

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



RECUPERACIÓN DE ALABEOS EN VIGAS DE MADERA CENTRAL SECA DE PINO RADIATA MEDIANTE VAPORIZADO

Informe de Habilitación Profesional
Presentado en conformidad a los requisitos
Para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dr. Carlos Salinas Lira
Profesor Co-guía:
Dr. Rubén Ananías Abuter

LUIS FELIPE ACUÑA ALEGRÍA

**CONCEPCIÓN-CHILE
2016**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Profesor Guía Don Carlos Salinas por su valioso apoyo durante todo este periodo académico, puesto que siempre ha estado presente para aclarar mis inquietudes o simplemente brindarme un buen consejo.

Gratifico además, al grupo de trabajo que me rodeó durante el desarrollo de esta Habilitación Profesional. Particularmente, me refiero al equipo de Secado del Departamento de Ingeniería en Maderas de la Universidad del Bío-Bío, conformado por Don Rubén Ananías, Linette Salvo, Víctor Sepúlveda y Héctor Sepúlveda. Por su apoyo y disposición, gracias. Asimismo, agradezco el financiamiento de una parte de este trabajo al Proyecto CONICYT-FONDECYT 1160812.

A continuación, agradezco enormemente la presencia de mis padres, hermanos, abuelos, tíos y primos en mi vida, porque sin ellos jamás habría sido capaz de iniciar, y por supuesto, concluir esta etapa universitaria. Todos ellos fueron participantes activos en esta carrera, por lo tanto, más que un simple gracias, se merecen este logro tanto o más que yo. Ustedes son mis principales impulsores, los quiero mucho.

Finalmente, le doy las gracias a la persona más importante de mi vida, Graciela. Eres la persona más linda, humilde y bondadosa que he conocido. Has sido mi compañera incondicional durante mucho tiempo y por eso gran parte de logro también es tuyo. Además, eres la mujer que me ha dado la mayor alegría del mundo al permitirme ser padre del niño más hermoso que existe, nuestro hijo Agustín. Por todo esto y mucho más, infinitas gracias. Te amo.

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mi hijo Agustín; el niño que ha cambiado mi vida en todo aspecto y que gracias a él, tengo las fuerzas necesarias para enfrentar el mundo. Eres lo mejor que he hecho en esta vida y por eso, cuando algún día leas estas líneas sabrás que cada una de ellas fue escrita pensando en ti. Agustín, eres la persona por quien lucho a diario y por eso te amo inmensamente.

Asimismo, aprovecho esta oportunidad para reconocer a dos personas que ya no se encuentran con nosotros desde hace un tiempo. Tío Christian, tía Lucy, este logro también va dedicado a ustedes. Nunca he dejado de pensarlos y viven para siempre en mi memoria, los quiero mucho.

RESUMEN

Esta Habilitación Profesional es desarrollada en el contexto del proyecto FONDEQUIP EQM130236 denominado: *Secador flexible de maderas*, en el marco de ejecución de actividades de investigación del Grupo de Secado y Tratamientos Térmicos de la Madera de la Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

Se realizan nueve ensayos de vaporizado con el propósito de corregir defectos (alabeos) generados por el proceso de secado convencional en vigas de madera central seca de pino radiata. Para determinar la efectividad del tratamiento térmico se experimenta con diferentes tiempos, temperaturas y sobre pesos. Se realizan mediciones de alabeos y propiedades físicas, pre y post tratamiento, lo cual permite evaluar en base a coeficientes e índices, la eficiencia del proceso de recuperación de alabeos de diversos programas de tratamiento térmico. Asimismo, se recurre a la Norma Chilena NCh993.Of72 para clasificar el estado de la madera post tratada térmicamente y determinar si el producto es de una calidad mínima requerida para su comercialización en el mercado externo.

Los resultados indican que aplicar un vaporizado a 100°C durante 6 horas y con un sobre peso de 3 toneladas por metro cuadrado, es suficiente para aliviar alabeos en madera de pino radiata, logrando una recuperación media de 47,75%. Como consecuencia de dichos tratamientos, el contenido de humedad se incrementó en promedio un 10,10%, lo cual es satisfactorio dado que cumple con la normativa chilena NCh1198.Of06 que exige un contenido de humedad de equilibrio de $12 \pm 3\%$ para trabajos en construcción.

Por otra parte, los resultados también mostraron que aplicar un vaporizado a 100°C durante 6 horas y posterior a ello, aumentar la temperatura del vapor a 160°C por 30 minutos, no es beneficioso puesto que el nivel de recuperación de alabeos es mínimo (10,79%).

Por último, se concluye que de los alabeos en las piezas de madera de pino radiata estudiadas, la torcedura resultó ser más relevante. En consecuencia, su recuperación es determinante a la hora de seleccionar el mejor programa de tratamiento.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	4
CAPÍTULO 2	5
ESTADO DEL ARTE	6
CAPÍTULO 3	15
MATERIALES Y METODOLOGÍA	16
Descripción del experimento	16
Descripción del Análisis Estadístico.....	18
CAPÍTULO 4	22
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	23
Resultados Experimentales	23
Resultados del Análisis Estadístico.	43
CAPÍTULO 5	47
CONCLUSIONES.....	48
CAPÍTULO 6	50
REFERENCIAS	51
CAPÍTULO 7	54
ANEXO A	55
ANEXO B.....	73
ANEXO C.....	91

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Seleccionar madera frente a otros materiales en muchas ocasiones puede ser la mejor alternativa, no obstante, por provenir de organismos vegetales vivos posee un contenido de humedad elevado, cuya presencia puede llegar a resultar desventajosa. Es por ello, que es indispensable considerar previamente la aplicación de un tratamiento térmico para disminuir dichos niveles de agua contenidos en su estructura (**Muñoz, 2008**) y obtener un material en las condiciones apropiadas para su utilización, debido a que la madera seca posee mayores ventajas en comparación con su estado verde, por ejemplo: se previene el ataque de hongos e insectos; aumenta su resistencia mecánica; facilita los procesos en la industrialización, favorece la aplicación de pinturas y adhesivos, entre otros. Por estos motivos, es importante considerar el proceso de secado como el medio para asegurar que este material se vuelva apto industrialmente.

El programa de secado aplicado depende de la especie en cuestión, porque considerando la estructura anatómica que caracteriza a cada tipo de madera, las condiciones de secado no pueden ser únicas para todas las especies existentes. Por ejemplo, a las especies latifoliadas no son aplicables las altas temperaturas sin obtener como consecuencia un producto dañado. En cambio, dicho inconveniente no es propio de las especies coníferas, en particular de su albura, ya que ésta permite una mayor facilidad para captar y/o ceder humedad con el ambiente que la rodea (**Siau, 1984**).

Asimismo, debe considerarse que la madera al ser un material anisotrópico, sus propiedades son diferentes en todas direcciones, especialmente en las direcciones ortotrópicas: radial, tangencial y longitudinal (**Siau, 1984; Bodig y Jayne, 1993**). Esto, también depende de las características anatómicas del material, como por ejemplo: la transición entre madera inicial y final, madera juvenil y adulta, tipo (duramen/albura), entre otros (**Díaz-vaz, 2003**). En este sentido, el contenido de humedad en la sustancia leñosa no es uniforme, afectando directamente las propiedades físico-mecánicas del material. Es por ello, que la distribución del contenido de humedad en términos espaciales y temporales durante el secado de la madera afecta directamente la variación de sus propiedades, provocando además, la aparición de deformaciones que disminuyen fuertemente su valor comercial.

Dichas deformaciones son conocidas en el sector maderero como alabeos, y dependiendo de la orientación en la que se producen pueden recibir distintas acepciones, como por ejemplo: torcedura, arqueadura, encorvadura y acanaladura. Estos alabeos influyen de manera negativa en la elaboración o mecanización de piezas de madera, por lo que es necesario considerar el empleo de un método simple y efectivo que permita reducirlos y/o eliminarlos. En este sentido, un proceso de vaporizado posterior al proceso de secado convencional, puede resultar apropiado.

El pino radiata que constituye el grupo de las coníferas presenta una estructura leñosa ordenada y simple, por ello, no se ve afectada por agrietamientos superficiales e internos ni por colapso, como las especies latifoliadas (Siau, 1984; Peredo y Figueroa, 1992; Ananías *et al.*, 2001; Díaz-vaz, 2003; Moya y Muñoz, 2008; Miri y Madhoushi, 2013). Sin embargo, sí se puede ver bastante dañado por los alabeos descritos anteriormente.

En este contexto, para que esta madera sea altamente competitiva en el mercado externo, se deben cumplir numerosas exigencias que aseguren que el producto sea de buena calidad. Esto se logra con la confección de productos estandarizados de acuerdo a normativas nacionales vigentes. Es por esto que, en este estudio se emplea la norma chilena **NCh993Of.72** para efectos de cuantificar la calidad de la madera en términos de deformación. Para ello, se medirán los alabeos en vigas de madera de pino radiata previo y posterior al proceso de vaporizado. Por último, se comparan los resultados obtenidos para determinar la efectividad del proceso de acondicionado.

En definitiva, la problemática está en determinar el grado de deformación de vigas de madera de pino radiata, antes y después de haberse tratado térmicamente, lo cual puede sustentar opciones de mejoramiento de productos madereros y asimismo, optimización de los procesos de tratamiento térmico.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la recuperación de alabeos en vigas de madera central seca de pino radiata sometida a tratamientos térmicos de vaporizado.

Objetivos Específicos

- 1.- Medir alabeos en vigas de madera central seca de pino radiata, previo y posterior al tratamiento térmico de vaporizado.
- 2.- Analizar la recuperación de alabeos en vigas de madera central seca de pino radiata.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

La madera tiene diversas aplicaciones (en construcción civil, mobiliarios, como fuente de energía, entre otros) debido a sus atributos decorativos y también por sus propiedades físico-mecánicas, de lo cual toma ventajas frente a otros materiales. Para esto, en lo mínimo, la madera requiere ser tratada para disminuir sus niveles de humedad contenidos en su estructura (**Muñoz, 2008**), lo cual conlleva a considerar un aporte energético para producir este resultado. No obstante, hay factores que deben ser considerados antes de secar el producto (especie, edad, porción albura-duramen, contenido de humedad, tipo de corte, entre otros) si se quiere un producto de madera seca de calidad.

La aplicación de un proceso de secado, implica el aporte de calor a un material para producir un movimiento de materia desde su interior hacia el ambiente. Este fenómeno puede ser descrito claramente a través de la cinética de secado, la que se define como la representación de la evolución de las condiciones ambientales y de la madera en el transcurso del tiempo (**Ananías et al., 2005**). Dicho de otra forma, es la interpretación de la velocidad con que el agua es extraída del material a medida que aumenta el tiempo de residencia dentro de una cámara acondicionada apropiadamente para que se produzca este movimiento, con altas temperaturas y bajos niveles de humedad relativa.

Desde este punto de vista, el secado de madera puede ser representado por tres etapas. La primera etapa, comienza desde el contenido de humedad verde hasta el contenido de humedad crítico (CHC) y se caracteriza por un flujo libre de agua entre la superficie de la madera y el ambiente (velocidad de secado constante). En la segunda etapa, que tiene lugar desde el CHC hasta el *Punto de Saturación de las Fibras* (PSF), se ralentiza la tasa de secado porque el frente de evaporación ingresó al sólido, provocando una disminución pronunciada de la pendiente de la curva característica. Finalmente, la tercera etapa, que se inicia cuando el contenido de humedad de la madera alcanza el PSF y se detiene en el contenido de humedad de equilibrio (CHE), también denominado rango higroscópico (**Stamm, 1964; Siau, 1984; Skaar, 1988; Keey et al., 2000**), se caracteriza por una disminución notable de la tasa de secado, lo cual es reflejo del decaimiento exponencial de la curva de secado (**Pang, 1996; Ananías et al., 2005; Gatica et al. 2011**) (figura 2.1).

