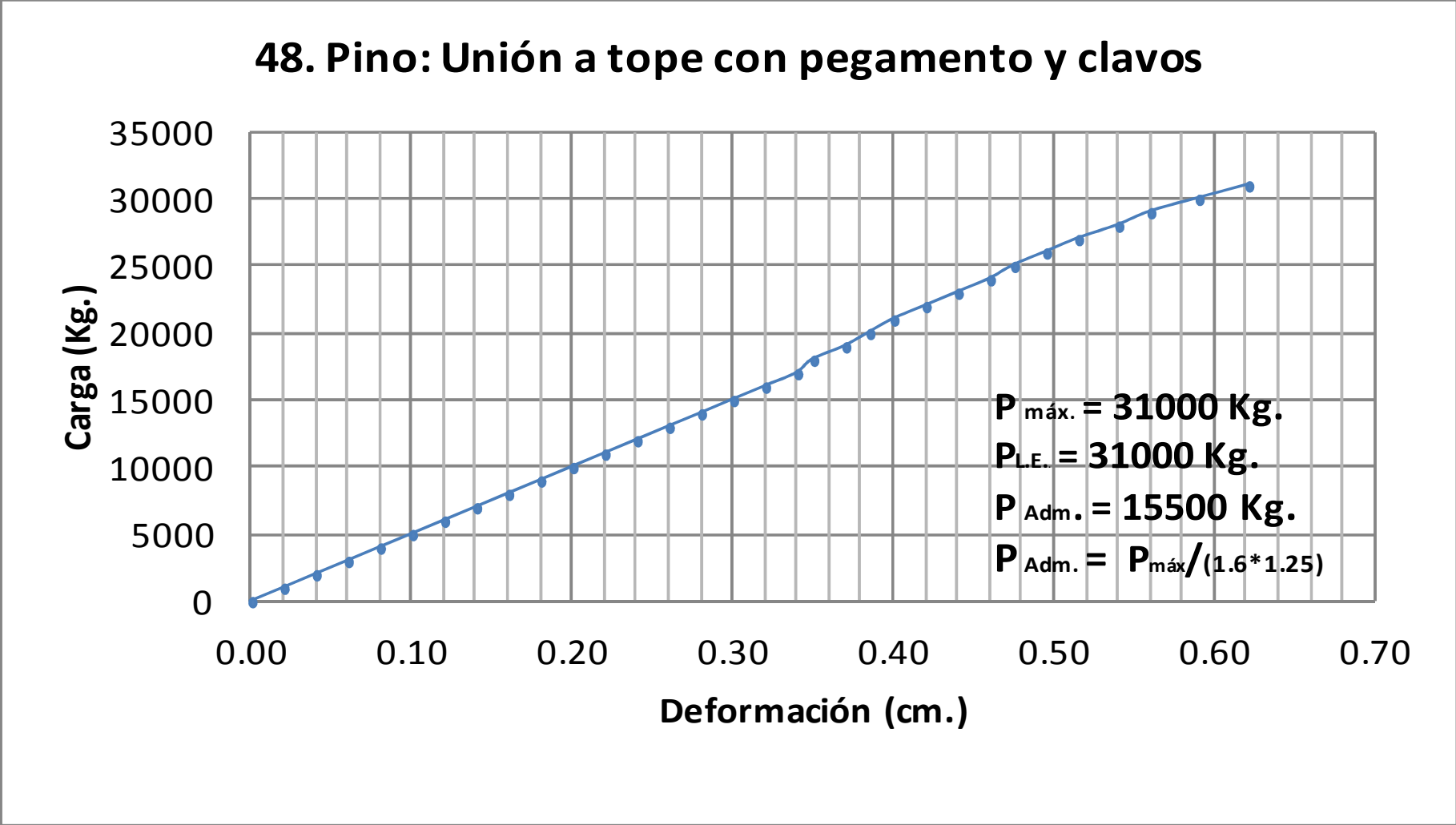
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICA 47. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 47



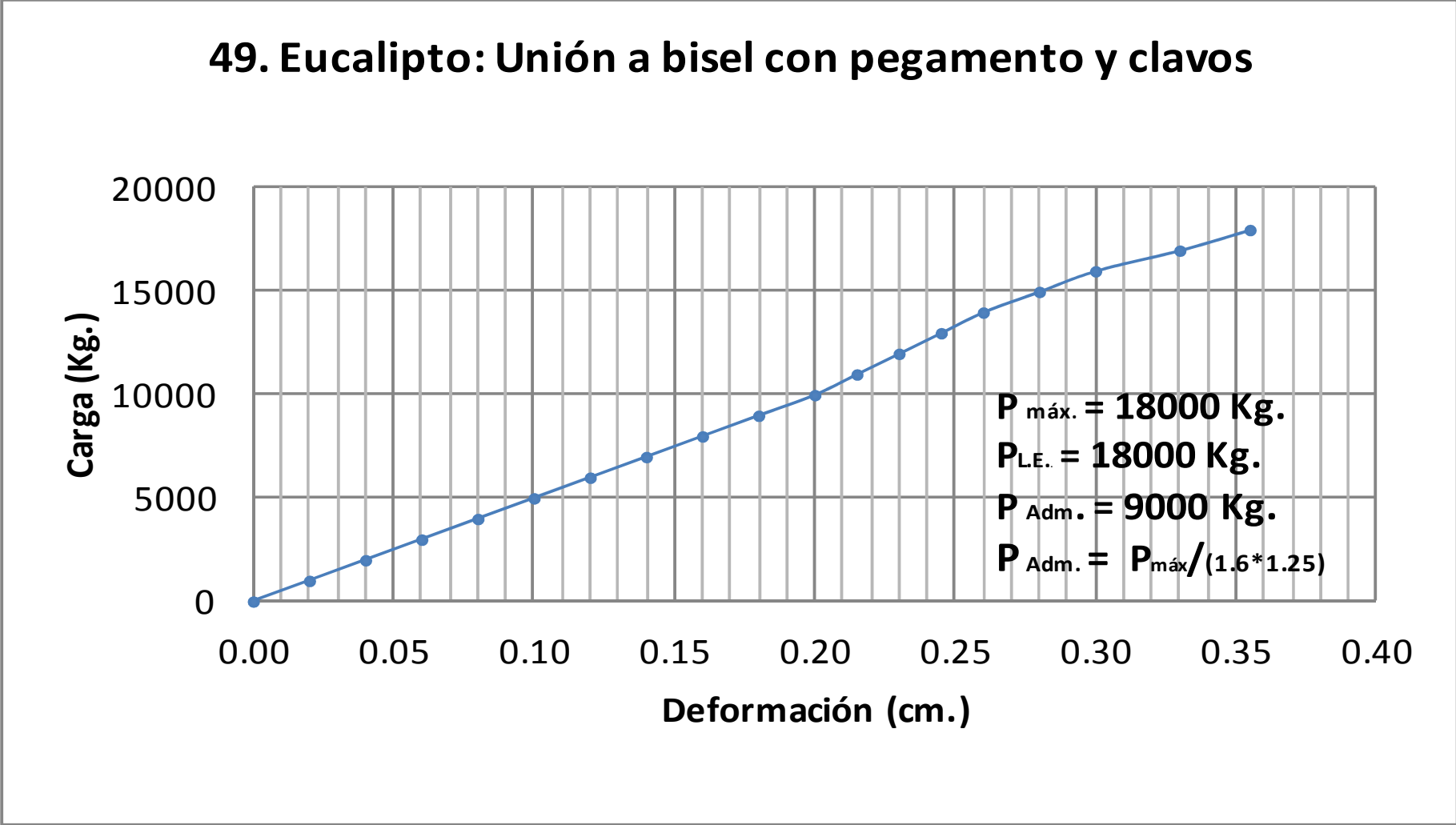
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICA 48. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 48



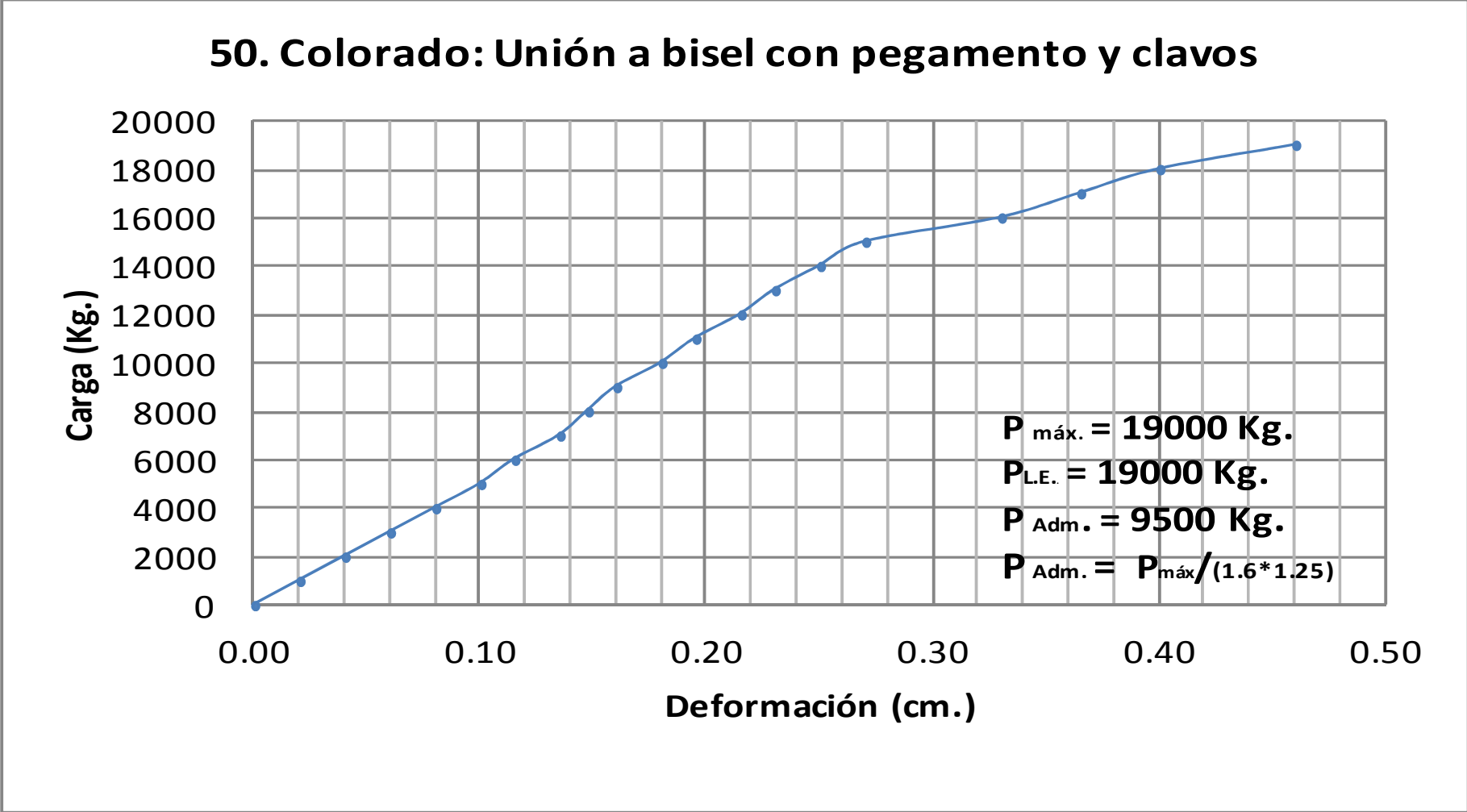
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICA 49. Curva esfuerzo - deformación, probeta N° 49



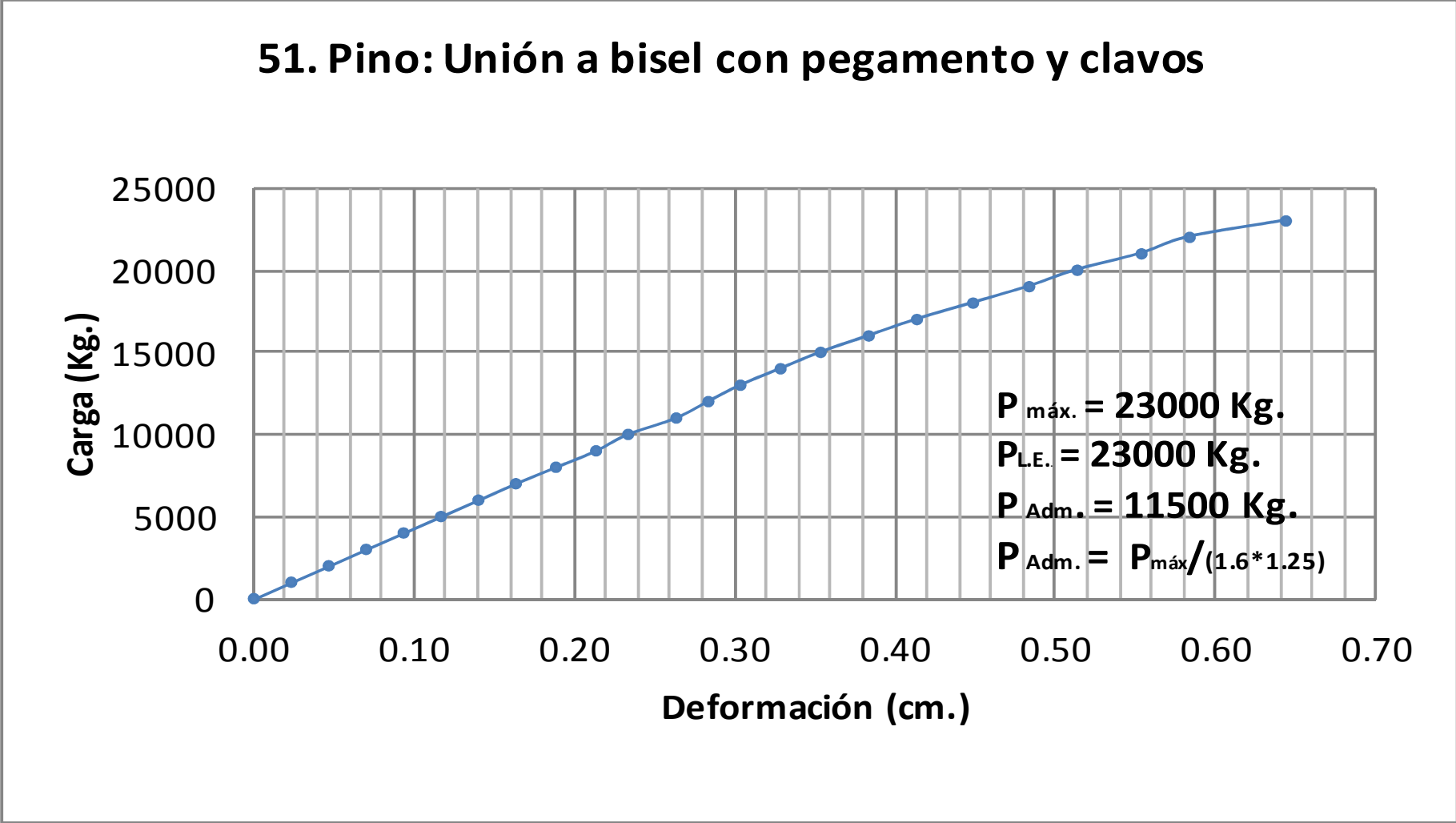
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICA 50. Curva esfuerzo - deformación, probeta N° 50