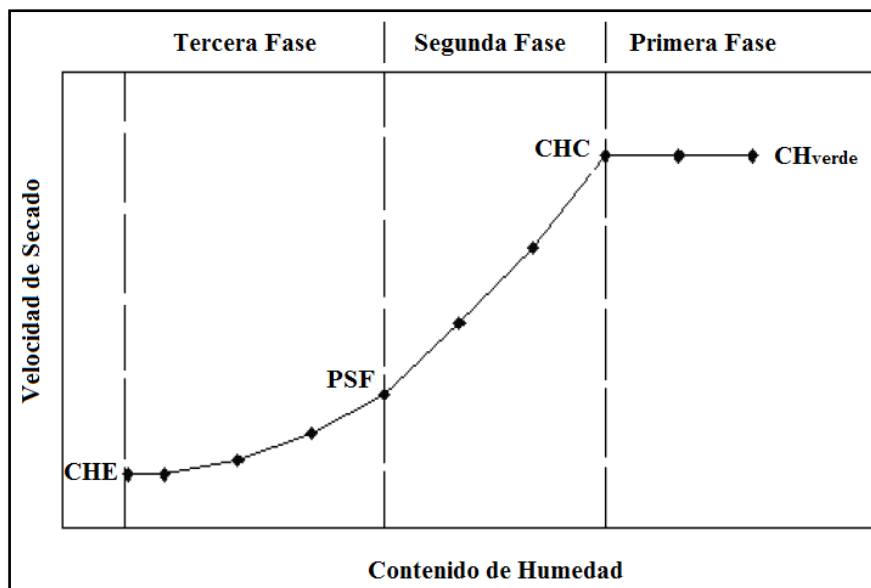


Figura 2.1. Fases del secado convencional.

Los mecanismos de transporte de masa asociados al proceso de secado pueden ser caracterizados de acuerdo al estado del agua en su interior (**Skaar, 1988**): agua líquida en las cavidades celulares y posiblemente en las paredes celulares, vapor de agua en las cavidades celulares, y agua ligada en las paredes celulares.

Cuando el contenido de humedad es superior al PSF, la humedad extraída está asociada al transporte de agua libre llevada a cabo principalmente por capilaridad. En esta etapa, puede suceder que el material falle por colapso, debido a que dentro de los lúmenes se pueden originar tensiones capilares tan altas que excedan la resistencia de las paredes celulares, produciéndose aplastamiento celular, que induce agrietamientos de diversa intensidad (**Siau, 1984**). Por otra parte, el movimiento de vapor sobre el PSF se vuelve importante sólo cuando existen grandes gradientes de presión asociados al proceso de secado, esto es, cuando se aplican altas temperaturas y cuando la madera es altamente permeable (**Skaar, 1988**). Por lo mismo, a bajas temperaturas de secado el movimiento de vapor al interior del material tiene una baja contribución.

Luego, avanzando en el proceso de secado a un punto inferior al PSF, el agua a ser extraída se encuentra ligada a las paredes celulares por grupos abundantes de hidroxilos (OH) libres de la celulosa y hemicelulosa (**Stamm, 1964; Siau, 1984; Bodig y Jayne, 1993; Keey et al., 2000; Vidal y Cloutier, 2005; Crespo et al., 2013**). No obstante lo anterior, cabe mencionar que no todos los grupos OH de la celulosa se encuentran disponibles para captar moléculas de agua, debido a su ordenamiento espacial (macromoléculas de celulosa ordenadas entre sí que constituyen estructuras

cristalinas) (**Simpson, 1980; Siau, 1984; Bodig y Jayne, 1993; Keey *et al.*, 2000**). Entonces, en esta etapa del secado, el transporte de humedad es de tipo difusivo, propiciado por gradientes de concentración (**Siau, 1984; Haque, 2007; Salinas *et al.*, 2013**). Por lo demás, para extraer dicha humedad se requiere de un aporte de energía adicional que permita romper las mencionadas ligaciones (**Simpson, 1980; Ananías *et al.* 2012**).

En base a lo mencionado previamente, es que la capacidad que posee el material para eliminar humedad durante el proceso de secado también funciona en sentido contrario, es decir, el material igualmente tiene la habilidad de captar humedad dentro del rango higroscópico (intervalo entre el PSF y el CHE). En este contexto, cuando la madera se expone a un ambiente cambiante de humedad relativa, éste ganará o cederá agua hasta lograr una condición estable de contenido de humedad. Además, si el ambiente se encuentra a temperatura constante, la relación entre la humedad relativa y el contenido de humedad de la madera se pueden caracterizar por medio de las denominadas isotermas de sorción: proceso conformado por la combinación de adsorción y desorción de vapor de agua (**Stamm, 1964**).

En particular, el fenómeno de sorción se identifica porque la isoterma de desorción es superior a la isoterma de adsorción (figura 2.2). Dicha diferencia entre ambas isotermas es conocida como histéresis y se produce porque mientras la madera se está secando, la hemicelulosa se está degradando (a 80°C aproximadamente), provocando que el material pierda potencial para captar la misma cantidad de humedad que en su momento cedió, puesto que dicho polímero es el componente más higroscópico que lo conforma (**Siau, 1984; Bodig y Jayne, 1993**). No obstante, hay que considerar que la humedad relativa y la temperatura no son los únicos factores influyentes en este fenómeno, porque las condiciones previas de secado y las características físico-químicas que forman parte del material, también son importantes, como por ejemplo: la densidad o la cantidad de extraíbles (**Skaar, 1972**).

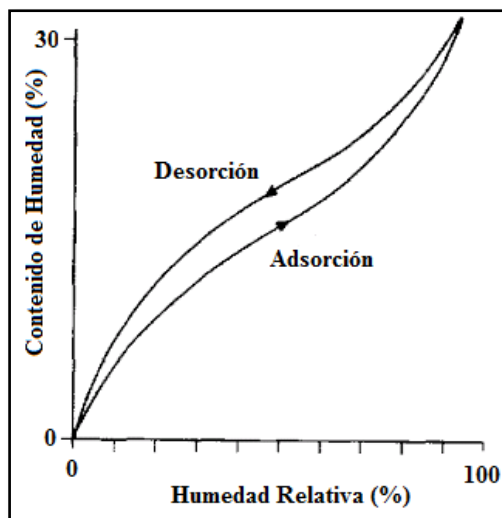


Figura 2.2. Isotermas de sorción de la madera a una temperatura determinada.

El *Pinus radiata*, que constituye el grupo de las coníferas presenta una configuración leñosa ordenada y simple, y está conformada principalmente por traqueidas, radios leñosos, células epiteliales y radiotraqueidas (Stamm, 1964; Fernández y Salvo, 2003) (figura 2.3). Debido a esto, esta especie posee gran facilidad para dejarse permear (Salvo *et al.*, 2004), permitiendo utilizar programas de secado dentro de un amplio intervalo de condiciones sicrométricas: 70/50°C - 140/90°C. Así lo han demostrado diferentes estudios realizados por Ananías *et al.* (2005); Haque (2007); Salinas *et al.* (2008); entre otros. No obstante, sus propiedades pueden variar fuertemente dependiendo de la zona analizada, por ejemplo: entre albura y duramen se pueden encontrar contenidos de humedad inicial (estado verde) que fluctúan entre 120-200% para albura y 40-50% para duramen; o densidades 1,4 veces mayor en albura que duramen (Haque, 2007).

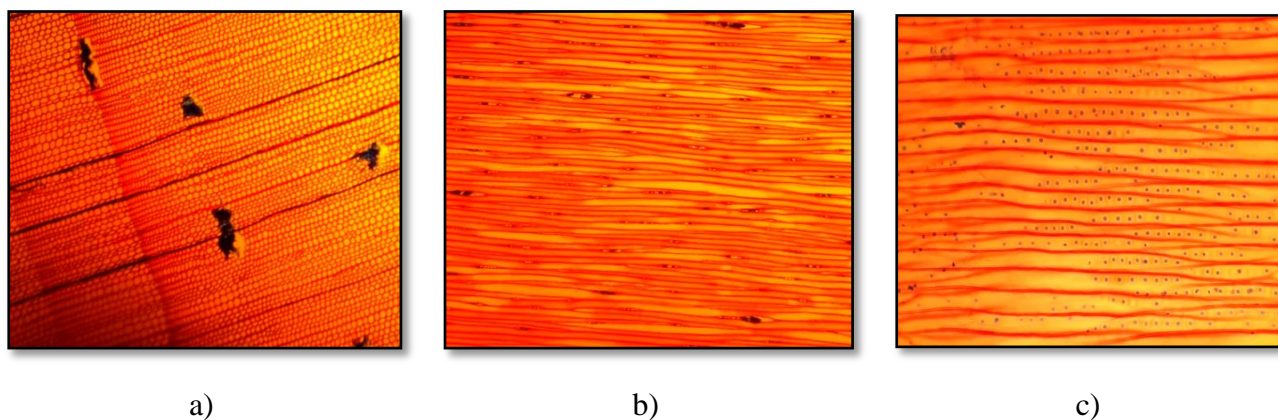


Figura 2.3. Planos principales de la madera de pino radiata: a) Plano transversal, b) Plano tangencial, c) Plano radial.

Afortunadamente, el pino radiata al presentar una estructura como la descrita en el párrafo anterior, no se ve afectada por agrietamientos superficiales e internos ni colapso, siendo dichas anomalías típicas de las especies latifoliadas (Siau, 1984; Peredo y Figueroa, 1992; Ananías *et al.*, 2001; Díaz-vaz, 2003; Moya y Muñoz, 2008; Miri y Madhoushi, 2013). No obstante, la madera central de pino radiata tiende a los alabeos durante el secado debido a la presencia de grano espiral (Haslett, *et al.* 1991).

La relevancia del pino radiata como especie forestal para Chile, radica en que ésta representa el 96% en la industria nacional del aserrío que produce más de 8,3 millones de metros cúbicos de madera aserrada, del cual el 30% corresponde a materia de exportación, siendo China, Corea del Sur y México; los principales mercados de destino (INFOR, 2016) (figura 2.4).

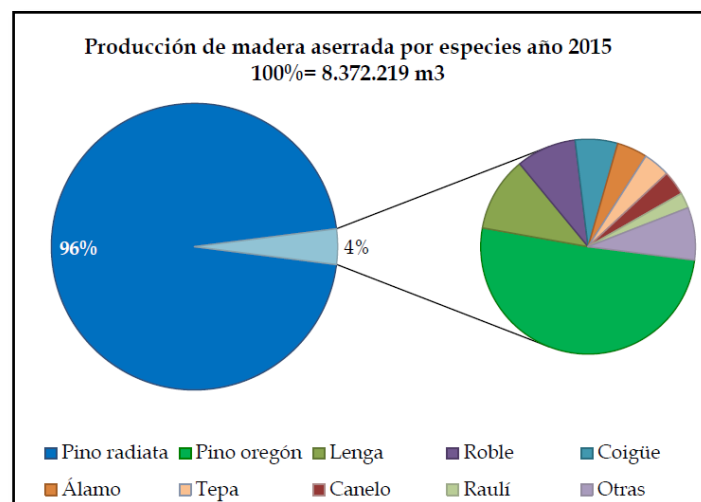


Figura 2.4. Producción de madera aserrada por especies.

Asimismo, se tiene que en el secado comercial, las tablas de madera aserrada se caracterizan por presentar una geometría bien definida; con un espesor, una anchura y un largo que de acuerdo a ello, pueden recibir distintos nombres. Es decir, si las tablas se fabrican con la dirección radial en el sentido del espesor, el material recibe el nombre de *madera floreada*. En cambio, si el espesor de la misma está conformada por la dirección tangencial, el material se conoce como *madera cuarteada* (Haygreen y Bowyer, 1982) (figura 2.5). Entonces, debido a que éstas son las únicas dos alternativas que se tienen para madera comercial (ya que la dirección longitudinal corresponde siempre al largo de las tablas), es que durante el proceso de secado la transferencia de calor y masa predomina en la dirección del espesor y vagamente en los bordes y extremos (Haque, 2007).

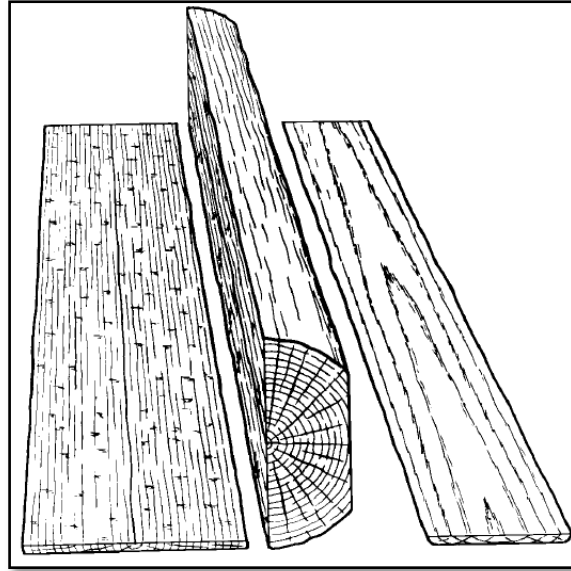


Figura 2.5. Tablas de madera aserrada: madera cuarteada (izquierda) y madera floreada (derecha).