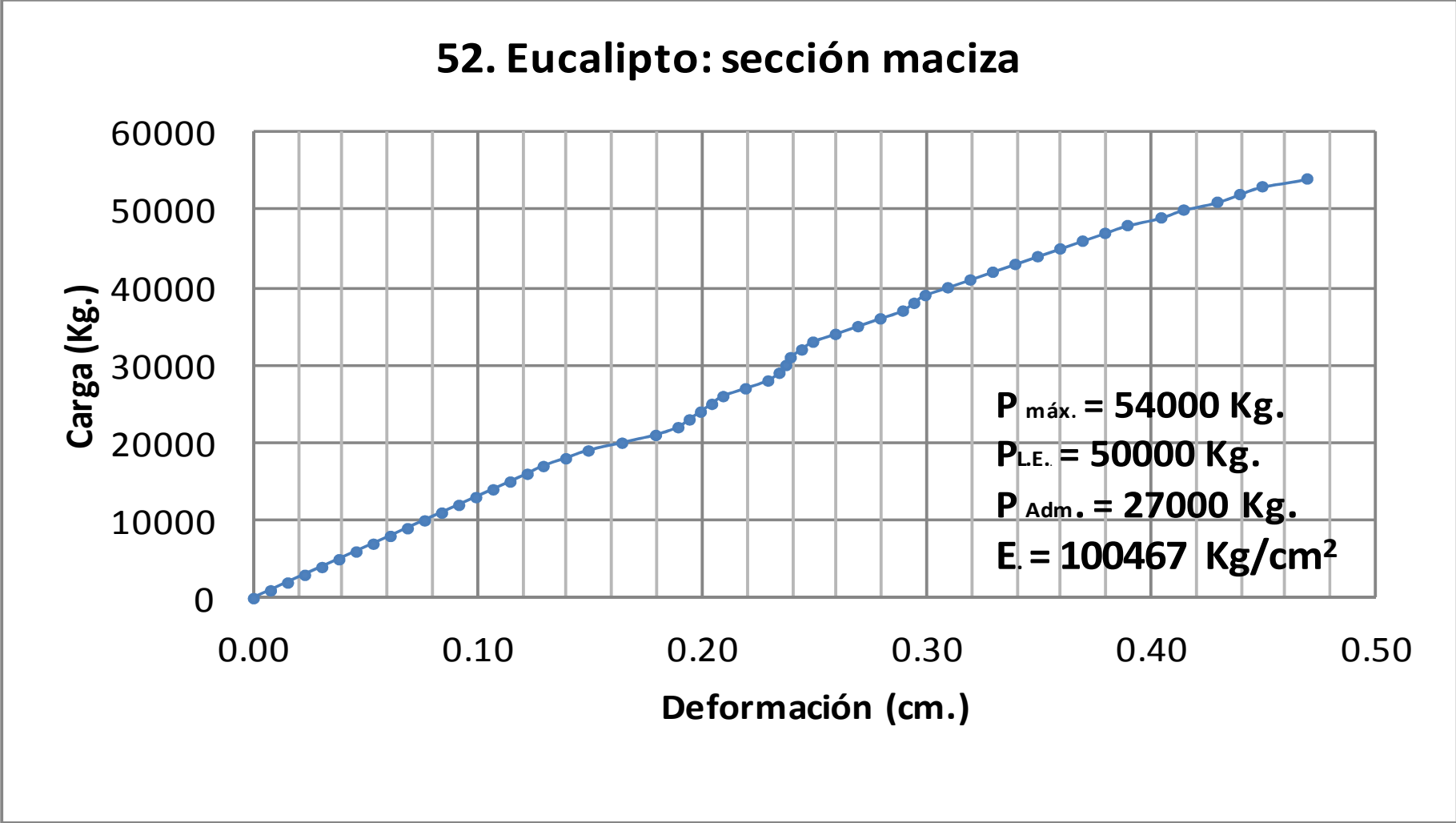
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICA 51. Curva esfuerzo - deformación, probeta N° 51



Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICA 52. Curva esfuerzo - deformación: Probeta N° 52

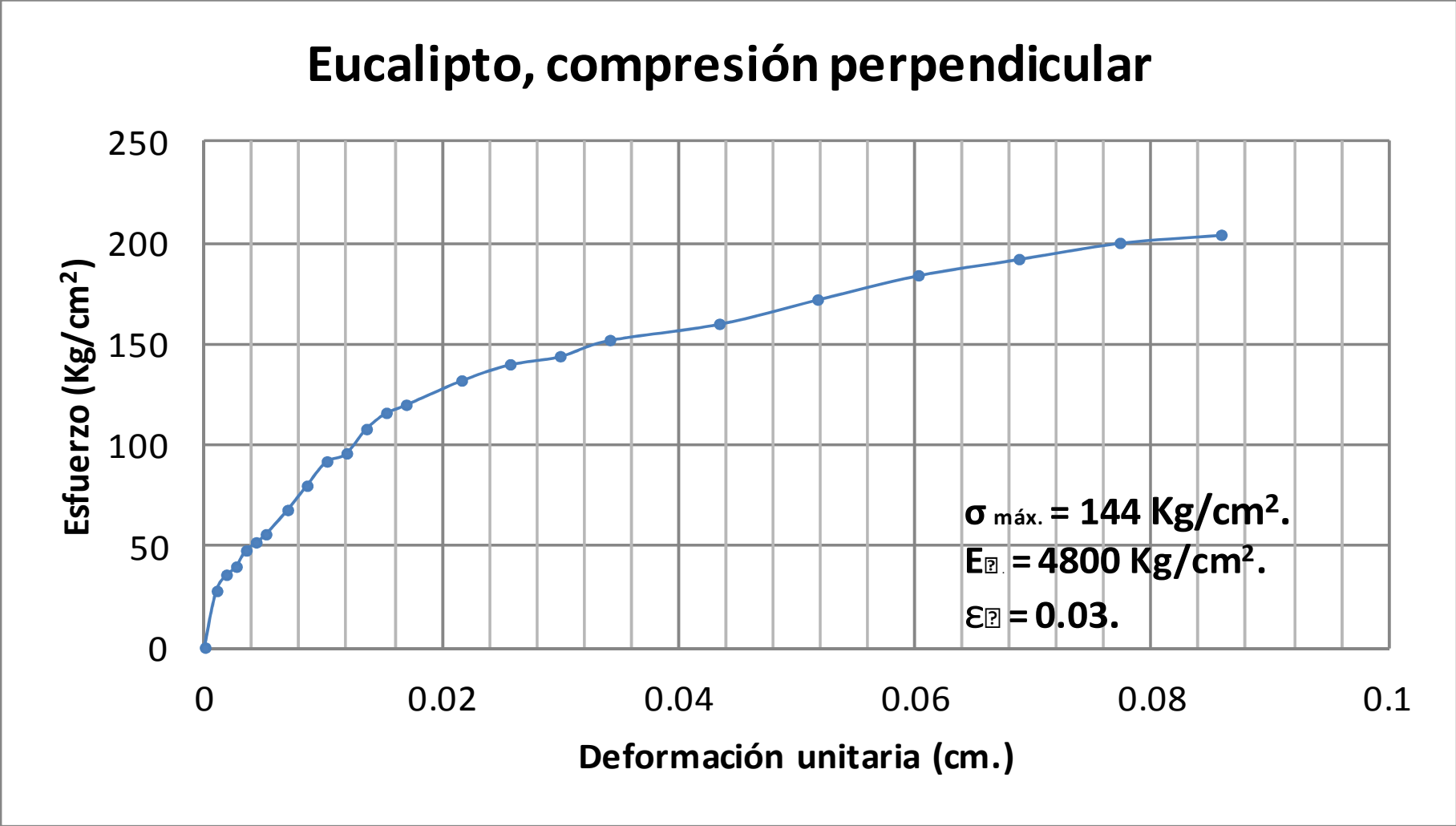


Elaborado por: Emilio Dávalos



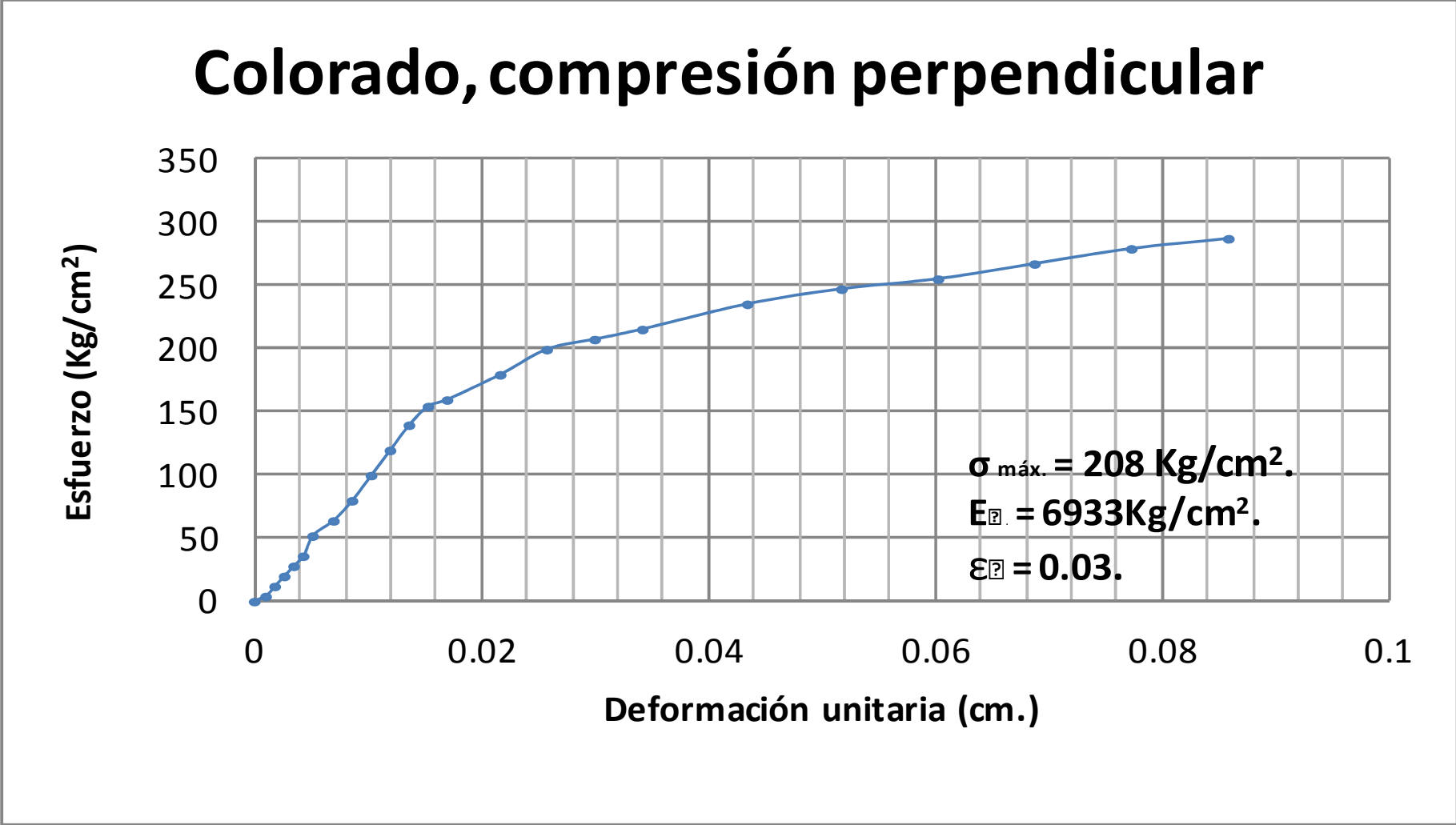
**ANEXON<sub>o</sub>2**  
**CURVAS CARGA DEFORMACIÓN: COMPRESIÓN**

GRÁFICO 53. Curva esfuerzo - deformación:Eucalipto, compresión perpendicular a la fibra



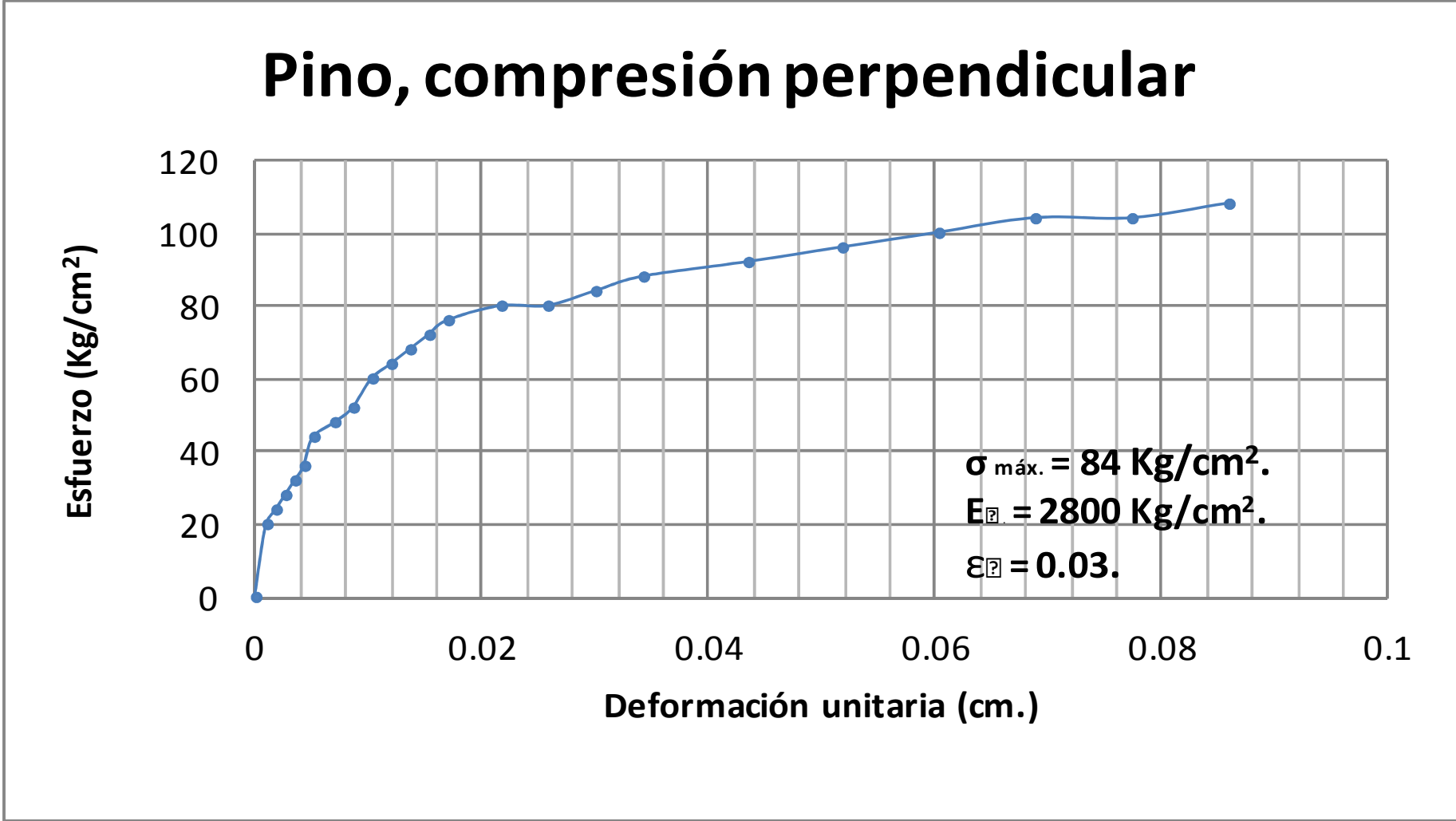
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 54. Curva esfuerzo - deformación: Colorado, compresión perpendicular a la fibra



Elaborado por: Emilio Dávalos

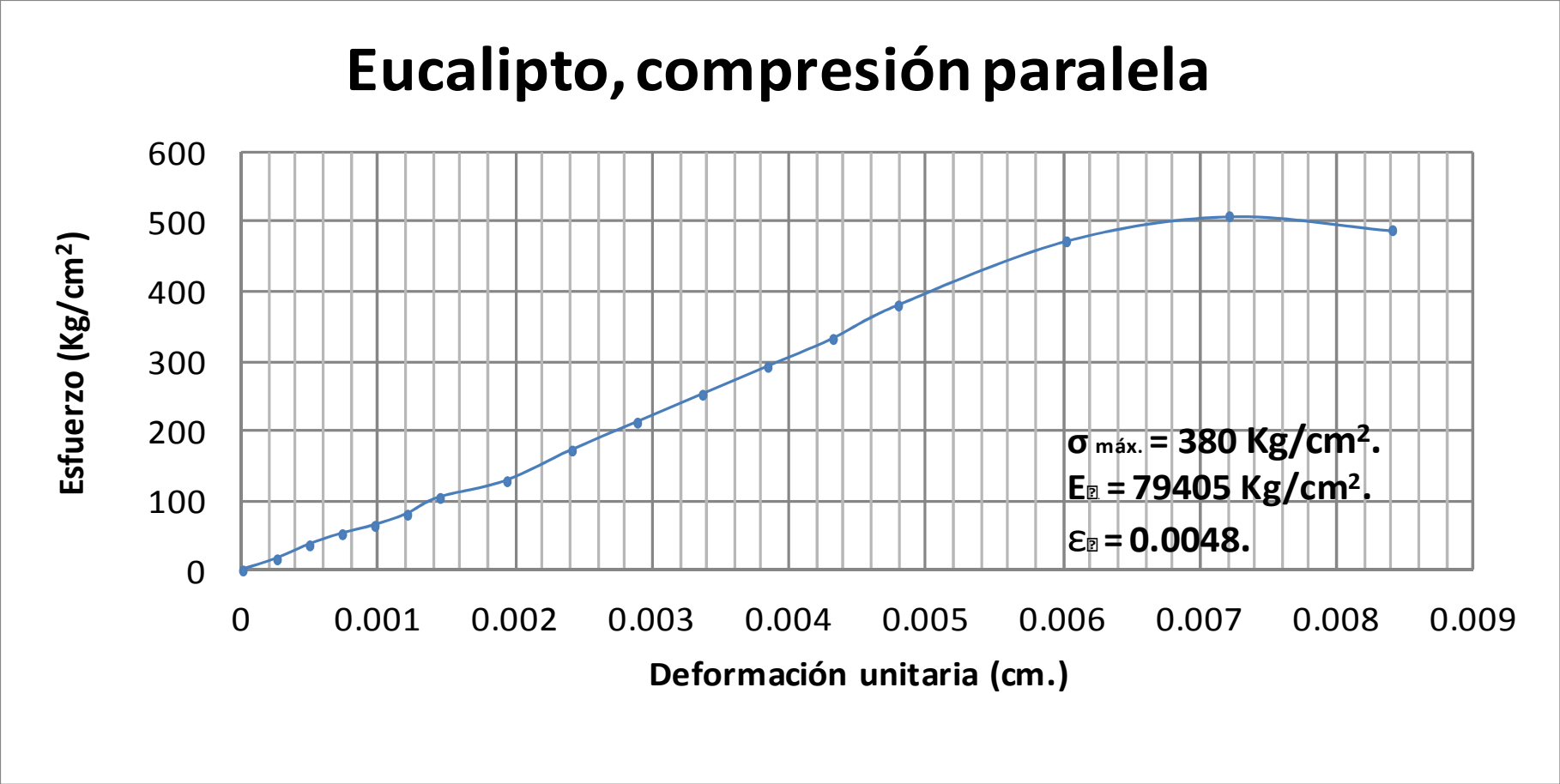
GRÁFICO 55. Curva esfuerzo - deformación: Pino, compresión perpendicular a la fibra



Elaborado por: Emilio Dávalos

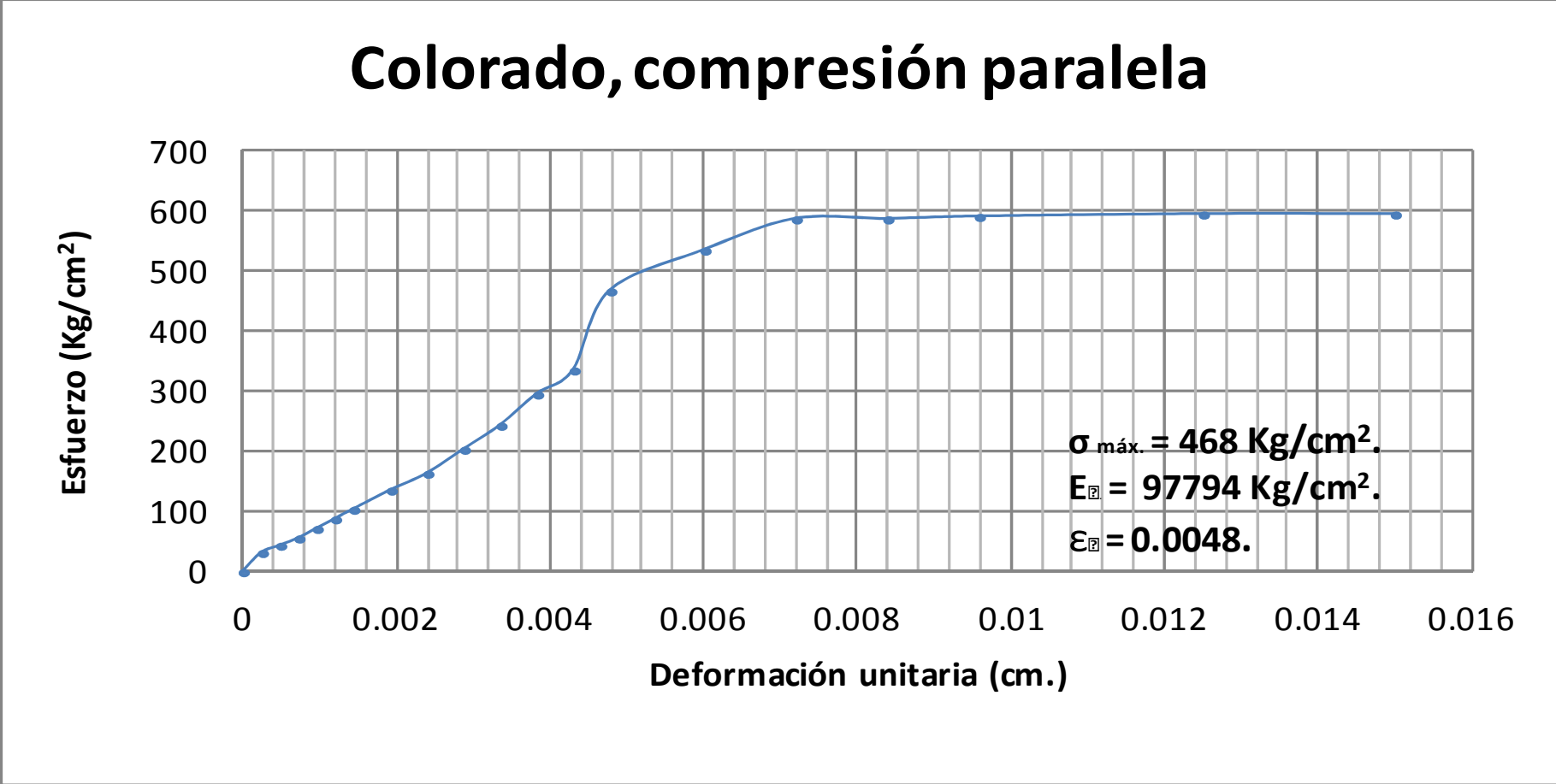
**ANEXO N<sup>o</sup> 3**  
**CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN: COMPRESIÓN PARALELA**  
**A LA FIBRA**

GRÁFICO 56. Curva esfuerzo - deformación:Eucalipto, compresión paralela a la fibra



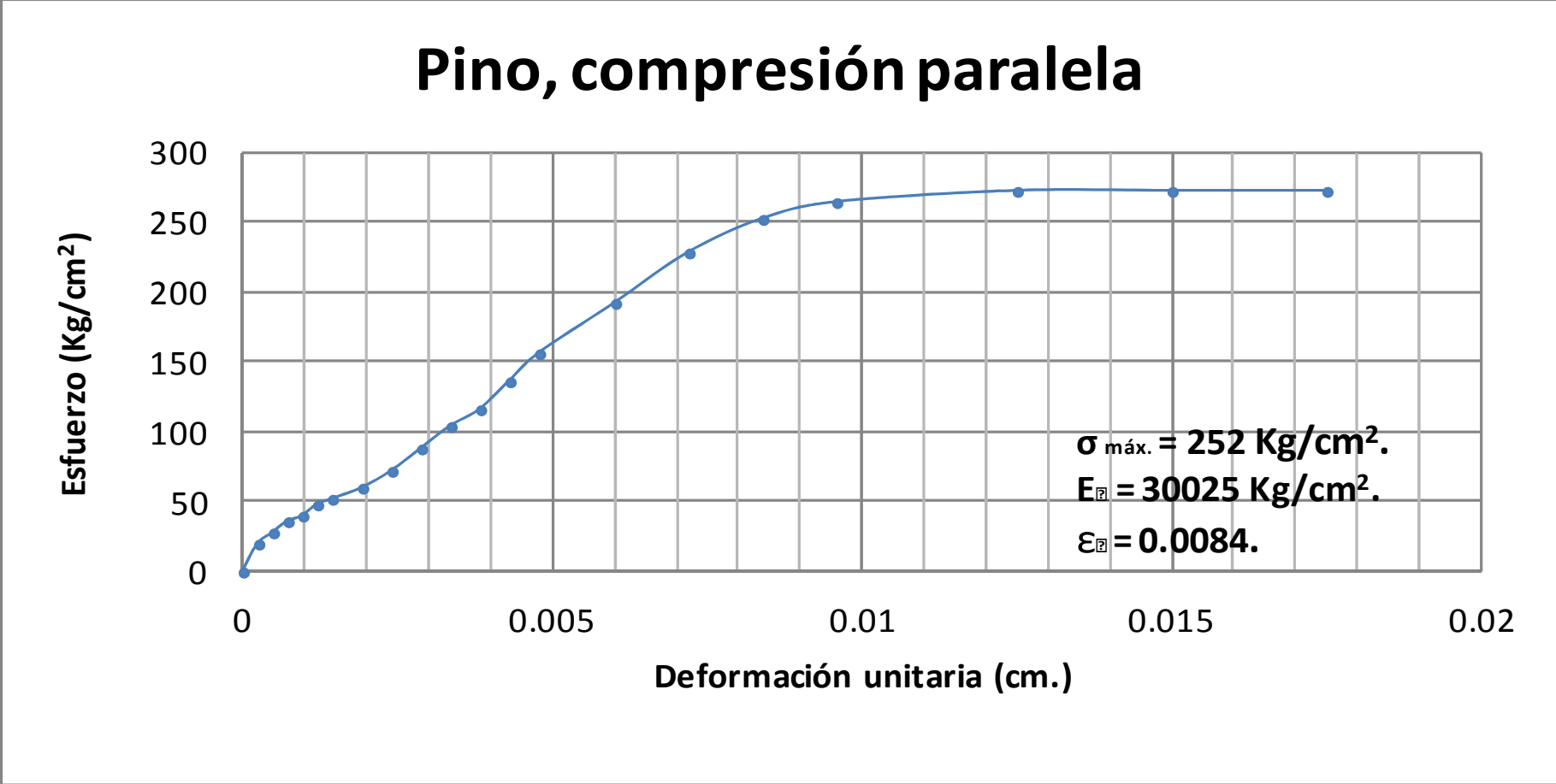
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 57. Curva esfuerzo - deformación: Colorado, compresión paralela a la fibra



Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 58. Curva esfuerzo - deformación: Pino, compresión paralela a la fibra