Es así como este transporte de energía desde el ambiente de secado hacia la madera, genera gradientes de humedad al interior del material que provocan la aparición de tensiones, que al mismo tiempo, propician la generación de deformaciones que afectan directamente la utilización del material como elemento de construcción, disminuyendo su calidad y por consiguiente, su valor.

En este sentido, es importante considerar procesos adicionales al secado convencional que ayuden a aliviar dichas tensiones y permitan aumentar el valor comercial de la madera, ya que las exigencias del mercado nacional e internacional en el que se ve inmersa la industria maderera, son elevadas.

Por su parte, las deformaciones a las que pueden estar expuestas las piezas de madera se caracterizan por ser curvaturas producidas en distintas direcciones, ya sea a lo largo del eje longitudinal, transversal o ambos (**NCh993Of.72**); por lo tanto, dependiendo de la orientación reciben diferentes nombres. Sin embargo, el término general empleado para referirse a las deformaciones generadas en la madera independiente de la dirección en la que se produzcan, es: *alabeo*. En este contexto, la norma **NCh993Of.72** expresa lo siguiente:

Torcedura: alabeo helicoidal en la dirección longitudinal y transversal de las fibras. Esta deformación en forma de espiral, de caras y/o cantos, se mide como la separación del extremo a una superficie plana cuando el otro extremo está apoyado sobre dicha superficie (figura 2.6 a).

Arqueadura: alabeo de las caras en la dirección de las fibras. Esta deformación del plano de la cara, respecto de una línea recta que va de un extremo a otro de la pieza, se mide como la mayor distancia entre dicha línea y la pieza de madera (figura 2.6 b).

Encorvadura: alabeo de los cantos en el sentido de las fibras. Esta deformación del canto, respecto de una línea recta que va de un extremo a otro de la pieza, se mide como la mayor distancia entre dicha línea y la pieza de madera (figura 2.6 c).

Acanaladura: alabeo en dirección transversal a las fibras. Esta deformación del plano de la cara, respecto de una línea recta que va de un canto a otro de la pieza, se mide como la mayor distancia entre dicha línea y la pieza de madera (figura 2.6 d).

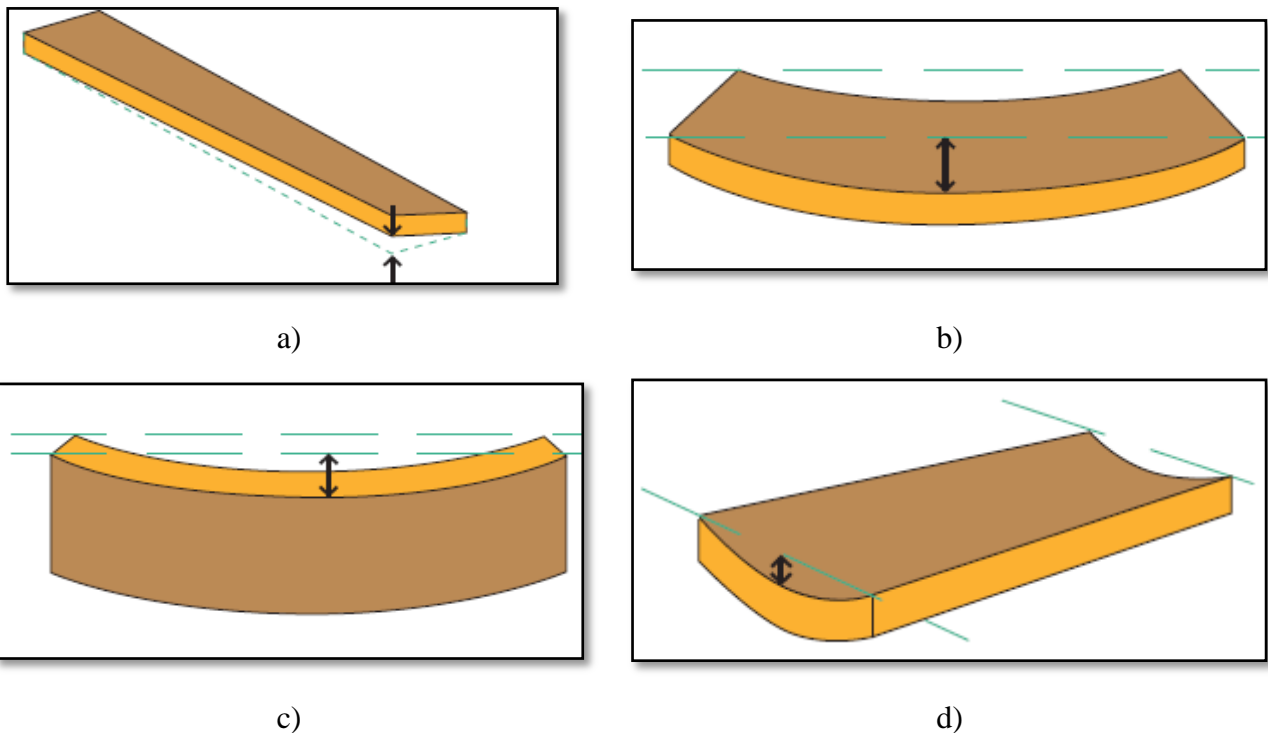


Figura 2.6. Alabeo en vigas de madera: a) Torcedura, b) Arqueadura, c) Encorvadura, d) Acanaladura.

Adicionalmente, es relevante destacar que la aparición de alabeos durante los procesos de secado se debe a las propiedades de contracción de la madera, por lo tanto, su aparición se debe más a una condición natural que un defecto propiamente tal (**Vásquez, 2005**). Sin embargo, el propósito de cada operación de secado es mantener estas deformaciones dentro de ciertos límites para evitar productos de calidad deficiente.

Por consiguiente, para disminuir las distintas deformaciones descritas previamente, existen estudios que recomiendan el empleo de un proceso de vaporizado posterior al secado convencional, con el propósito de liberar las tensiones internas generadas durante el proceso (**Espinosa, 2004**). En particular, el vaporizado consiste en aplicar vapor saturado a presión reducida a la cámara de secado, con el objetivo de neutralizar las tensiones de la madera producto de las altas temperaturas y humedades relativas, de forma que al rehumidificarse las capas superficiales de la madera, ésta se plastifica permitiendo la liberación de las tensiones (**Cofré, 2003**). Lo cual propicia también, la disminución de los alabeos.

En este sentido, **Guerrero (1997)** estudió el efecto del proceso de vaporizado en madera de pino radiata, señalando que dicho acondicionado se logra por la adición rápida de humedad mientras las tablas estén tibias luego del proceso de secado tradicional, porque sino el resultado únicamente será un aumento no deseado del contenido de humedad. Por lo tanto, mientras más caliente esté la madera, mayor será el alivio de las tensiones y por consiguiente, de las deformaciones.

Por otro lado, este acondicionado también puede ser aplicado antes del proceso de secado convencional con el objetivo de mejorar la calidad de la madera en términos de alabeos y agrietamientos; y acortar además, los tiempos de secado lo cual se traduce a una reducción en los consumos energéticos.

Particularmente, **Juacida et al. (2005)** estudiaron este fenómeno en madera de coigüe de Magallanes (*Nothofagus betuloides*) donde aplicaron vapor saturado a 40°C a un total de 150 tablas aserradas. Para ello, consideraron cuatro experimentos distintos: tres con un vaporizado inicial de diferente tiempo (4, 8 y 10 horas) y otro sin pre tratamiento, es decir, únicamente el secado convencional. Finalmente, concluyeron que a medida que el proceso de vaporizado se prolongaba (a 10 horas, específicamente), se lograban reducciones de los tiempos de secado en un 8%. No obstante, la calidad del secado resultó ser menos que regular, enmarcándolo dentro de un secado poco adecuado, ya que los alabeos fueron bastante incidentes.

En definitiva, se postula que la aplicación de vapor con alta temperatura permite recuperar los alabeos en la madera seca de pino radiata, puesto que la lignina contenida en la madera al alcanzar su estado visco-elástico (cerca de los 100°C) genera el reblandecimiento de ésta, lo cual, en combinación con contrapesos, genera la disminución de estas deformaciones. En este sentido, se emplean diferentes condiciones de operación con el propósito de determinar la efectividad del proceso de vaporizado y sobrecalentados.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Descripción del experimento

En el presente estudio es utilizada madera central seca de pino radiata proveniente de la empresa CMPC Maderas S.A., localizada en la Región del Bío-Bío, Chile; la cual ya fue tratada térmicamente con un secado artificial (120/70°C), un contrapeso de 1,5 (ton/m²) y una velocidad de aire circundante de 7 (m/s); seguido de un tratamiento de acondicionado con vapor saturado a 100°C, durante 6 horas. Las vigas aserradas y cepilladas, tienen las siguientes dimensiones: 41 (mm) x 138 (mm) x 3,2 (m) (espesor, ancho y largo, respectivamente) (figura 3.1); y la realización de los experimentos en la Universidad del Bío-Bío, fue cuatro meses posterior al tratamiento térmico realizado por la empresa CMPC Maderas S.A.



Figura 3.1. Vigas de madera de pino radiata.

En primer lugar, antes del vaporizado, se controlan los alabeos y propiedades de interés, tales como: masa, contenido de humedad y dimensiones. Luego, la madera es ingresada a un equipo de secado marca Neumann modelo LAB-3.5e, localizado en el Laboratorio de Tecnología de Secado de la Universidad del Bío-Bío, donde es tratada térmicamente con un proceso de acondicionado a distintas cargas (1,5 y 3,0 toneladas por metro cuadrado), temperaturas de ambiente (100°C - 140°C - 160°C) y tiempos de aplicación (3, 6 y 12 horas). Luego, se reitera el control de las variables de interés: alabeos, masa, contenido de humedad y dimensiones; y mediante un análisis exhaustivo es posible determinar el efecto del proceso de vaporizado sobre las vigas de pino radiata. El ambiente de secado es acondicionado a una temperatura bulbo húmeda de 100°C y temperaturas secas según

se indica en la tabla 3.1 Dicho equipo secador tiene una capacidad de 3,5 (m³), posee un rango de temperaturas de trabajo entre 0 y 250°C y una capacidad de vaporizado de hasta 100 (kg/h) (figura 3.2).



Figura 3.2. Equipo secador marca Neumann.

En este contexto, se realizan 9 ensayos de vaporizado, de los cuales 6 consideran una temperatura de aplicación, y los otros 3 consideran dos temperaturas con diferentes tiempos. Para cada ensayo mencionado, se utilizan 28 piezas de madera, necesitando 252 unidades para cubrir la totalidad de los experimentos.

En síntesis, la tabla 3.1 resume el diseño experimental para el presente estudio.

Tabla 3.1. Diseño experimental.

Ensayo	Sobre peso (ton/m ²)	Temperatura (°C)		Tiempo (h)	
		T ₁	T ₂	t ₁	t ₂
1	1,5	100	-	6	-
2	1,5	100	-	6	-
3	3	100	-	6	-
4	3	100	-	6	-
5	1,5	100	-	3	-
6	1,5	100	-	12	-
7	1,5	100	140	6	0,5
8	1,5	100	140	6	2
9	1,5	100	160	6	0,5

A continuación, se procede a clasificar las piezas de madera pre y post tratadas térmicamente de acuerdo a lo expresado por la Norma Chilena **NCh993Of.72**, con el propósito de especificar el estado de las vigas en temas de deformación (tabla 3.2). En este contexto, se tiene lo siguiente:

Tabla 3.2. Clasificación de calidad de alabeos.