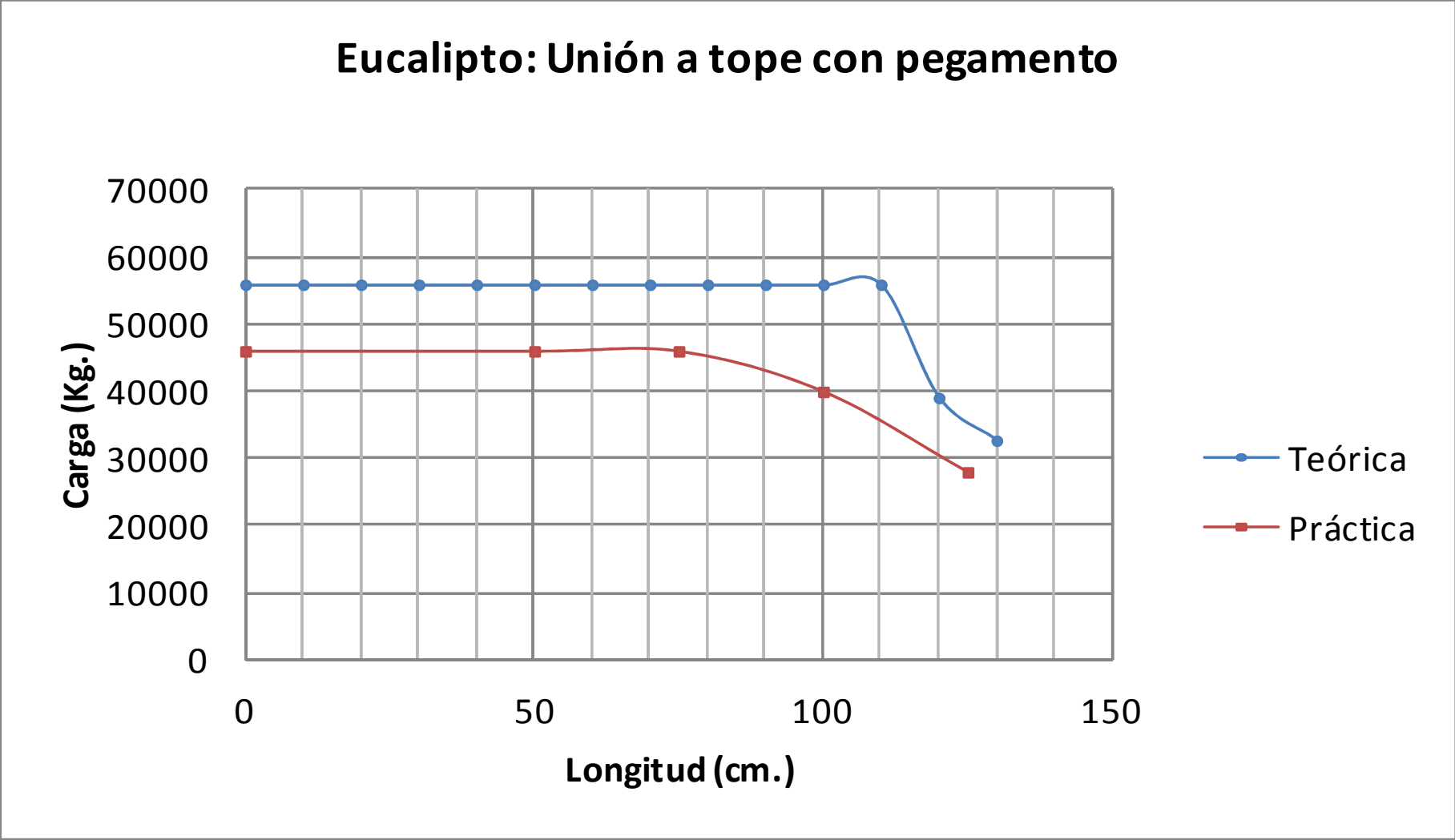


Elaborado por: Emilio Dávalos



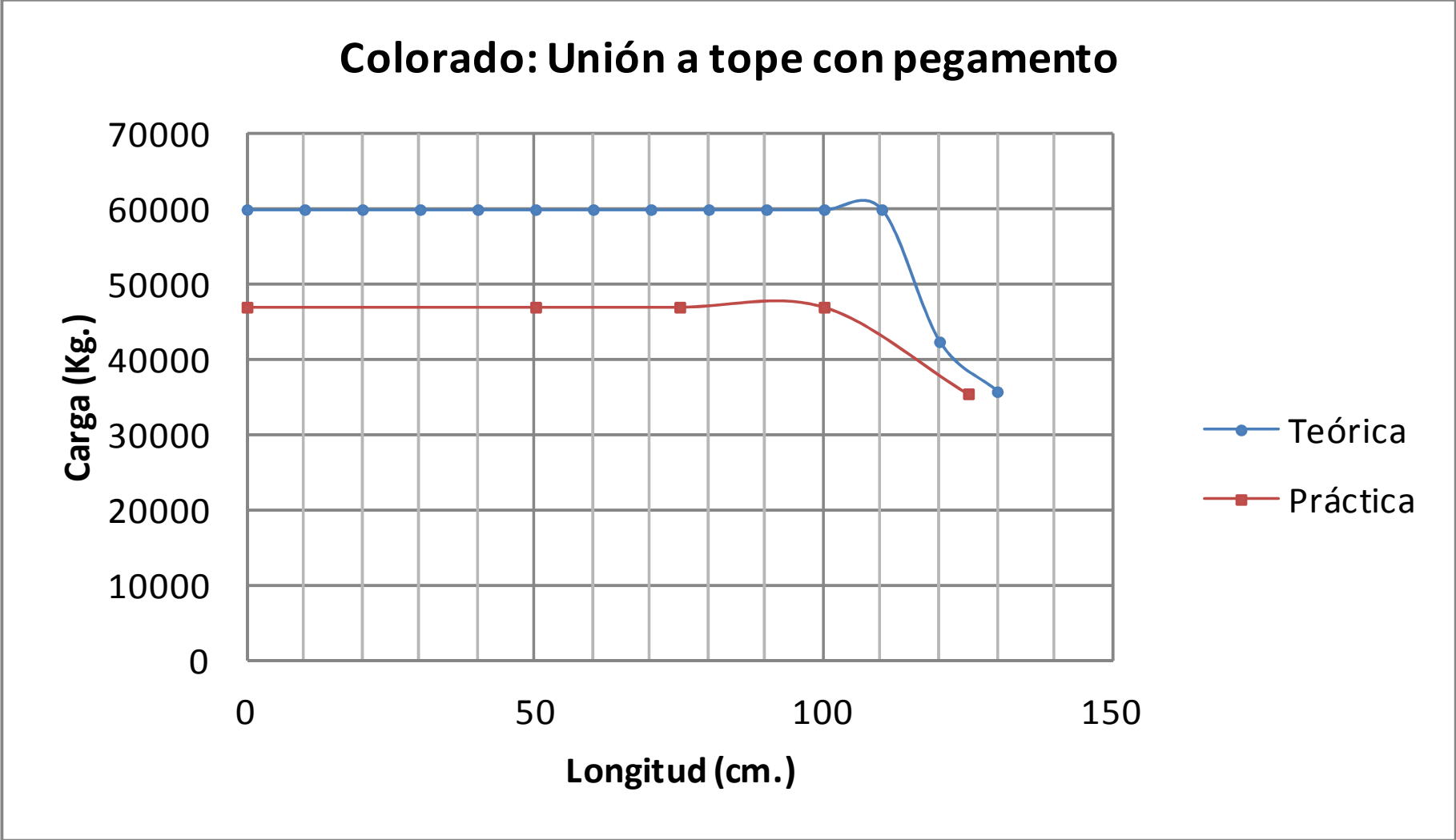
**ANEXO N<sub>o</sub> 4**  
**GRÁFICAS CARGA - LONGITUD TEÓRICA Y PRÁCTICA**

GRÁFICO 59. Curva Carga – longitud: Eucalipto, unión a tope con pegamento



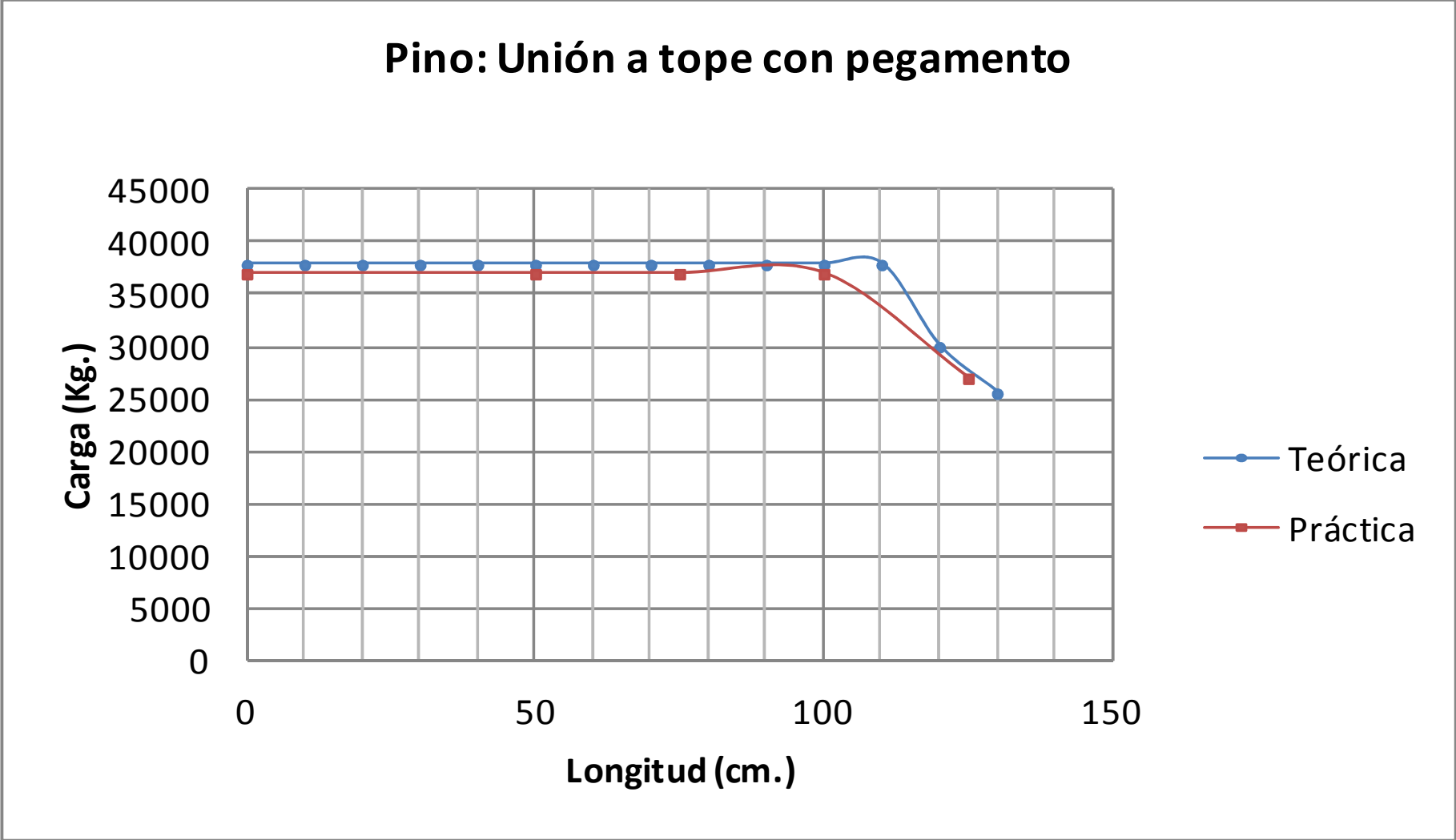
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 60. Curva Carga – longitud: Colorado, unión a tope con pegamento



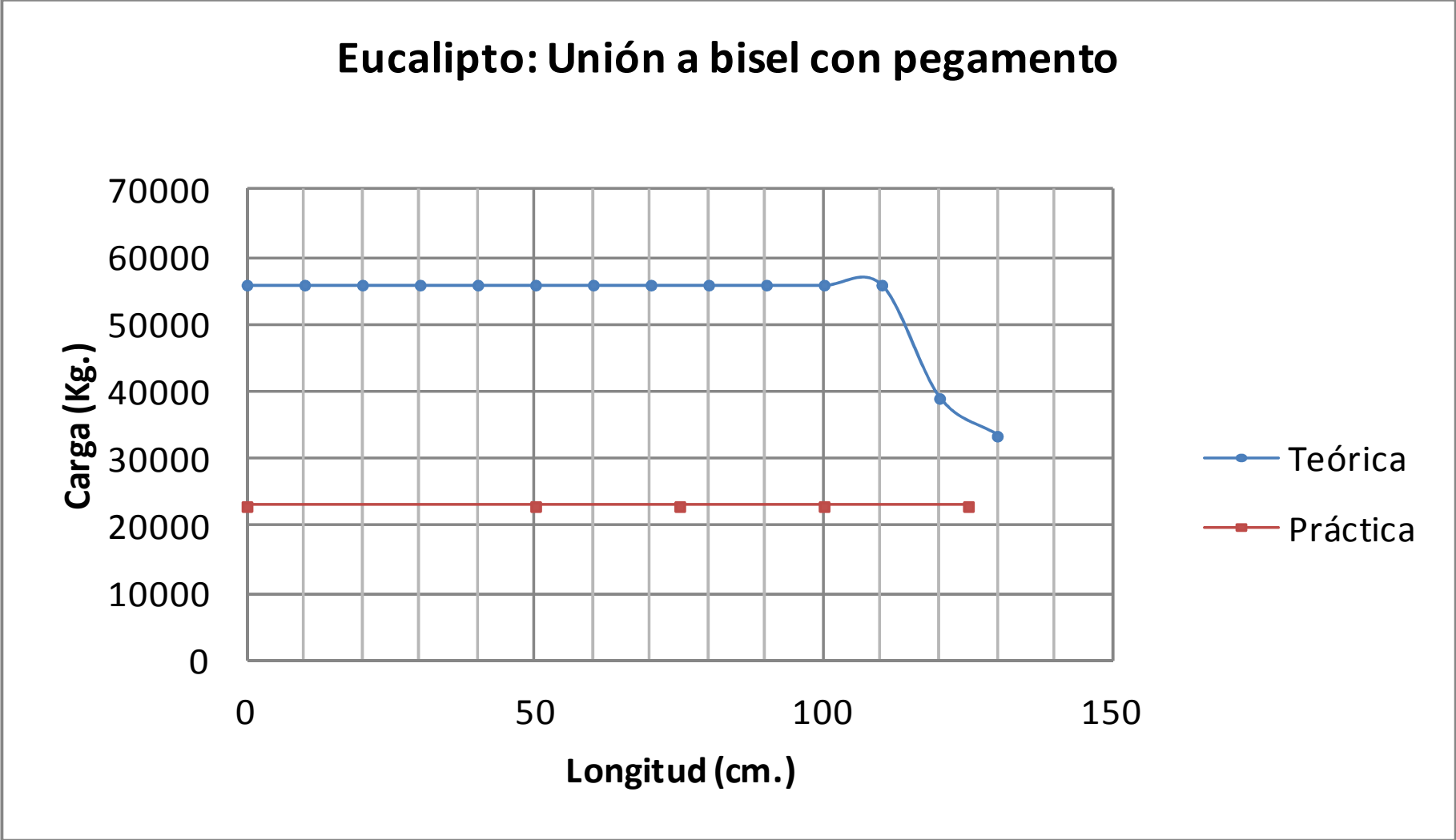
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 61. Curva Carga – longitud: Pino, unión a tope con pegamento



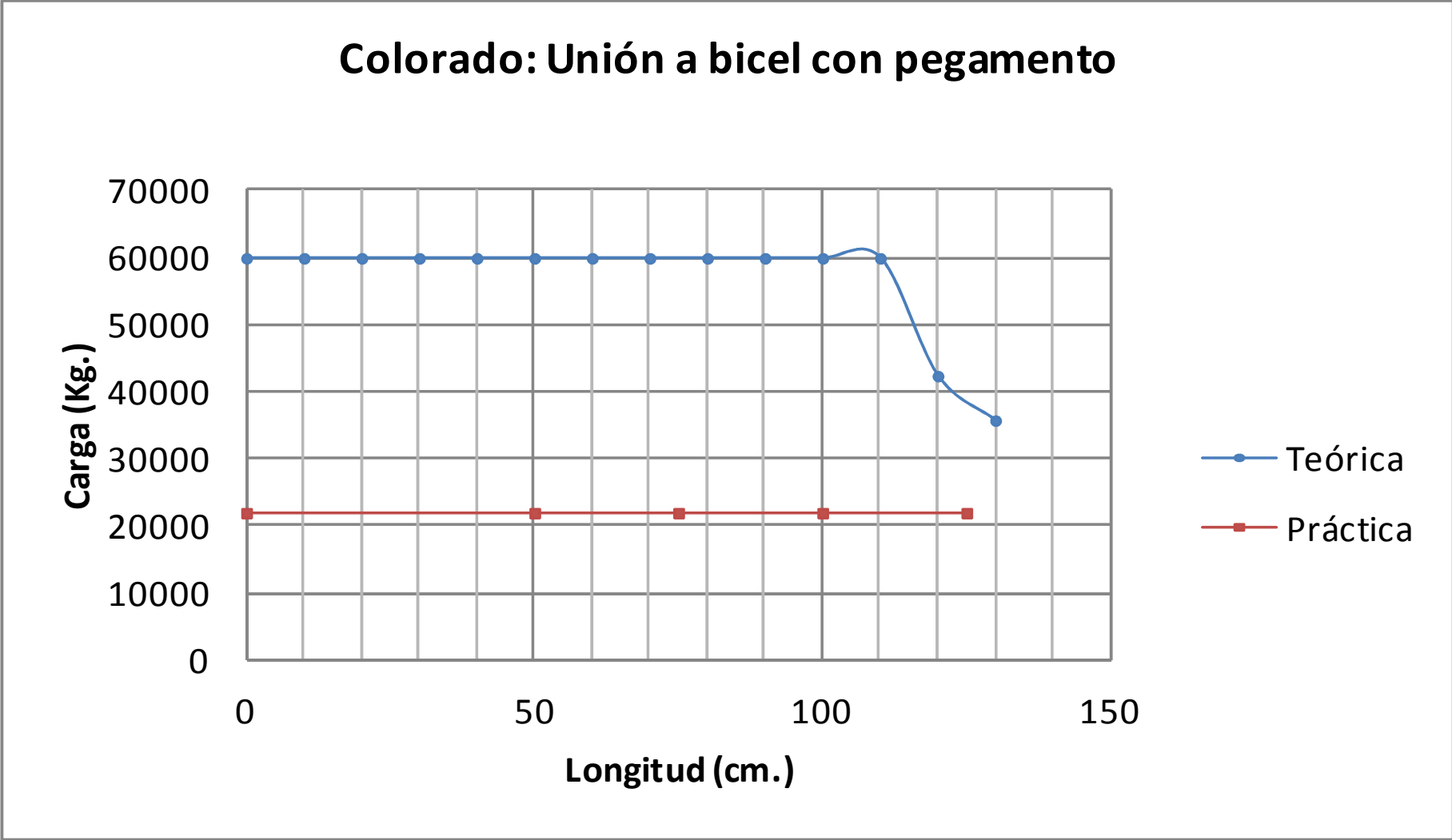
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 62. Curva Carga – longitud: Eucalipto, unión a bisel con pegamento



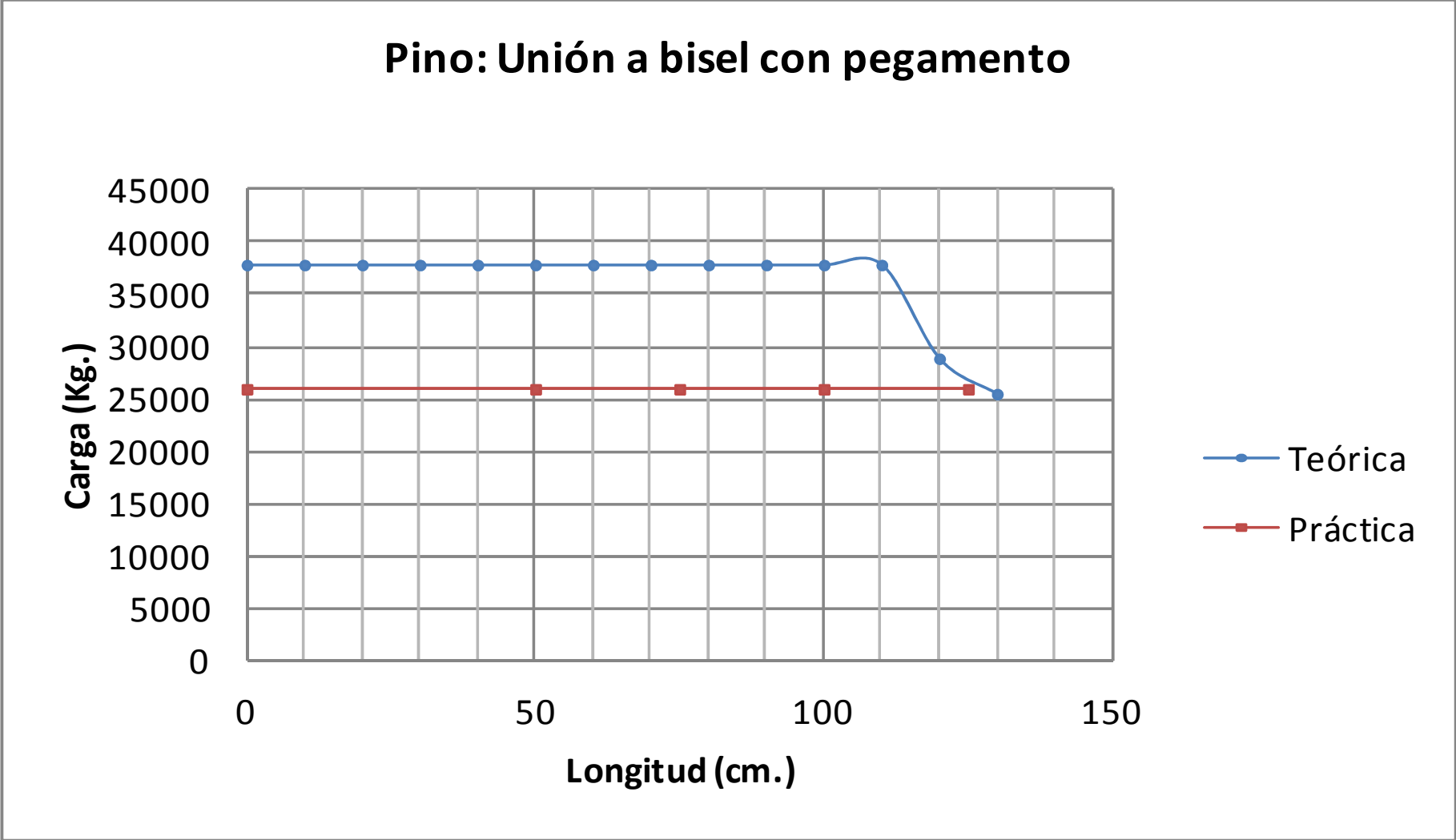
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 63. Curva Carga – longitud: Colorado, unión a bisel con pegamento



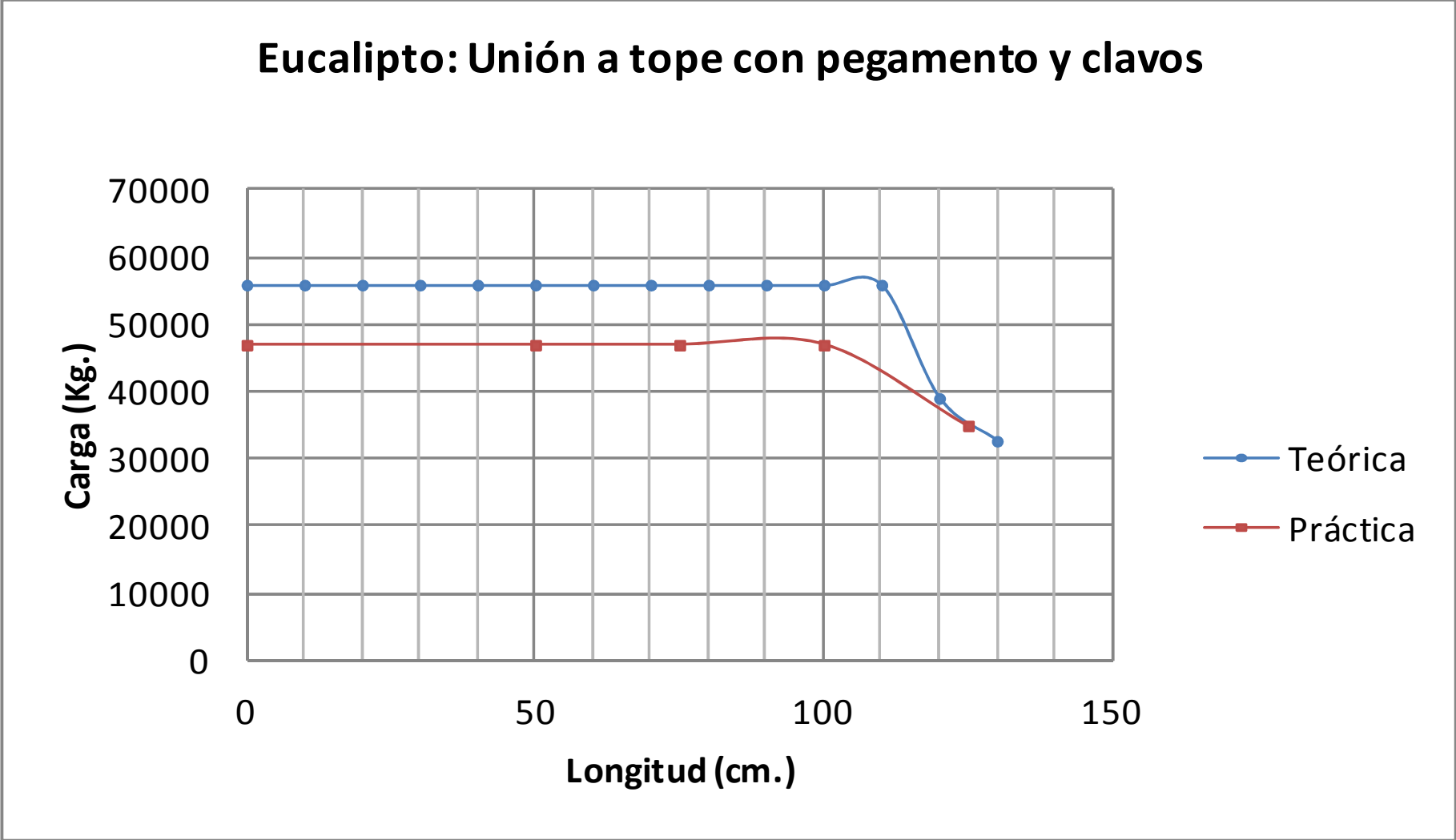
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 64. Curva Carga – longitud: Pino, unión a bisel con pegamento



Elaborado por: Emilio Dávalos

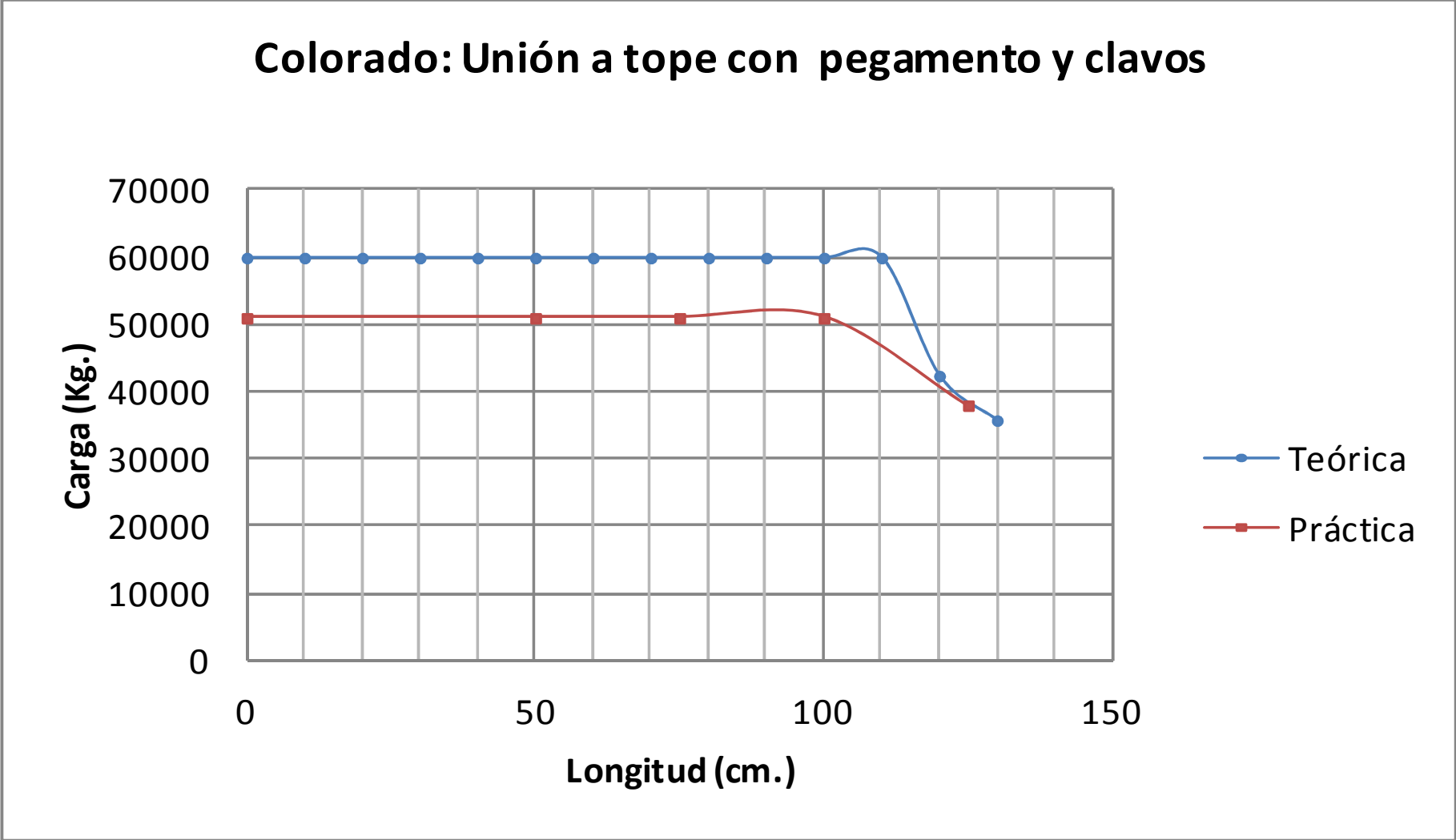
GRÁFICO 65. Curva Carga – longitud: Eucalipto, unión a tope con pegamento y clavos



Elaborado por: Emilio Dávalos

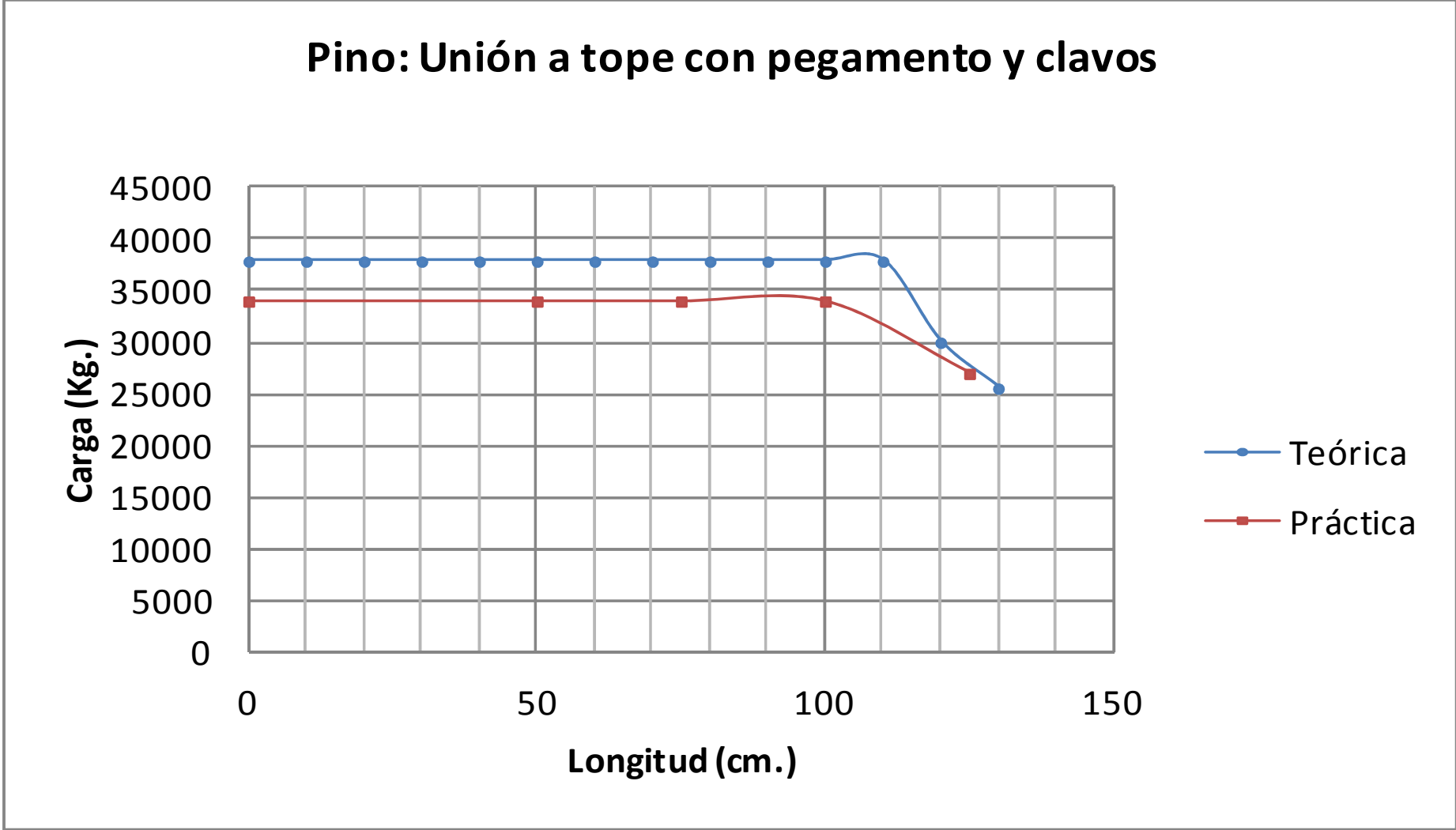


GRÁFICO 66. Curva Carga – longitud: Colorado, unión a tope con pegamento y clavos