Nivel de clasificación	Torcedura (mm)	Arqueadura (mm)	Encorvadura (mm)	Acanaladura (mm)
Sin defectos (SD)	0	0	0	0
Leve (L)	0,05*a=6,9	20	5,5	0,02*a=2,76
Moderado (M)	0,1*a=13,8	40	11	0,04*a=5,52
Severo (S)	0,15*a=20,7	60	16,5	0,06*a=8,28
Inaceptable (I)	>20,7	>60	>16,5	>8,28

donde: a=ancho de la pieza=138 (mm).

Observación: Los valores obtenidos en la tabla 3.2 son válidos para tablas de 3,2 (m) de largo.

Por otra parte, se mide la humedad de la madera en cada una de las piezas ensayadas antes y después del tratamiento por método de resistencia eléctrica de acuerdo con la Norma Chilena **NCh176/1**, usando un instrumento Delmhortz DMR3. Igualmente, se mide la densidad actual de piezas ensayadas en base a la Norma **NCh176/2**.

Descripción del Análisis Estadístico

Para esto, se considera el empleo de una herramienta estadística que permite determinar la existencia de diferencia significativa entre los diferentes ensayos realizados. En particular, se trata de la aplicación de un Análisis de Varianza (ANOVA) en un factor, el cual considera "a" grupos independientes con "b" repeticiones (tabla 3.3).

Tabla 3.3. Relación entre tratamientos y repeticiones.

Tratamientos	Repeticiones			
1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1b}
2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2b}
⋮				
a	x_{a1}	x_{a2}	...	x_{ab}

El ANOVA usa el concepto de hipótesis estadística, lo cual corresponde a una afirmación (veraz o falsa) acerca de una población en particular. Específicamente, las hipótesis se basan en el resultado logrado adoptando la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis principal, que en estadística se conoce como: Hipótesis Nula (H_0) (Montgomery, 2004). En consecuencia, se tiene:

H_0 : Hipótesis nula (asociada a lo que se cree o piensa de algún parámetro).

H_1 : Hipótesis alternativa (hipótesis de trabajo).

Por lo mismo, se está sujeto a cometer dos tipos de errores:

- Error Tipo I (α): es el error que se comete al rechazar H_0 cuando H_0 es verdadera.
- Error Tipo II (β): es el error que se comete al aceptar H_0 cuando H_0 es falsa.

Por otro lado, un ANOVA requiere el empleo de un intervalo de confianza que tiene por finalidad establecer la seguridad de mantener al verdadero valor del parámetro dentro de dichos niveles. En otras palabras, es un intervalo dentro del cual cabría esperar que esté incluido el valor del (o los) parámetro(s) en cuestión.

Para definir un intervalo de confianza, hay que suponer que θ es un parámetro desconocido. Para obtener una estimación del intervalo de θ , es necesario encontrar dos estadísticos L y U tales que la declaración de probabilidad

$$P(L \leq \theta \leq U) = 1 - \alpha \quad (1)$$

sea verdadera. Al intervalo $L \leq \theta \leq U$ se le llama intervalo de confianza de $100(1 - \alpha)\%$ para el parámetro θ . La interpretación de este intervalo es que si, en muestreos aleatorios repetidos, se construye gran número de estos intervalos, $100(1 - \alpha)\%$ de ellos contendrán el verdadero valor de θ . En este sentido, $1 - \alpha$ se le llama el coeficiente de confianza. Por ejemplo, si α es igual a 0,05 el intervalo de confianza para θ será 95%.

Nótese que los intervalos de confianza tienen una interpretación de frecuencia, vale decir, no se sabe si la declaración es verdadera para esta muestra específica, pero sí se sabe que el método usado para generar el intervalo de confianza produce declaraciones correctas en $100(1 - \alpha)\%$ de las veces (Montgomery, 2004).

Dado que a través del ANOVA se persigue saber si los distintos niveles de un factor influyen en los valores de una variable continua para que efectivamente haya diferencias según el nivel del factor, se tiene que dar simultáneamente que la variación dentro de los tratamientos sea mínima y que la variación entre tratamientos sea máxima. Por lo tanto, el ANOVA se basa no sólo en la descomposición de la variación total, sino además en la comparación de la variación entre tratamientos y la variación dentro de tratamientos, teniendo en cuenta sus correspondientes grados de libertad.

Resumiendo, la tabla ANOVA es la que se muestra a continuación:

Tabla 3.4. ANOVA.

Variación	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	F_c	$F_t = F(a-1;a(b-1)); (1-\alpha)$
Entre tratamiento	$a - 1$	$\hat{S}_B^2 = \frac{V_B}{a - 1}$	$F_c = \frac{\hat{S}_B^2}{\hat{S}_W^2}$	"Este valor se obtiene de tablas de distribución F de Fisher"
Dentro tratamiento	$a (b - 1)$	$\hat{S}_W^2 = \frac{V_W}{a (b - 1)}$		

Al observar la tabla 3.4, se tiene que \hat{S}_B^2 y \hat{S}_W^2 corresponden al cuadrado medio de la variación entre y dentro del tratamiento, respectivamente. Así también, V_B y V_W son las varianzas entre y dentro del tratamiento, respectivamente.

En concreto se tiene que la varianza total es:

$$\boxed{V = V_B + V_W} \tag{2}$$

donde:

$$V = \sum_{j,k} (x_{jk} - \bar{x})^2 \tag{3}$$

$$V_B = b \sum_j^a (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \tag{4}$$

$$V_W = \sum_{j,k} (x_{jk} - \bar{x}_j)^2 \tag{5}$$

En particular, \bar{x} es la media total, x_{jk} es el elemento j-k ésimo, y \bar{x}_j es la media del tratamiento j. Matemáticamente:

$$\bar{x} = \frac{1}{ab} \sum_{j,k} x_{jk} \quad (6)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{b} \sum_{k=1}^b x_{jk} \quad (7)$$

Un valor elevado de F_c significa que mayores son las diferencias entre los distintos grupos (o tratamientos), cumpliéndose asimismo que la variación dentro de cada grupo sea mínima, y en consecuencia, la probabilidad de que los niveles del factor influyan en los valores de la variable continua es mayor.

Dado que dicho cociente (F_c) se distribuye como una función F de Fisher con $a-1; a(b-1)$ grados de libertad, el valor para el cual se puede asumir que sí existen efectos diferenciales entre los niveles dependerá del valor de tablas de la función F para un cierto nivel de significación. Si el valor calculado es mayor que el valor de tablas ($F_c > F_t$), significa que sí hay efectos diferenciales entre los grupos (o tratamientos), y por lo tanto, se acepta la hipótesis de que existe dependencia entre las variables.

Por el contrario, si el valor calculado es inferior al valor de las tablas ($F_c < F_t$), se acepta que no existen efectos diferenciales entre los grupos. En otras palabras: $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$

Así, la hipótesis nula (H_0) a contrastar a través del ANOVA puede ser establecida como igualdad de efectos: $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$, siendo la hipótesis alternativa (H_1) que alguno de los efectos diferenciales sea distinto: $H_1: \mu \neq \mu_j$.

En definitiva, la Región Crítica está dada por: $R. C. = \{F_c/F_c > F_t\}$, donde:

Si $F_c > F_t \rightarrow H_1$ (existe diferencia entre los tratamientos).

Si $F_c < F_t \rightarrow H_0$ (no existe diferencia entre los tratamientos).

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados Experimentales

Enseguida se muestran los resultados pre y post tratamiento térmico aplicado a las piezas de madera de pino radiata, lo cual entregará a priori, una idea del efecto que ocasiona sobre el material.

Nótese que la acanaladura es la única deformación que no se observa gráficamente, ya que la totalidad de la madera estudiada no se vio afectada por dicha deformación, ni antes ni después del tratamiento térmico, por lo tanto no requiere mayor análisis que el que se comenta en este párrafo. Lo anterior puede deberse al elevado espesor de las vigas de madera (41 mm).

A continuación, se observa el efecto del vaporizado sobre las piezas ensayadas durante el experimento n°1. En este sentido, la torcedura y la arqueadura lograron reducirse en promedio un 50,94% y 37,16%, respectivamente. En cambio, la encorvadura aumentó luego del tratamiento en un 9,04% (figura 4.1). Del mismo modo, se tiene que las torceduras presentadas por las vigas antes del tratamiento se vieron totalmente disminuidas luego de aplicar el vaporizado a 100 (°C) durante 6 horas. En cambio, la arqueadura no logró reducirse completamente en todas las piezas, ya que sólo a un 32% se benefició y a un 18% le afectó; el otro 50% se vio indiferente al proceso, vale decir, a estas vigas no le ayudó ni perjudicó el tratamiento térmico. Finalmente, la encorvadura también estuvo presente logrando 39% de piezas mejoradas, un 39% empeoradas y un 22% indiferentes (tabla A.4.1.1 y figura A.4.2.1, Anexo A).

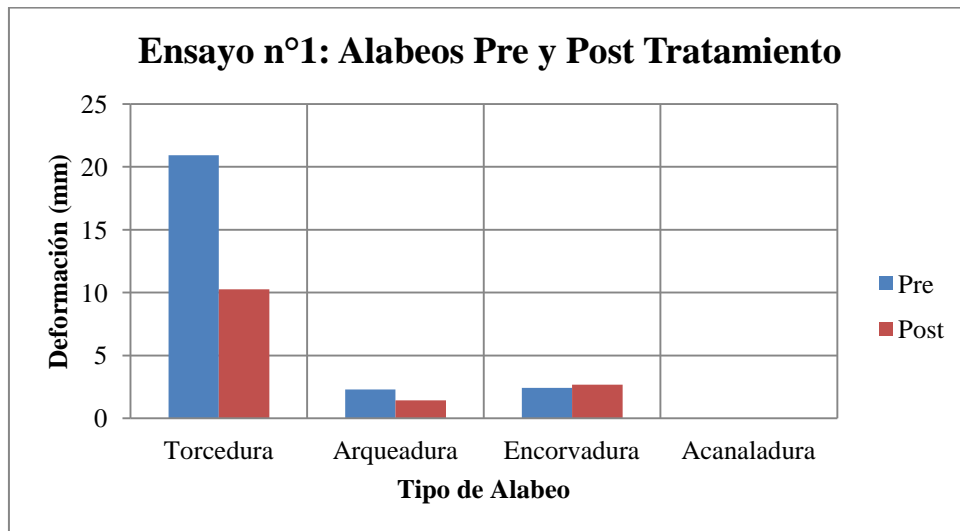


Figura 4.1. Ensayo n°1: Alabeos pre y post tratamiento.

En la figura 4.2, se grafican los defectos de las piezas pre y post tratadas térmicamente en el segundo ensayo. En resumen, la torcedura es la única deformación que se redujo con la aplicación de vapor, disminuyendo un 24,56% en promedio. No obstante, la arqueadura y encorvadura se vieron incrementadas en un 60% y 11,08% al término del proceso, respectivamente.

De igual manera, se tiene que la torcedura disminuyó en un 79% de las piezas y aumentó en un 21% producto del vaporizado (independiente de su magnitud). Por otra parte, la arqueadura presentada antes del tratamiento se vio aliviada en el 18% del total de piezas ensayadas; en cambio para el 32% este defecto se incrementó y para el resto fue indiferente (50%). Por último, la encorvadura mejoró y empeoró las vigas en un 32% y 50%, respectivamente, existiendo un 18% de piezas que no se vieron afectadas por el proceso de acondicionamiento (tabla A.4.1.2 y figura A.4.2.2, Anexo A).