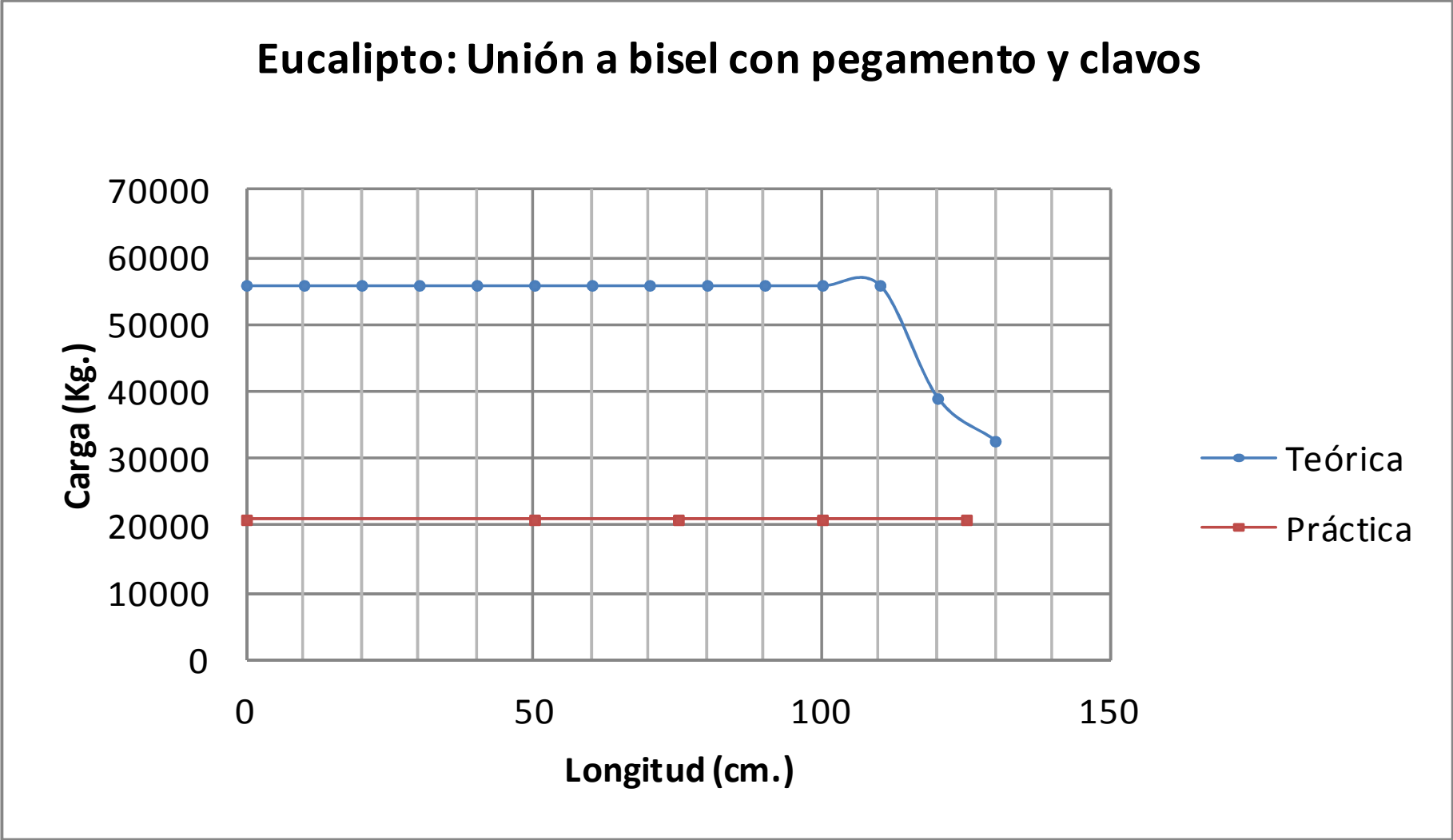
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 67. Curva Carga – longitud: Pino, unión a tope, con pegamento y clavos



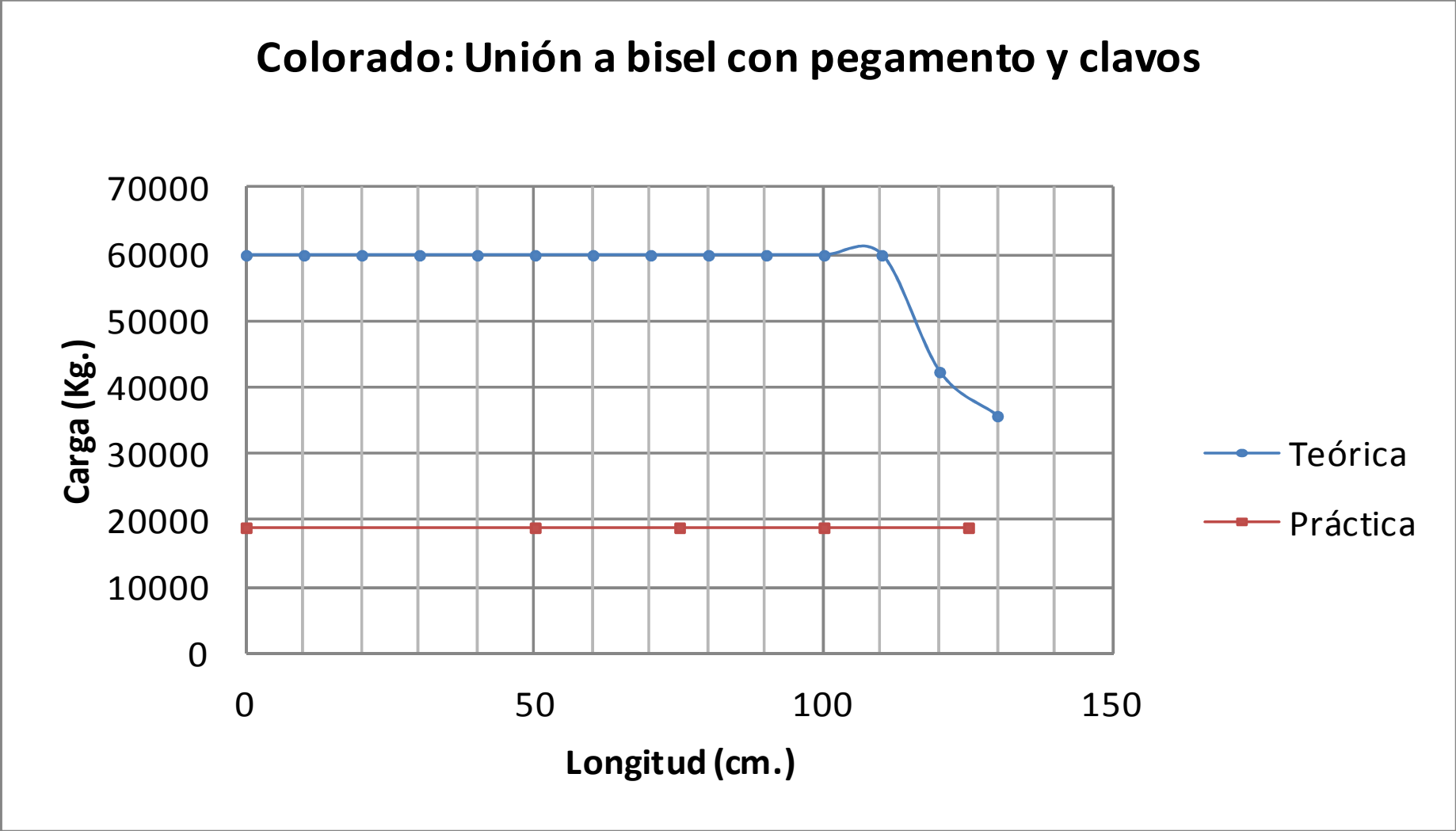
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 68. Curva Carga – longitud: Eucalipto, unión a bisel, con pegamento y clavos



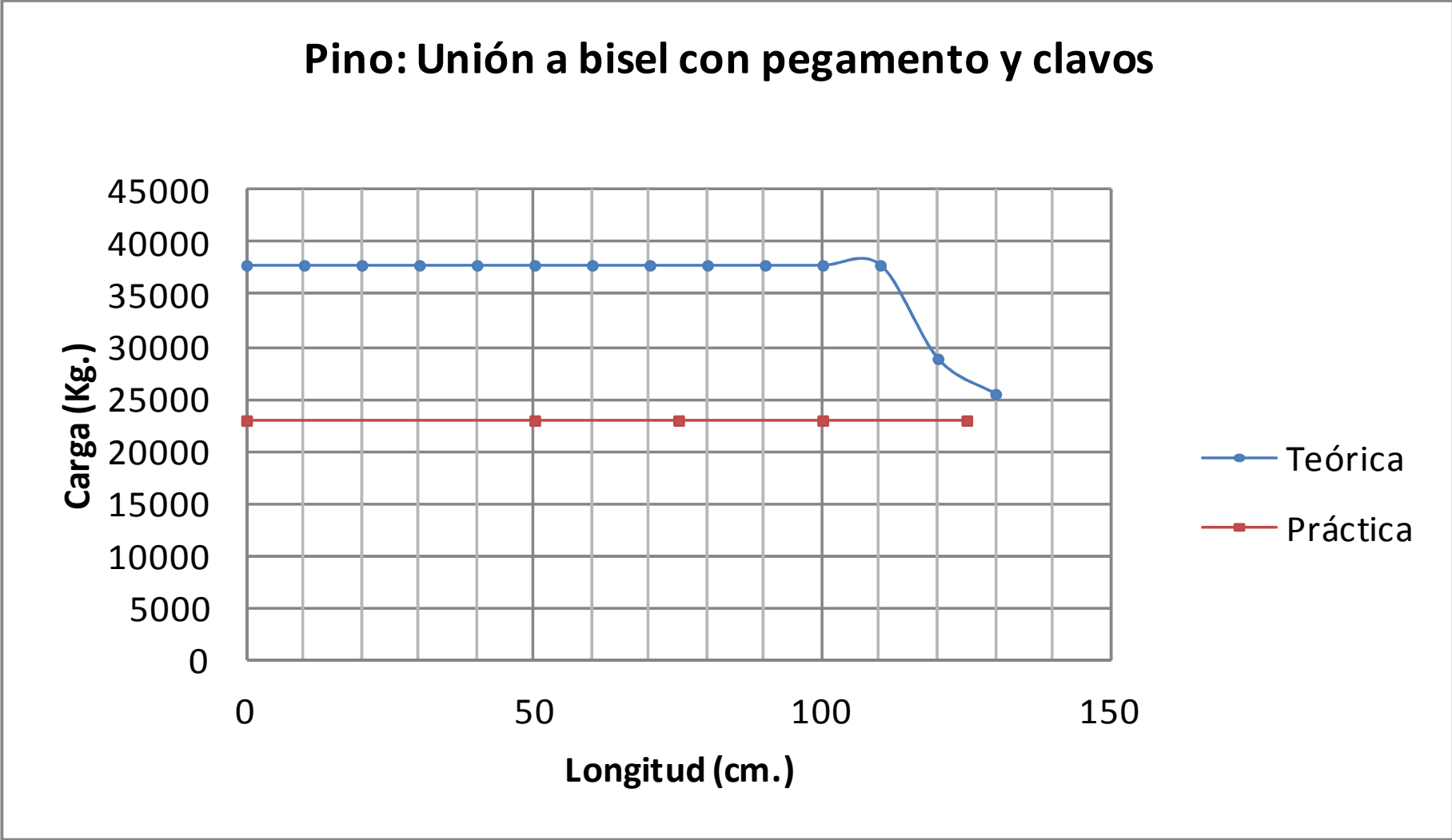
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 69. Curva Carga – longitud: Colorado, unión a bisel, con pegamento y clavos



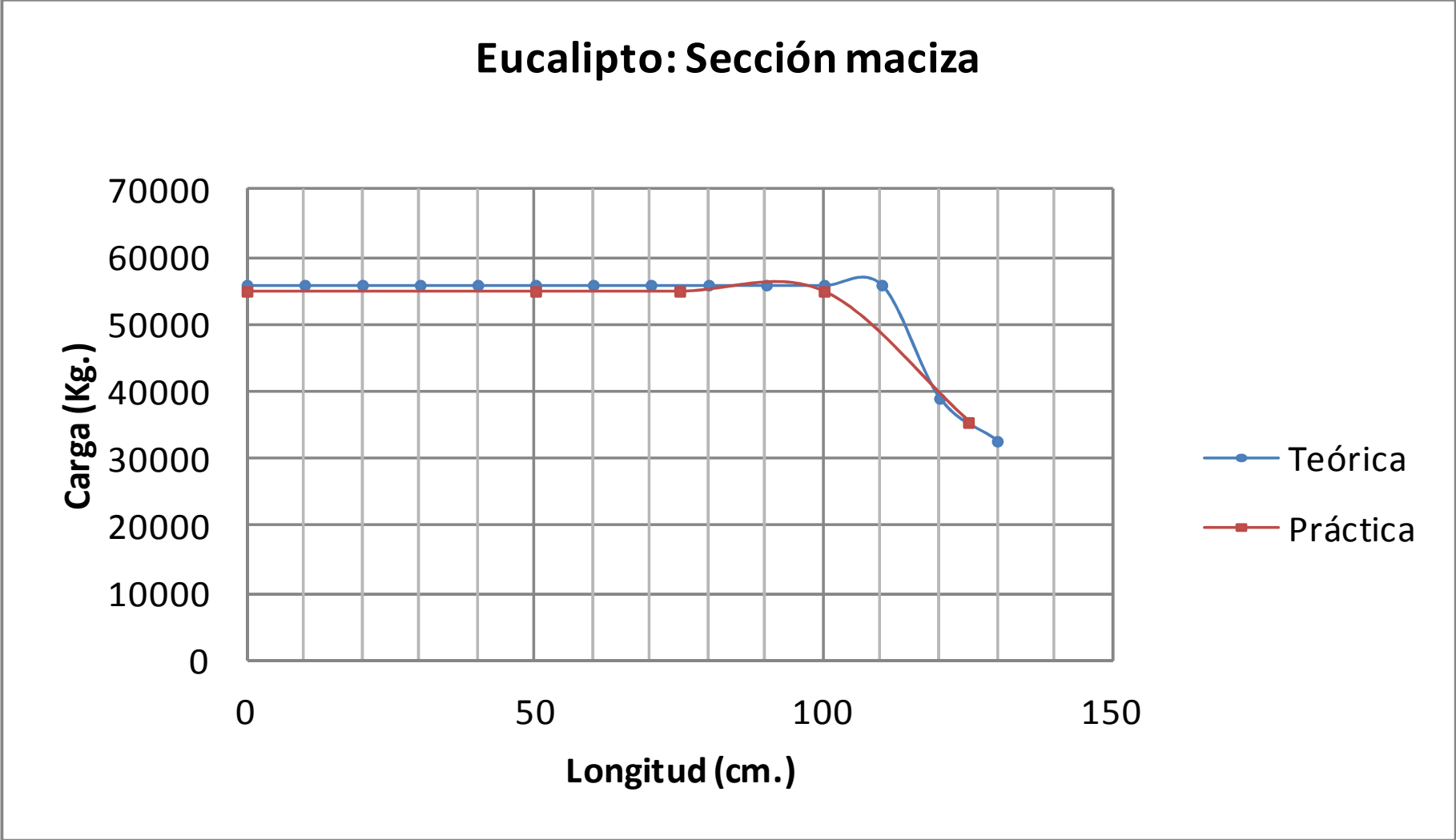
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 70. Curva Carga – longitud: Pino, unión a bisel, con pegamento y clavos



Elaborado por: Emilio Dávalos

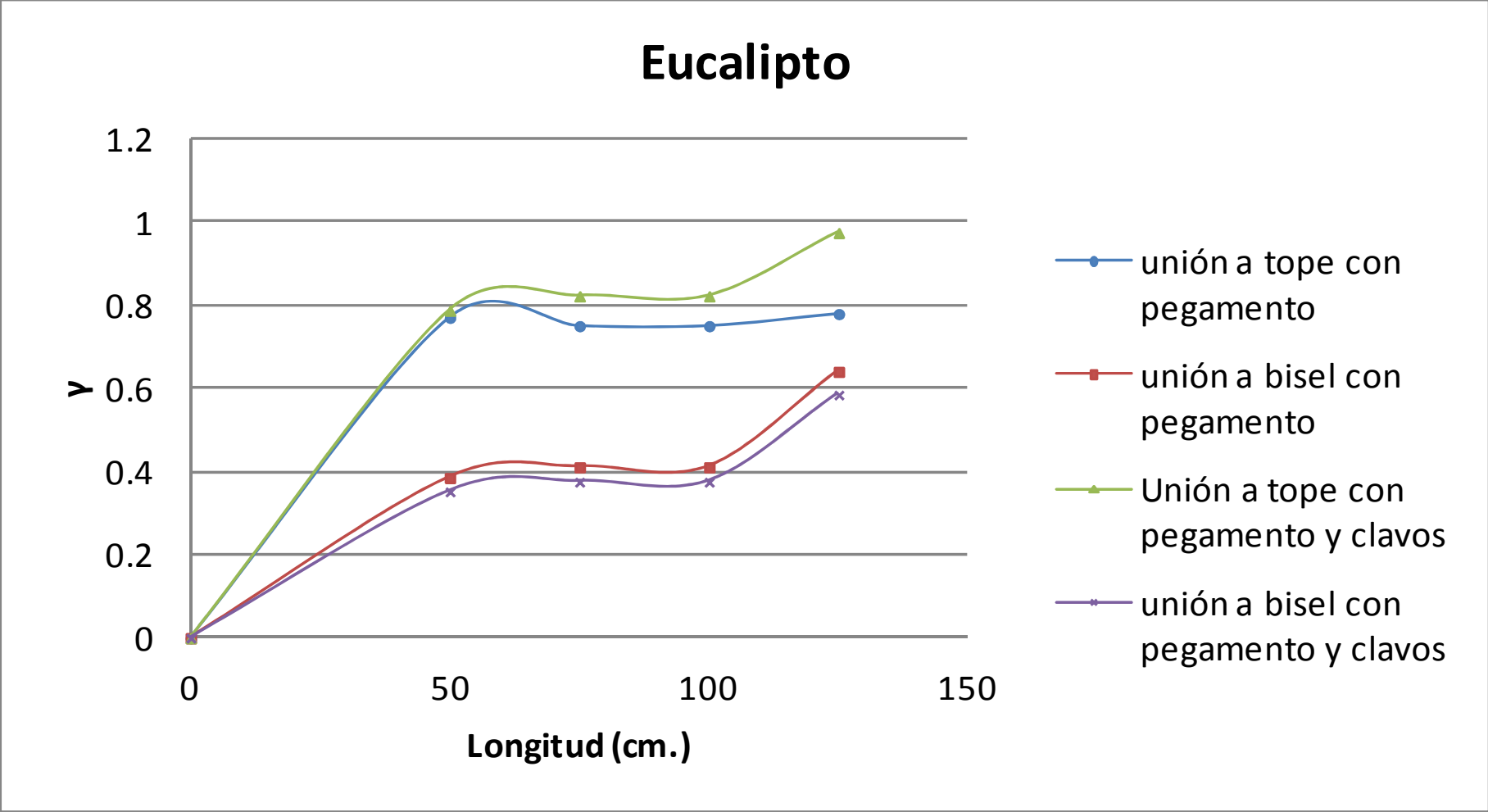
GRÁFICO 71. Curva Carga – longitud: Eucalipto sección maciza



Elaborado por: Emilio Dávalos

**ANEXO N<sup>o</sup> 5**  
**CURVAS FI - LONGITUD**

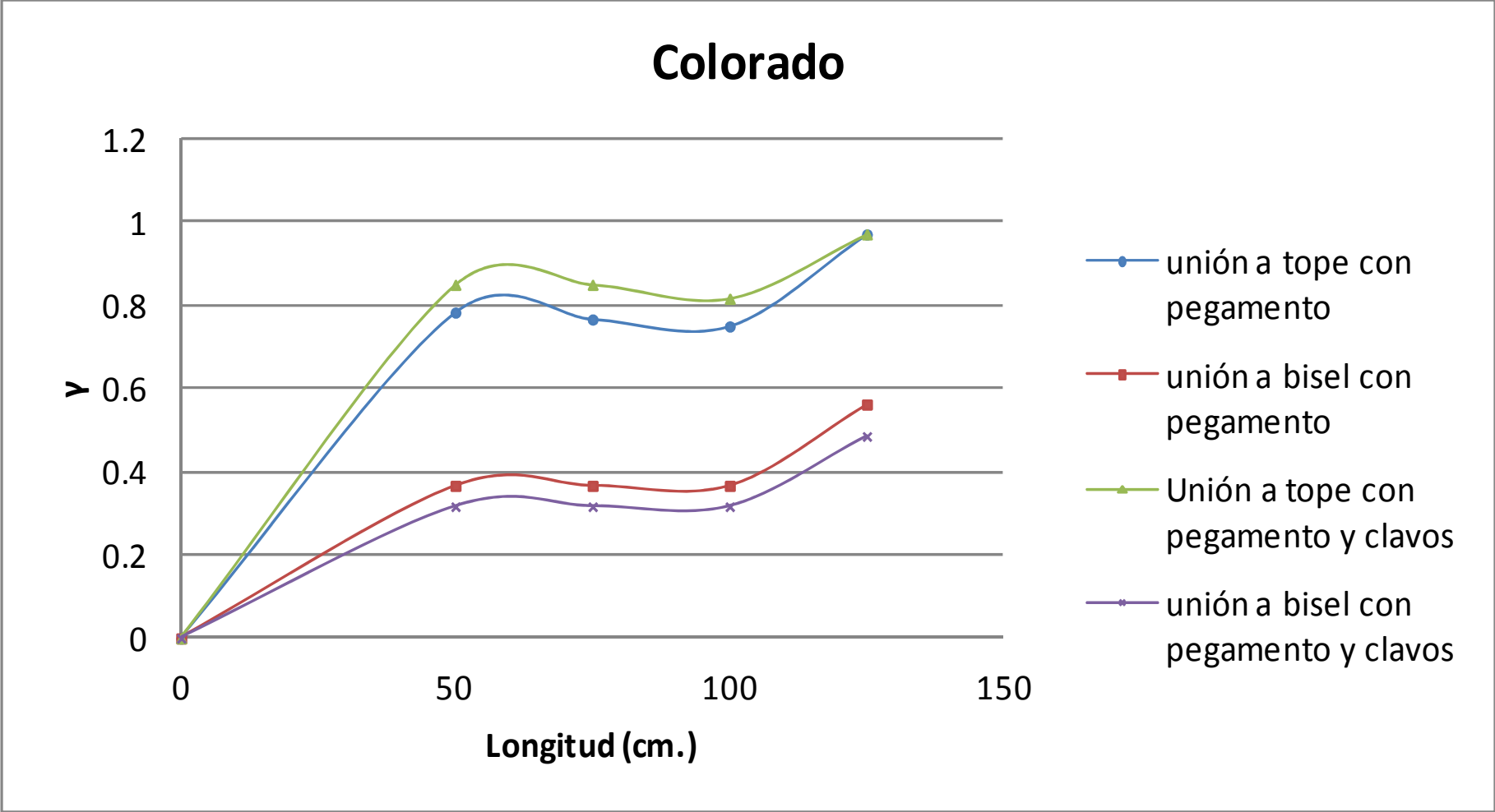
GRÁFICO 72. Curva  $\gamma$  – longitud: Eucalipto



Elaborado por: Emilio Dávalos

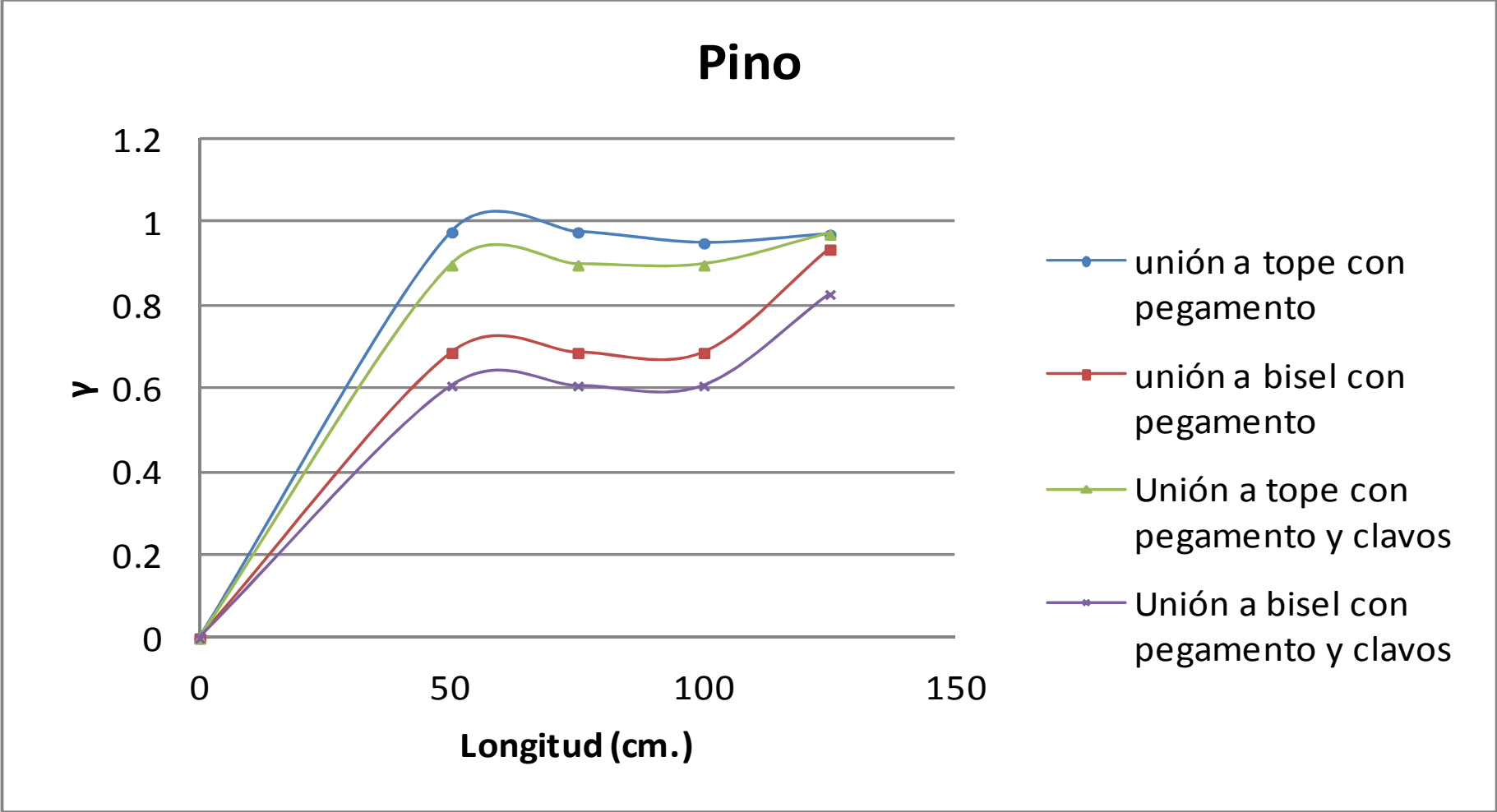


GRÁFICO 73. Curva  $\gamma$  – longitud: Colorado



Elaborado por: Emilio Dávalos

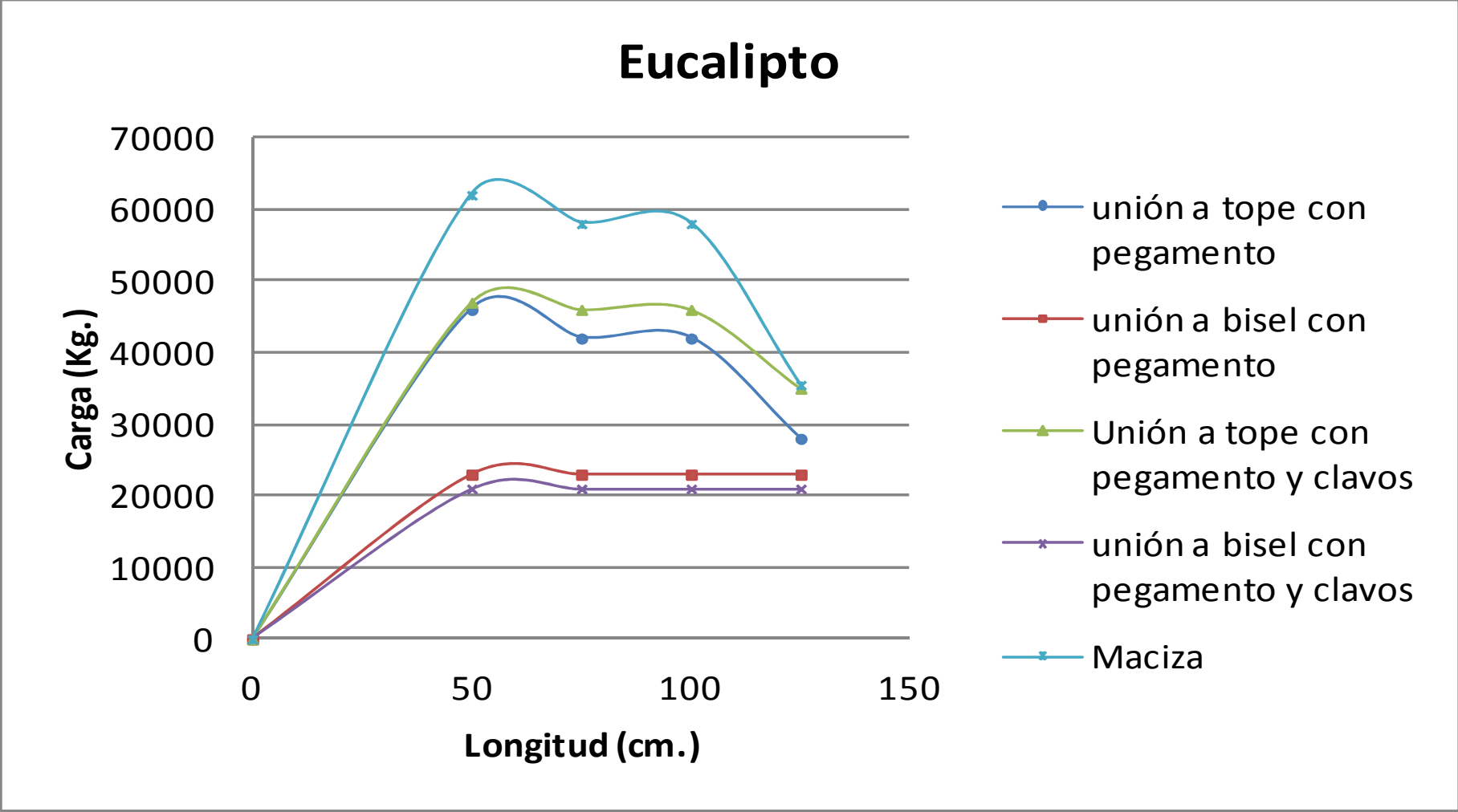
GRÁFICO 74. Curva  $\gamma$  – longitud: Pino