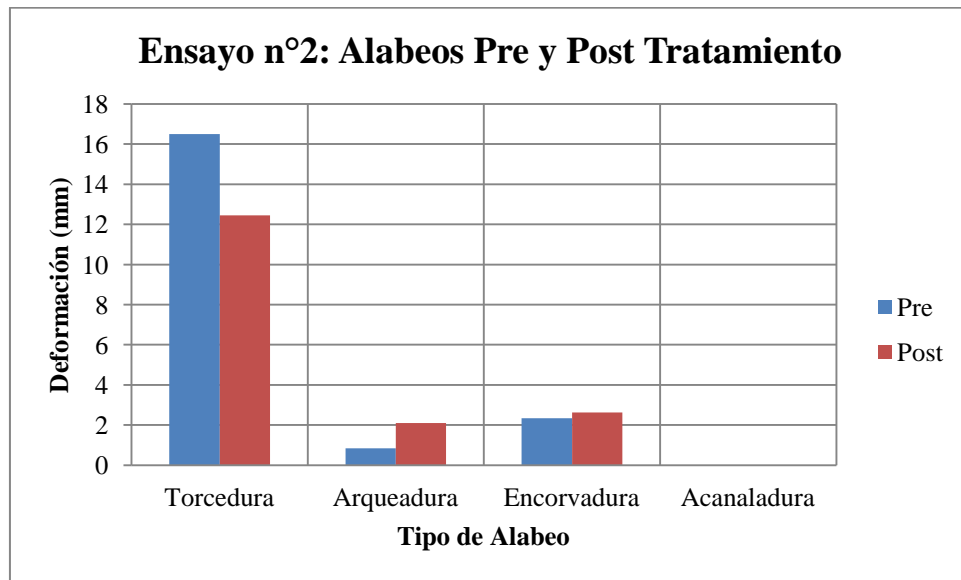


Figura 4.2. Ensayo n°2: Alabeos pre y post tratamiento.

A continuación, en la figura 4.3 se muestra la variación de los alabeos durante el tercer experimento. Al igual que el ensayo anterior, la torcedura es el único defecto que se redujo con el tratamiento térmico, aliviándose en un 56,82% promedio. Por el contrario, la arqueadura y la encorvadura aumentan en un 52,91% y 12,44%, respectivamente.

Ahora, el detalle del resultado del experimento n°3 (tabla A.4.1.3 y figura A.4.2.3, Anexo A) arroja que el nivel de torceduras se reduce en el 96% de las piezas tratadas térmicamente, por lo tanto, para el 4% restante fue pernicioso. Luego, la arqueadura de las vigas durante este ensayo, sólo disminuyó en el 11% de las mismas, aumentando en el 32%; por ende, para el otro 57% el vaporizado no tuvo ningún efecto provechoso ni perjudicial. Por su parte, la encorvadura de las piezas afectó de manera positiva y negativa al 18% y 54%, respectivamente, comportándose el otro 28% de las piezas indiferente al proceso de acondicionado.

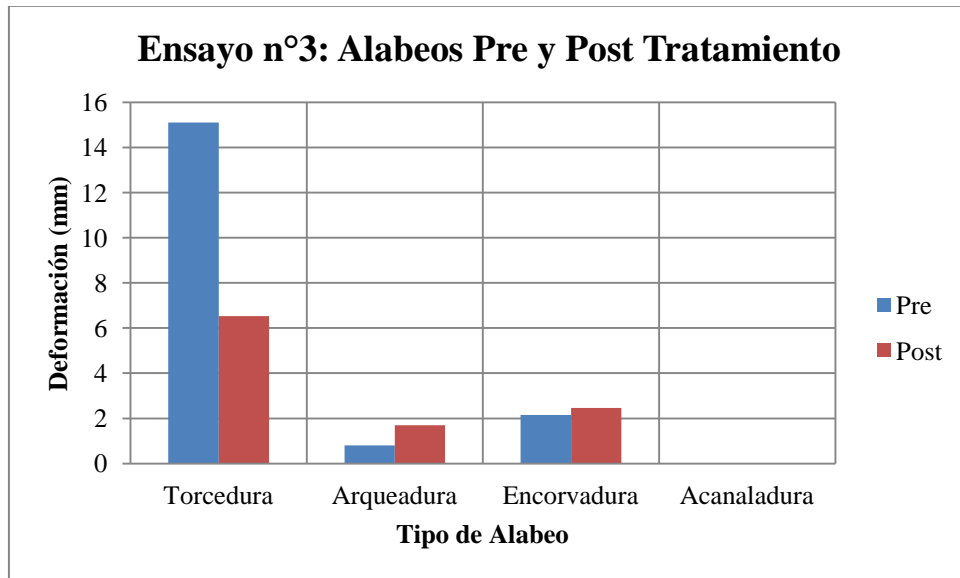


Figura 4.3. Ensayo n°3: Alabeos pre y post tratamiento.

Los resultados del ensayo n°4 muestran que la torcedura se recuperó en un 49,39% luego del proceso de acondicionado, disminuyendo las deformaciones desde 12,33 (mm) hasta 6,24 (mm) en promedio. Por el contrario, los alabeos que se potenciaron con el vaporizado son la arqueadura y la encorvadura, aumentando en un 37,08% y 35,38%, respectivamente (figura 4.4).

En este contexto, se observa que el nivel de torceduras disminuyó en la gran mayoría de las piezas tratadas (96%), siendo la menor parte (4%) la que resultó afectada por el proceso. Por su parte, la arqueadura sólo logró aliviar al 18% de las piezas, perjudicando a la mayoría de éstas (64%). Asimismo, la medición de la encorvadura en este ensayo arroja como resultado que el 25% de las vigas se benefició con el vaporizado, siendo la mayoría de éstas afectadas (54%). Por otro lado, al igual que los ensayos anteriores, hubieron piezas de madera que se vieron indiferentes al proceso de acondicionado en términos de arqueadura (18%) y encorvadura (21%) (tabla A.4.1.4 y figura A.4.2.4, Anexo A).

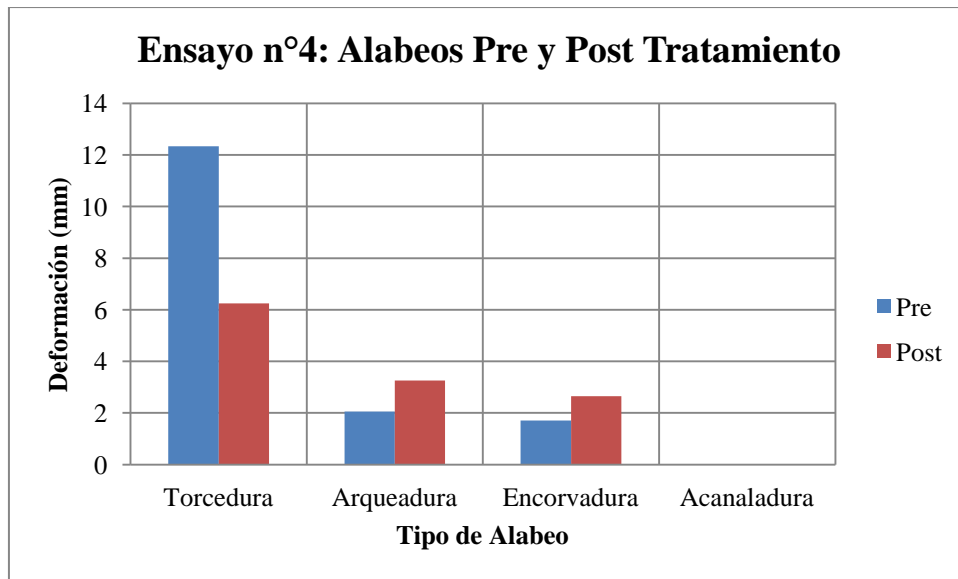


Figura 4.4. Ensayo n°4: Alabeos pre y post tratamiento.

Luego, el ensayo n°5 asociado a un vaporizado único a 100°C durante 3 horas, logró disminuir la torcedura de piezas desde 13,71 (mm) hasta 8,86 (mm) en promedio, lo cual corresponde a un 35,37%. Por otro lado, la arqueadura se mantuvo prácticamente intacta ya que las vigas empeoraron luego del vaporizado en un 3,15%. En cambio, la encorvadura se vio afectada de manera negativa, incrementándose en un 28,15% con respecto al daño existente antes del tratamiento (figura 4.5).

Particularmente, los resultados asociados al quinto experimento de medición de alabeos muestran que el 89% de las vigas de madera logró disminuir las torceduras mientras que el otro 11% las aumentó. Por otro lado, la arqueadura se vio aliviada en el 32% de las piezas, ya que el 29% de ellas se produjo una mayor curvatura después del tratamiento y el 39% restante resultó mantenerse intacto al finalizar el proceso. Por último, se tiene que sólo el 29% de las piezas se vieron beneficiadas luego del vaporizado en términos de encorvadura, debido a que la mayoría empeoró (68%). En este sentido, apenas al 3% resultó indistinta a la aplicación del tratamiento porque la encorvadura no aumentó ni disminuyó (tabla A.4.1.5 y figura A.4.2.5, Anexo A).

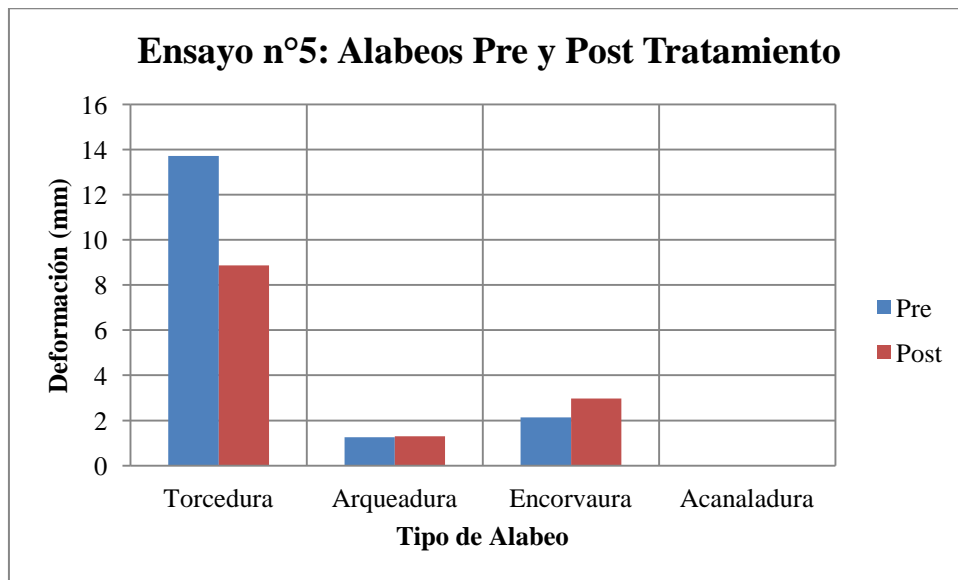


Figura 4.5. Ensayo n°5: Alabeos pre y post tratamiento.

El experimento n°6 consideró un vaporizado de 12 horas donde sólo mejoraron las piezas en términos de torcedura, vale decir, las piezas recuperaron este defecto desde 12,54 (mm) hasta 6,03 (mm) en promedio, lo que equivale a un 51,86%. Nuevamente, la arqueadura y encorvadura se vieron afectadas por el proceso de vaporizado, acrecentándose dichas deformaciones en un 10,88% y un 11,98%, respectivamente (figura 4.6).

En este mismo contexto, se observa que los resultados logrados durante el experimento señalan que las torceduras también disminuyeron en su gran mayoría luego del proceso de vaporizado (93%), existiendo un 7% que no logró beneficiarse con el tratamiento. Por otra parte, la arqueadura disminuyó en el 57% de las piezas, viéndose afectadas un 39% y un 4% indiferente. En cambio, el fenómeno de encorvadura arrojó como consecuencia que la mitad de las vigas se beneficiaron con el vaporizado y para la otra mitad fue perjudicial (tabla A.4.1.6 y figura A.4.2.6, Anexo A).

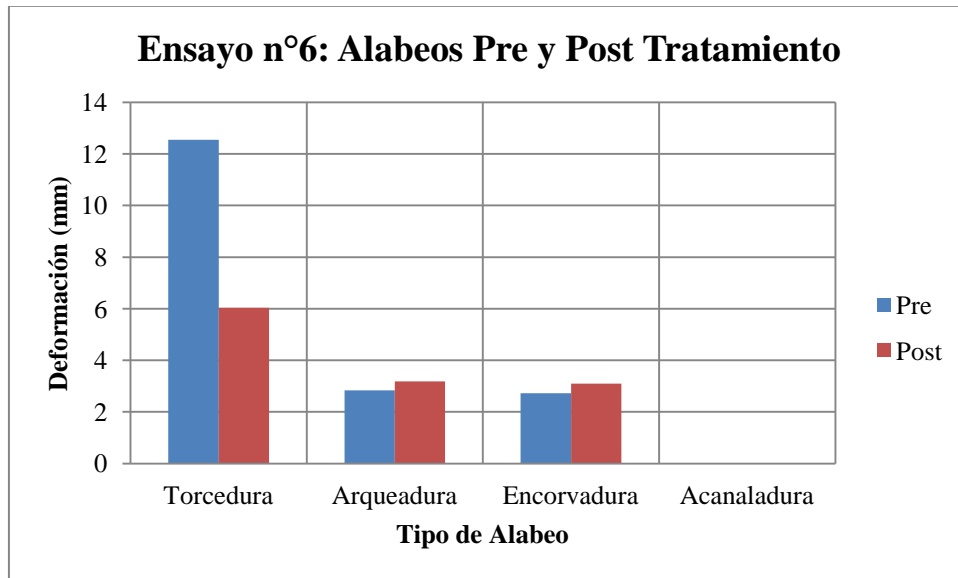


Figura 4.6. Ensayo n°6: Alabeos pre y post tratamiento.