Elaborado por: Emilio Dávalos

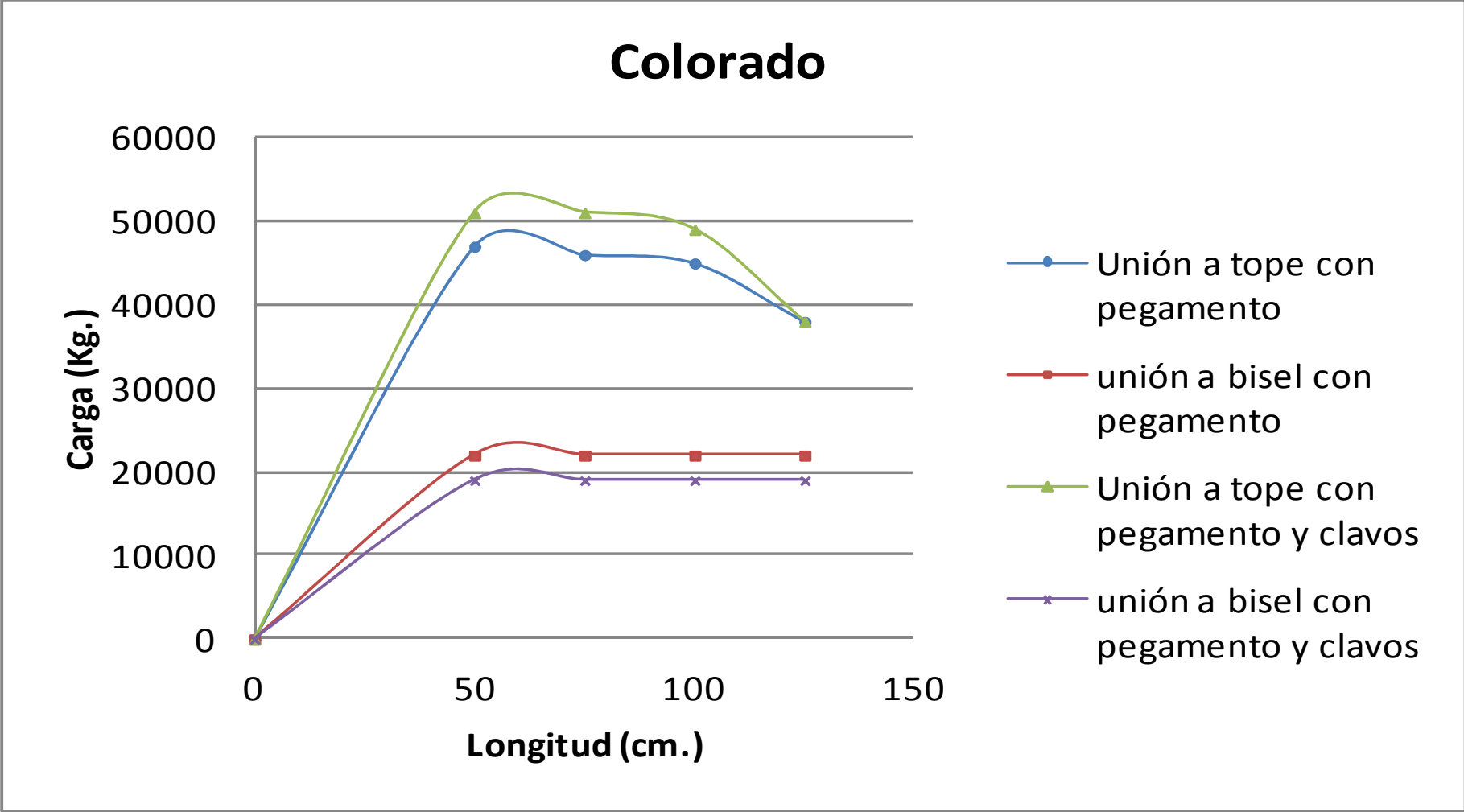
**ANEXO N<sup>o</sup> 6**  
**CURVAS CARGA - LONGITUD DE CADA ESPECIE DE MADERA Y**  
**TIPO DE UNIÓN Y ADHESIVO**

GRÁFICO 75. Curva Carga – longitud:Eucalipto, distintos tipos de uniones



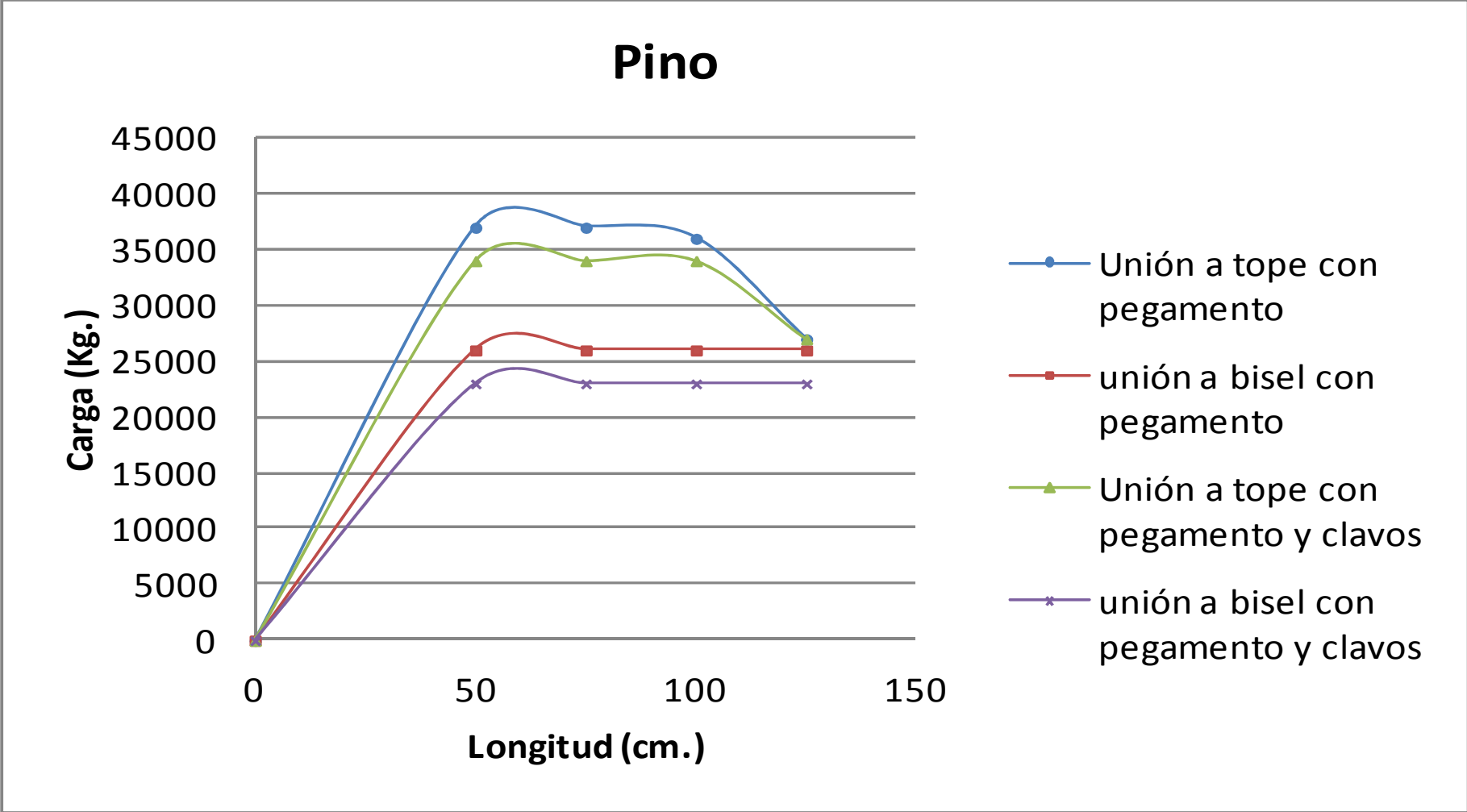
Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 76. Curva Carga – longitud: Colorado, distintos tipos de uniones



Elaborado por: Emilio Dávalos

GRÁFICO 77. Curva Carga – longitud: Pino, distintos tipos de uniones



Elaborado por: Emilio Dávalos

**ANEXO N.º 7**  
**FOTOGRAFÍAS**

**FOTOGRAFÍA 1.** Madera de Colorado, Eucalipto y Pino



Tomada por: Emilio Dávalos



**FOTOGRAFÍA 2.** Madera cortada de acuerdo a características de las probetas



Tomada por: Emilio Dávalos

**FOTOGRAFÍA 3.** Probetas antes de añadir adhesivo



Tomada por: Emilio Dávalos

**FOTOGRAFÍA 4.** Pesando la mezcla blanca más cemento portland



**FOTOGRAFÍA 5.** Añadiendo adhesivo entre las láminas



**FOTOGRAFÍA 6.** Prensado de probetas con pegamento y pegamento más clavos



**FOTOGRAFÍA 7.** Prensado de las probetas pegadas y pegadas más clavos



**FOTOGRAFÍA 8.** Transporte de las probetas terminadas hacia la EPN.



**FOTOGRAFÍA 9.** Muestras previo al ensayo

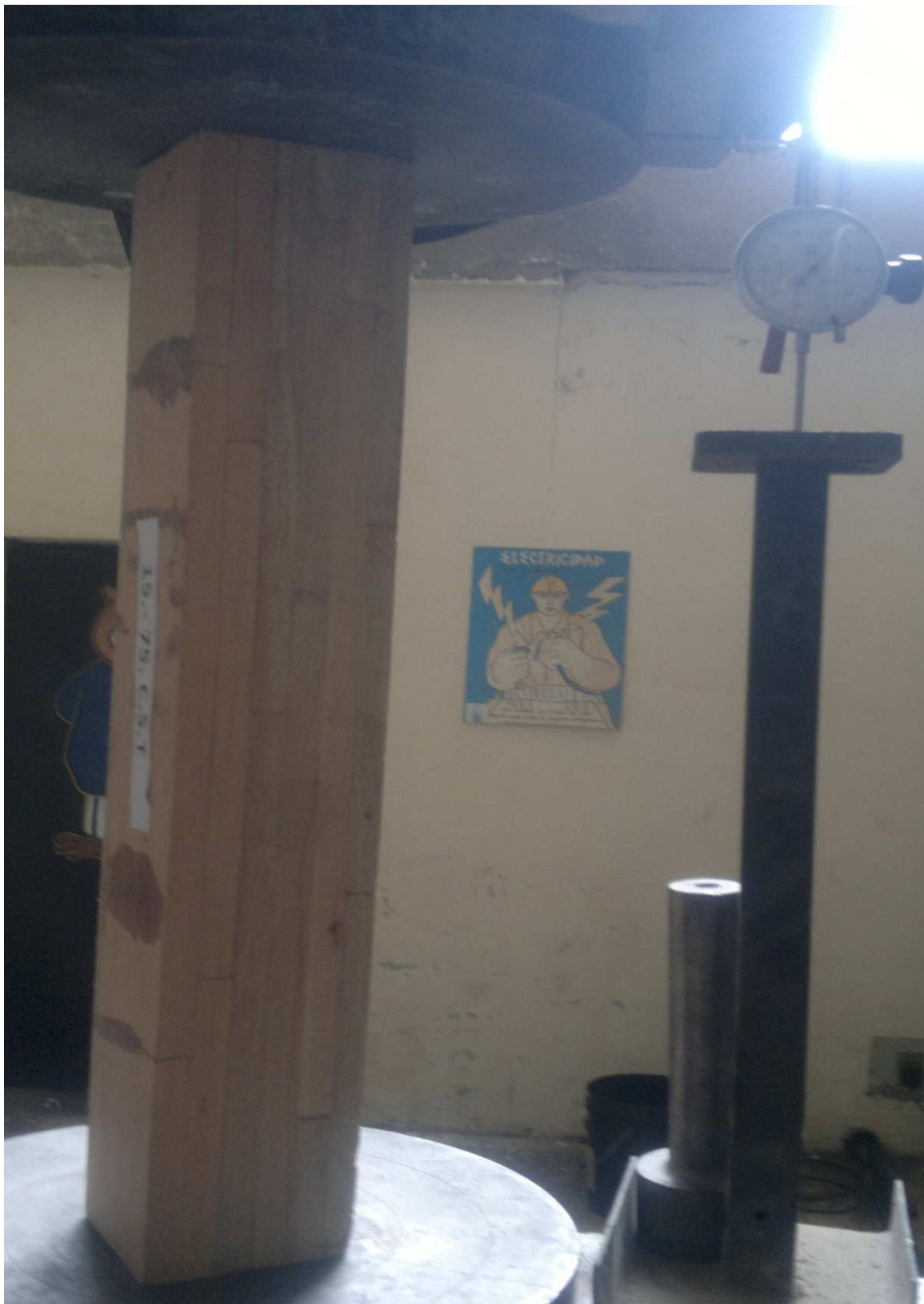


Tomada por: Emilio Dávalos

**FOTOGRAFÍA 10.** Ensayo de probetas



FOTOGRAFÍA 11. Ensayo de probetas



Tomada por: Emilio Dávalos

**FOTOGRAFÍA 12.** Falla de probetas



Tomada por: Emilio Dávalos



**FOTOGRAFÍA 13.** Ensayo perpendicular a la fibra



Tomada por: Emilio Dávalos

**FOTOGRAFÍA 14.** Ensayo paralelo a la fibra



Tomada por: Emilio Dávalos