Por otro lado, el ensayo n°7 obtuvo resultados similares a los mostrados entre los ensayos 2 y 6, es decir, el proceso de vaporizado disminuyó la torcedura de las piezas pero empeoró la calidad de ellas en términos de arqueadura y encorvadura. En efecto, la figura 4.7 detalla lo recientemente mencionado, donde la torcedura de las vigas se vieron aliviadas en un 39,05% desde 14,11 (mm) hasta 8,60 (mm) en promedio. Por su parte, la arqueadura aumentó en un 24,16% y la encorvadura en un 13,42%.

Particularmente, en este ensayo se puede observar como las torceduras, arqueaduras y encorvaduras disminuyeron en un 96%, 54% y 29% de las piezas, respectivamente. La madera restante tuvo una deformación mayor luego del proceso de vaporizado: 4% (torcedura), 46% (arqueadura) y 71% (encorvadura) (tabla A.4.1.7 y figura A.4.2.7, Anexo A).

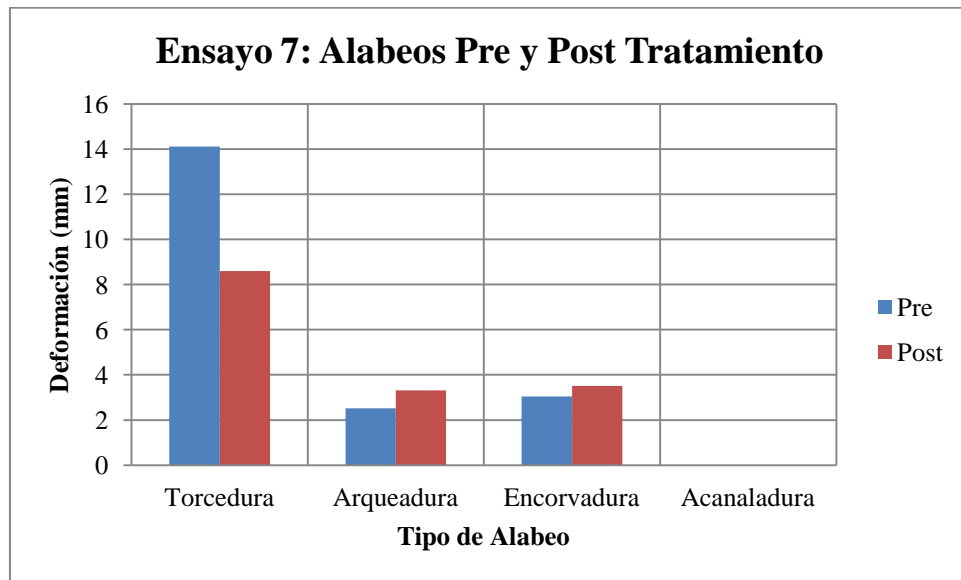


Figura 4.7. Ensayo n°7: Alabeos pre y post tratamiento.

El octavo experimento arrojó resultados similares a los logrados en el experimento n°1. En concreto, el tratamiento térmico alivió las torceduras y las arqueaduras en un 51,08% y un 8,29%, respectivamente. Caso contrario es lo ocurrido con la encorvadura ya que el proceso de vaporizado aumentó este defecto en un 6,94% promedio (figura 4.8).

Por otro lado, el resultado de este experimento indica que el 100% de las vigas disminuyó las torceduras luego del vaporizado. Sin embargo, la arqueadura sólo tuvo el 61% de las muestras beneficiadas, mientras que el 39% empeoró al término del proceso. En último lugar, la encorvadura logró disminuir en el 39% de las piezas, mientras que el 57% aumentó su defecto y un 4% no se vio influenciado por el tratamiento térmico (tabla A.4.1.8 y figura A.4.2.8, Anexo A).

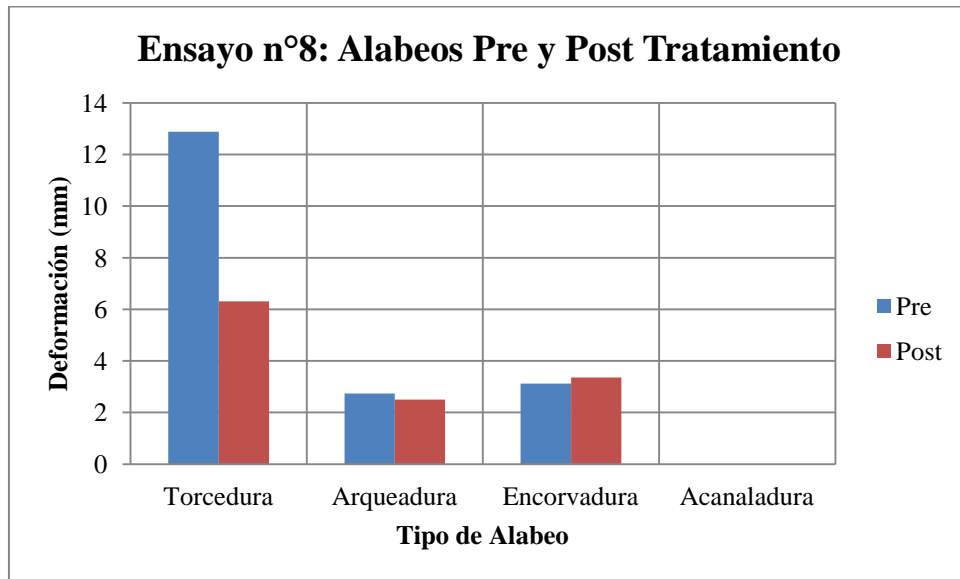


Figura 4.8. Ensayo n°8: Alabeos pre y post tratamiento.

Finalmente, la figura 4.9 destaca el resultado logrado en el último ensayo. En particular, al igual que el primer y octavo experimento la torcedura y la arqueadura fueron aliviadas después del tratamiento, disminuyendo en un 10,30% y en un 16,54%, respectivamente. La encorvadura, por su parte, fue el alabeo que empeoró posterior al vaporizado acrecentándose en un 8,77% promedio.

En este ensayo el 68% de las piezas de madera logró disminuir su torcedura, siendo un 32% afectado por la aplicación de vapor. En cambio, la arqueadura y la encorvadura lograron disminuir en el 54% de las piezas, empeorando esta condición en el 46% restante producto del aumento de dichas deformaciones (tabla A.4.1.9 y figura A.4.2.9, Anexo A).

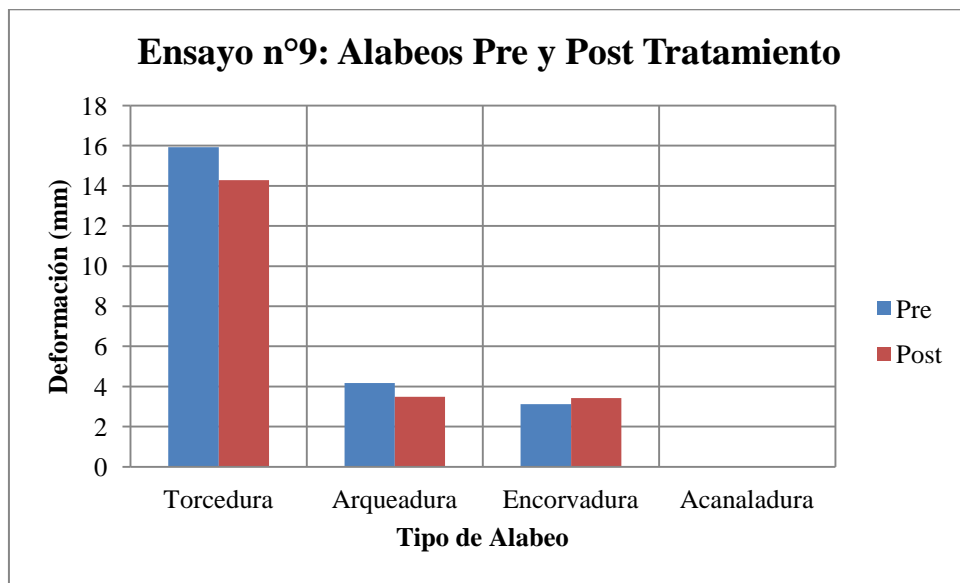


Figura 4.9. Ensayo n°9: Alabeos pre y post tratamiento.

La tabla que se muestra a continuación (tabla 4.1), aparte de resumir los resultados presentados anteriormente, tiene el propósito de indicar cuál es el programa de vaporizado más adecuado para aliviar los alabeos de las piezas de madera.

En este sentido, y sin mayores antecedentes que los empleados hasta ahora, se puede concluir a priori que los mejores programas de vaporizado son: n°1, n°8 y n°9, ya que son los únicos que lograron disminuir dos alabeos (torcedura y arqueadura), a diferencia del resto que aliviaron uno (torcedura) y empeoraron dos (arqueadura y encorvadura).

Tabla 4.1. Resumen de alabeos post tratamiento.

Ensayo	Torcedura	Arqueadura	Encorvadura	Acanaladura
1	o	o	x	-
2	o	x	x	-
3	o	x	x	-
4	o	x	x	-
5	o	x	x	-
6	o	x	x	-
7	o	x	x	-
8	o	o	x	-
9	o	o	x	-

o: mejoramiento de alabeo post tratamiento.

x: empeoramiento de alabeo post tratamiento.

-: sin efecto.

Entonces, establecidos los límites de clasificación de calidad para las vigas de madera ensayadas, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 4.2. Clasificación de calidad de alabeos de acuerdo a la norma NCh993Of.72.

Ensayo	Torcedura									
	Pre tratamiento					Post tratamiento				
	SD	L	M	S	I	SD	L	M	S	I
1	0	0	3	13	12	0	4	20	3	1
2	0	0	6	18	4	0	3	16	5	4
3	0	0	12	14	2	2	14	11	1	0
4	0	1	18	8	1	0	17	11	0	0
5	0	1	13	13	1	0	10	16	2	0
6	0	3	14	11	0	2	15	11	0	0
7	0	1	10	17	0	0	6	21	1	0
8	0	0	20	7	1	0	17	11	0	0
9	0	0	6	20	2	0	0	14	11	3
Σ (un)	0	6	102	121	23	4	86	131	23	8
Participación (%)	0	2	41	48	9	2	34	52	9	3

Tabla 4.3. Clasificación de calidad de alabeos de acuerdo a la norma NCh993Of.72.

Ensayo	Arqueadura									
	Pre tratamiento					Post tratamiento				
	SD	L	M	S	I	SD	L	M	S	I
1	18	10	0	0	0	20	8	0	0	0
2	20	8	0	0	0	18	10	0	0	0
3	21	7	0	0	0	19	9	0	0	0
4	16	12	0	0	0	8	20	0	0	0
5	14	14	0	0	0	16	12	0	0	0
6	4	24	0	0	0	2	26	0	0	0
7	3	25	0	0	0	0	28	0	0	0
8	0	28	0	0	0	0	28	0	0	0
9	1	27	0	0	0	0	28	0	0	0
Σ (un)	97	155	0	0	0	83	169	0	0	0
Participación (%)	38	62	0	0	0	33	67	0	0	0

Tabla 4.4. Clasificación de calidad de alabeos de acuerdo a la norma NCh993Of.72.

Ensayo	Encorvadura									
	Pre tratamiento					Post tratamiento				
	SD	L	M	S	I	SD	L	M	S	I
1	13	11	4	0	0	11	13	4	0	0
2	8	19	1	0	0	10	16	1	1	0
3	11	0	16	1	0	11	0	15	2	0
4	14	13	1	0	0	7	19	2	0	0
5	7	21	0	0	0	1	26	1	0	0
6	2	26	0	0	0	1	27	0	0	0
7	0	27	1	0	0	0	27	1	0	0
8	0	26	2	0	0	0	26	2	0	0
9	1	25	2	0	0	0	25	3	0	0
Σ (un)	56	168	27	1	0	41	179	29	3	0
Participación (%)	22	67	11	0	0	16	71	12	1	0

Tabla 4.5. Clasificación de calidad de alabeos de acuerdo a la norma NCh993Of.72.

Ensayo	Acanaladura									
	Pre tratamiento					Post tratamiento				
	SD	L	M	S	I	SD	L	M	S	I
1	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
2	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
3	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
4	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
5	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
6	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
7	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
8	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
9	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
Σ (un)	252	0	0	0	0	252	0	0	0	0
Participación (%)	100	0	0	0	0	100	0	0	0	0

De lo anterior, se puede mencionar que la aplicación del tratamiento térmico fue capaz de mejorar la calidad de las vigas de madera en todos los experimentos realizados, siendo el ensayo n°1 el que consiguió disminuir de manera importante la cantidad de piezas con torceduras severas e inaceptables, desde un 89% hasta un 14%. No obstante, los ensayos 4, 6 y 8 lograron eliminar las torceduras de esa calidad en su totalidad (tabla 4.2).

Por otro lado, las vigas no presentaron arqueaduras con daño moderado, severo o inaceptable en ningún ensayo, ni antes ni después del tratamiento térmico. Por lo tanto, todas las piezas se mantuvieron dentro del margen: sin defecto y/o leve (tabla 4.3).

En este marco, la encorvadura sólo presentó daños hasta el nivel moderado, a excepción del ensayo n°2 que obtuvo un 4% de piezas con daño severo post tratamiento y el ensayo n°3 que tuvo un 4% de daño severo antes del tratamiento y un 7% al finalizar el mismo. Por último, el nivel inaceptable fue alcanzado por ninguna pieza en ningún experimento (tabla 4.4).

Finalmente, como se mencionó en la parte superior de los resultados experimentales, la acanaladura es el único alabeo que no se presentó. Por eso, la totalidad de las vigas están enlistadas bajo el esquema SD (sin defecto) (tabla 4.5).

Anteriormente se mostraron los resultados del post tratamiento para los diferentes tipos de abaleos que se presentan en las vigas de madera producto del secado artificial. Sin embargo, los resultados indicados sólo reflejan la capacidad que posee el proceso de vaporizado para aliviar las deformaciones en dichas vigas. además de clasificarlas en distintos niveles de deformación.

No obstante, para representar de mejor forma la eficiencia del proceso es necesario definir las evaluaciones en base a coeficientes e índices que indiquen de manera precisa la calidad de la recuperación de los alabeos.

En base a los niveles de calidad establecidos en la metodología, se puede observar que una madera de calidad óptima (libre de defectos) se obtiene cuando el alabeo es nulo (tabla 3.2). Por lo tanto, en ese caso puede referirse a la madera como un material ideal en términos de deformación, debido que no existe dicha anomalía. Sin embargo, para que las vigas presenten un alabeo nulo es un tanto complejo ya que este material es sensible a deformarse luego del proceso de secado tradicional. Por este motivo, se establece como *valor máximo admisible de alabeo* (A_{adm}) el nivel de clasificación "leve", es decir, todo alabeo inferior a dicho nivel se considera como aceptable, y por ende, una madera apta para su comercialización. En concreto:

Tabla 4.6. Valores máximos admisibles de alabeos.

	Torcedura (mm)	Arqueadura (mm)	Encorvadura (mm)	Acanaladura (mm)
Valor máximo admisible	6,9	20	5,5	2,76

A continuación, se define un *coeficiente de alabeo* pre y post tratamiento basado al valor máximo admisible:

$$C_{pre} = \text{máx} \left[0, \frac{A_{pre} - A_{adm}}{A_{adm}} \right] \quad (8)$$

$$C_{post} = \text{máx} \left[0, \frac{A_{post} - A_{adm}}{A_{adm}} \right] \quad (9)$$

donde C_{pre} es el coeficiente de alabeo pre tratamiento, C_{post} es el coeficiente de alabeo post tratamiento, A_{pre} es el alabeo pre tratamiento, A_{post} es el alabeo post tratamiento y A_{adm} es el alabeo máximo admisible.

Al observar las expresiones dadas en (8) y (9), se puede mencionar que el coeficiente de alabeo $C=0$, representa a una pieza de madera libre de alabeo en la medida que sus alabeos sean inferiores al máximo admisible. Por otro lado, un valor diferente de cero representa la proporción de alabeo en base al máximo admisible. En este sentido, cuando las muestras presenten magnitudes inferiores al máximo admisible, las expresiones (8) y (9) arrojarán resultados negativos, por lo tanto, para facilitar su interpretación física, a dichos valores se les asignará un cero. Así se entenderá que es una pieza de calidad óptima.

Luego, conocidos los coeficientes de alabeos es posible determinar un índice de recuperación de alabeos (R_A) en base al máximo admisible, de la siguiente forma:

$$R_A = (C_{pre} - C_{post}) * 100 \quad (10)$$

En efecto, el índice R_A representa el porcentaje de recuperación de alabeos en base al alabeo máximo admisible. Dicho sea lo anterior, se procede a mostrar los resultados asociados al índice de recuperación de alabeos para cada ensayo (figuras 4.10 y 4.11). El detalle de las cifras porcentuales, se extraen del Anexo B (Parte 1 y 2).

En particular, el índice de recuperación de alabeos asociado a las torceduras de las vigas (figura 4.10), muestra que el primer ensayo alivia mayormente este defecto en comparación con los demás, alcanzando un 151,04%. En cambio, las pruebas entre la 2 y la 9 tuvieron una recuperación de torcedura de un 65,48%, en promedio. Asimismo, es interesante mencionar que el ensayo n°9 fue el más débil, ya que no tuvo la capacidad de mejorar las torceduras de las piezas al mismo nivel que el resto, logrando escasamente un 23,46% de recuperación.

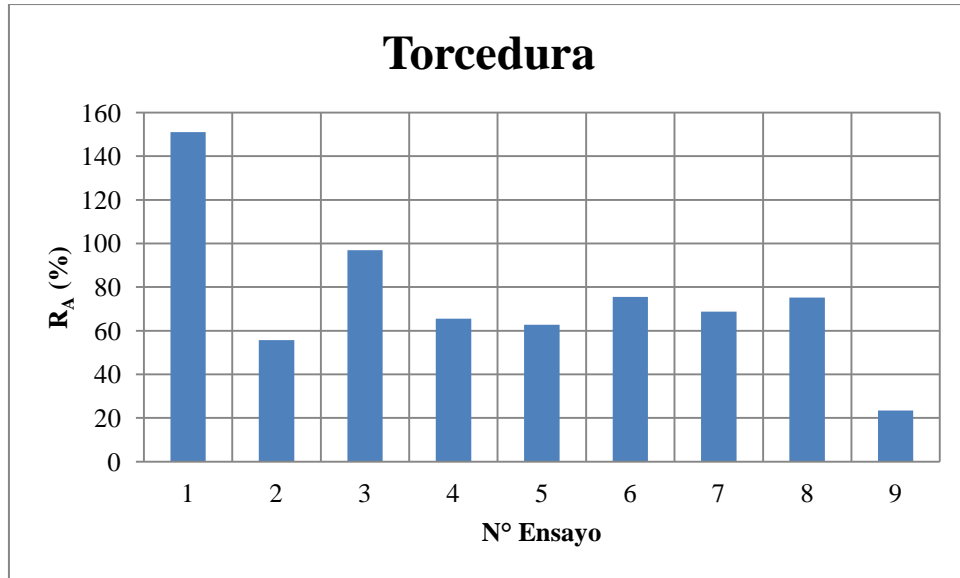


Figura 4.10. Índice de Recuperación de Alabeos: Torcedura.

Por otro lado, en la figura 4.11 se observan los resultados relacionados con la encorvadura. En esta parte, se tiene que todos los índices son negativos, es decir, ningún experimento fue capaz de mejorar este defecto, siendo el ensayo n°2 fue el que empeoró en mayor medida la condición de las piezas de madera (3,84% promedio).

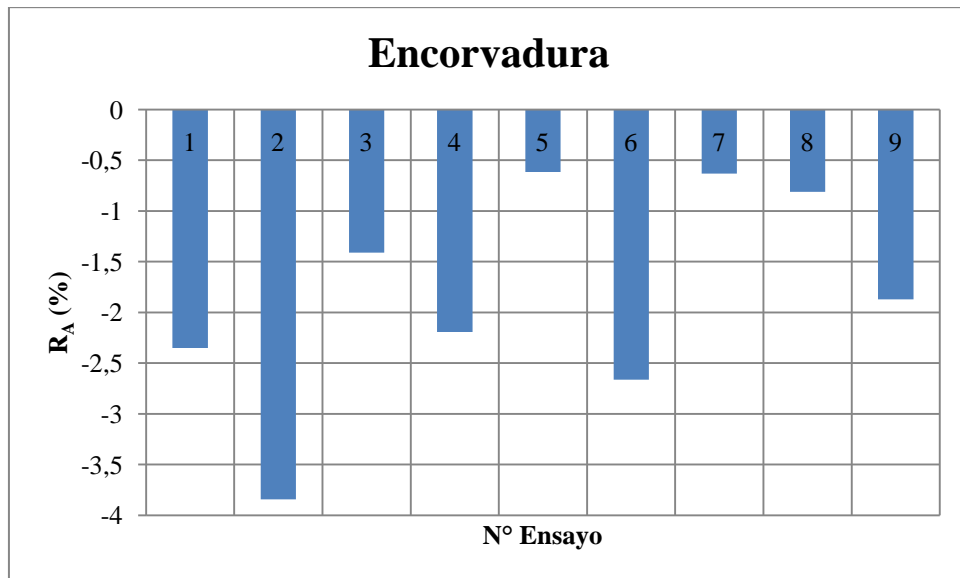


Figura 4.11. Índice de Recuperación de Alabeos: Encorvadura.

Cabe mencionar que el índice de recuperación de arqueadura no se considera debido a que su resultado es nulo al igual que el índice de recuperación de acanaladura (Anexo B - Parte 1). Por ende, cuando se trate el concepto de Índice de Recuperación de Alabeo medio, se hace referencia al promedio entre los valores de torcedura y encorvadura.

Ahora, se comparan los índices de recuperación de alabeo en términos de sobre peso y los tiempos de tratamiento empleados en los distintos ensayos. En este sentido, la tabla 4.7 y la figura 4.12, muestran el efecto del vaporizado en la recuperación de las piezas para los dos sobre pesos estudiados (1,5 y 3 ton/m²), por lo tanto, se puede observar que el mejor resultado fue el logrado en el experimento n°1, debido a que el índice de recuperación promedio de todos los defectos (torcedura y encorvadura) alcanzó un 74,34% y el ensayo n°2 arrojó la peor recuperación promedio (25,92%).

No obstante, en este caso es más práctico comparar los resultados en términos de su sobre peso considerando que el ensayo 1 y 2 trabajaron con la misma carga de 1,5 (ton/m²) y los ensayos 3 y 4 con 3 (ton/m²). En este contexto, cuando la pila de madera trabajó con un sobre peso de 1,5 (ton/m²) logró recuperar los alabeos de mejor manera comparado con el sobre peso de 3 (ton/m²), resultando una recuperación media de 50,13% y 39,69%, respectivamente. Por ende, con un sobre peso menor la calidad de la madera se vio incrementada después del tratamiento térmico.

Tabla 4.7. Índice de Recuperación de Alabeo (%) vs Sobre Peso (ton/m²).

Ensayo	Sobre Peso (ton/m ²)	R _{A_Tor} (%)	R _{A_Enc} (%)	R _{A_prom}
1	1,5	151,04	-2,35	74,34
2	1,5	55,69	-3,84	25,92
3	3	96,91	-1,41	47,75
4	3	65,46	-2,19	31,63

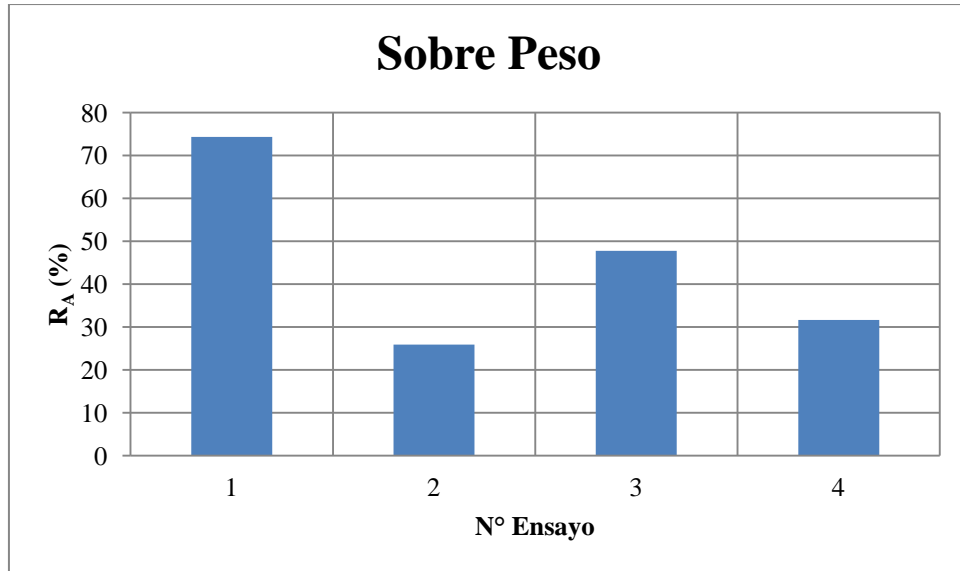


Figura 4.12. Índice de Recuperación de Alabeos (%) vs Sobre peso (ton/m²).

Enseguida, se comparan los resultados de los índices de recuperación de alabeos de los ensayos 1 y 2 con los ensayos 5 y 6, en términos del tiempo de duración del tratamiento de vaporizado a una temperatura de 100°C (tabla 4.8 y figura 4.13). En este sentido, se tiene que cuando el tiempo de exposición es de 6 horas (ensayo 1 y 2) el índice de recuperación de alabeos es igual a 50,13% en promedio; siendo mayor que el logrado por los tiempos de tratamiento de 3 y 12 horas en los ensayos 5 y 6, respectivamente. Esto permite concluir que la aplicación de un tratamiento de vaporizado equivalente a 6 horas es más adecuado para aliviar las deformaciones de las vigas de madera en mayor proporción.

Tabla 4.8. Índice de Recuperación de Alabeo (%) vs Tiempo de tratamiento (h) a 100°C.

Ensayo	Tiempo Tratamiento (h)	R _{A_Tor} (%)	R _{A_Enc} (%)	R _{A_prom}
1	6	151,04	-2,35	74,34
2	6	55,69	-3,84	25,92
5	3	62,80	-0,62	31,09
6	12	75,57	-2,66	36,45

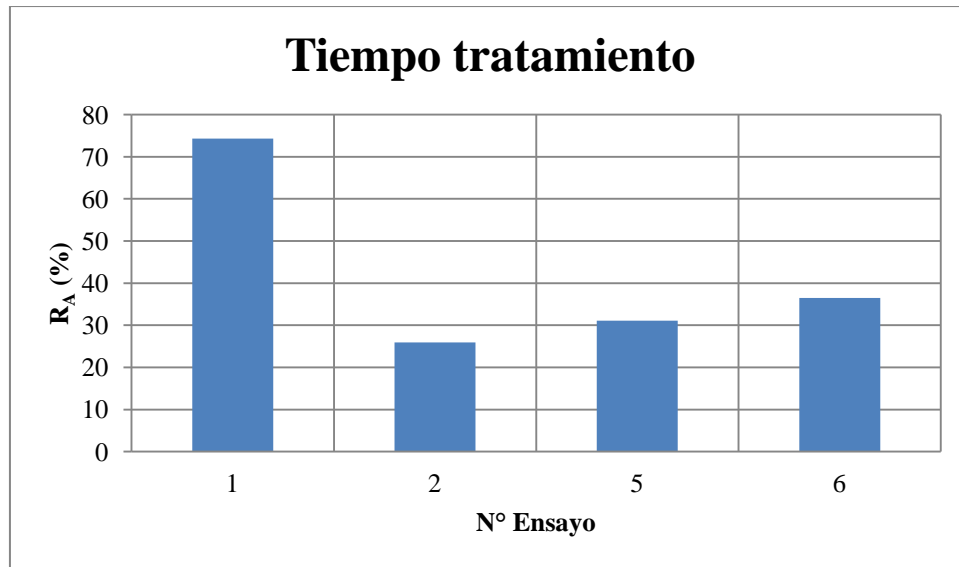


Figura 4.13. Índice de Recuperación de Alabeos vs Tiempo de tratamiento (h) a 100°C.

Ahora, comparando los ensayos 1 y 2 con los tres experimentos restantes, se tienen los resultados que se indican en la tabla 4.9 y en la figura 4.14. En este caso, al igual que en la parte anterior, en el ensayo 1 y 2 se presenta la mayor recuperación de alabeos (50,13% promedio). Por su parte, los ensayos 7, 8 y 9 que aplicaron un vaporizado adicional de 0,5 ó 2 horas a 140°C o 160°C (según corresponda), obtuvieron como resultado una recuperación de alabeo promedio de 34,06%, 37,19% y 10,79%, respectivamente; valores menores al logrado para un tratamiento único de 6 horas a 100°C.

Por otra parte, analizando únicamente los experimentos 7 y 8, los cuales consideraron los mismos niveles de temperatura (100°C y 140°C) pero diferentes tiempos en el segundo tramo del proceso (0,5 y 2 horas, respectivamente), se tiene que la recuperación de alabeos promedio es similar, existiendo una diferencia 3,13% entre ambos. Por este motivo, se podría concluir, que el ensayo n°8 es mejor que el n°7.

Asimismo, los experimentos 7 y 9 pueden ser comparados y analizados, ya que ambos ensayos aplicaron el mismo tiempo de tratamiento (6 y 0,5 horas) pero con temperaturas diferentes en el segundo nivel (140°C y 160°C, respectivamente). En este sentido, sí existe una mayor discrepancia entre los resultados, debido a que el experimento n°7 tuvo una recuperación de alabeos promedio de 34,06% y el experimento n°9 un 10,79%. Por lo tanto, en este caso no cabe duda que la aplicación de una temperatura de 160°C es menos beneficiosa que la de 140°C.

Tabla 4.9. Índice de Recuperación de Alabeo (%) vs Tiempo de tratamiento (h) a distintas temperaturas (100°C - 140°C - 160°C).

Ensayo	Tiempo Tratamiento		R _{A_Tor} (%)	R _{A_Enc} (%)	R _{A_prom}
	t ₁ (h)	t ₂ (h)			
1	6	-	151,04	-2,35	74,34
2	6	-	55,69	-3,84	25,92
7	6	0,5	68,74	-0,63	34,06
8	6	2	75,19	-0,81	37,19
9	6	0,5	23,46	-1,87	10,79

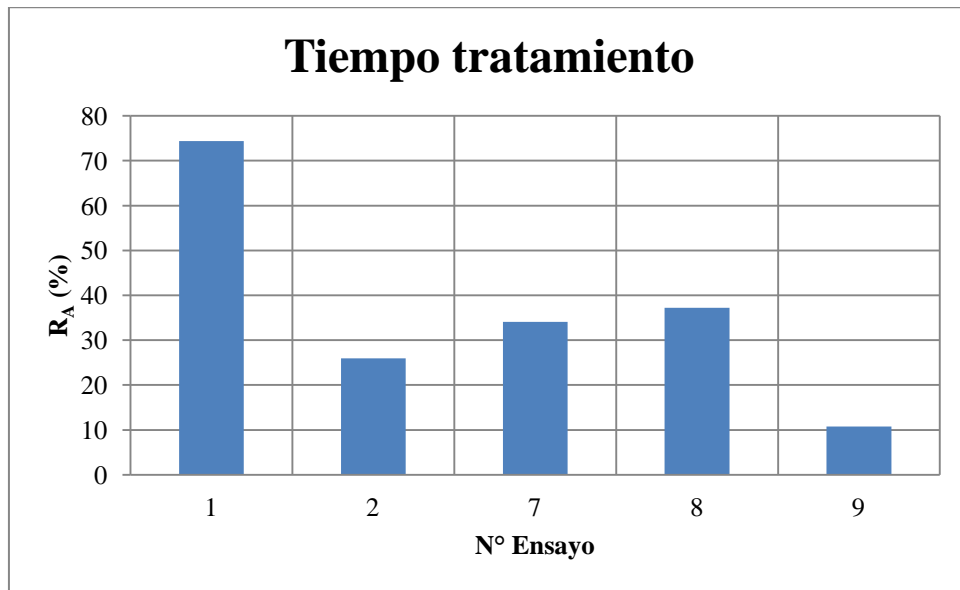


Figura 4.14. Índice de Recuperación de Alabeos vs Tiempo de tratamiento (h) a distintas temperaturas (100°C - 140°C - 160°C).

Luego, analizando la variación de propiedades físicas de las vigas de madera post tratamiento térmico, se tiene que el aumento de humedad producto del vaporizado trae como consecuencia el incremento de la densidad (figura 4.15), dándose una crecida mínima en el ensayo n°9 de 0,52% y máxima en el ensayo n°4 (5,55%). Por su parte, los niveles de humedad se vieron incrementados en un 3,24% en promedio durante los experimentos, siendo el octavo ensayo el que presentó el mayor aumento de humedad desde 8,49% hasta 17,80% (figura 4.16). Sin embargo, en los otros experimentos las piezas no excedieron el 10,29% de humedad a pesar del tiempo de tratamiento, por ende, se cumple con lo establecido en la Norma Chilena **NCh1198.Of06**, la cual hace referencia a

los niveles máximos de humedad permitidos para madera destinada para construcción ($12 \pm 3\%$). En este sentido, el ensayo n°8 es el único que excede este límite por lo que no satisface la exigencia de la normativa.

Nótese que los contenidos de humedad pre tratamiento térmico son bastante bajos considerando que luego del proceso de secado tradicional, esta madera fue tratada con un vaporizado. Sin embargo, estas magnitudes se deben principalmente a que este producto comercializado por CMPC Maderas, está destinado a un mercado en particular que requiere estos porcentajes de humedad.

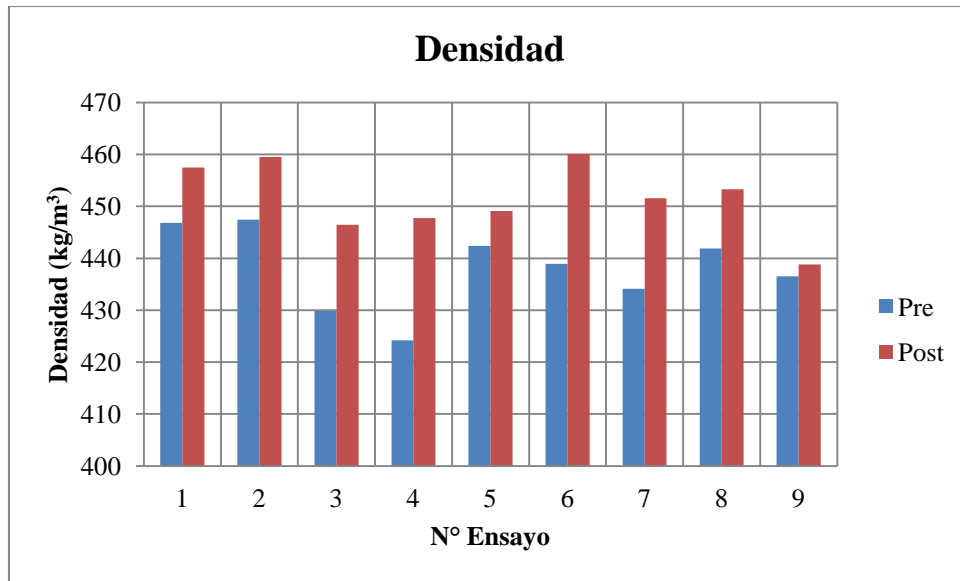


Figura 4.15. Densidad de las piezas de madera pre y post tratamiento térmico.

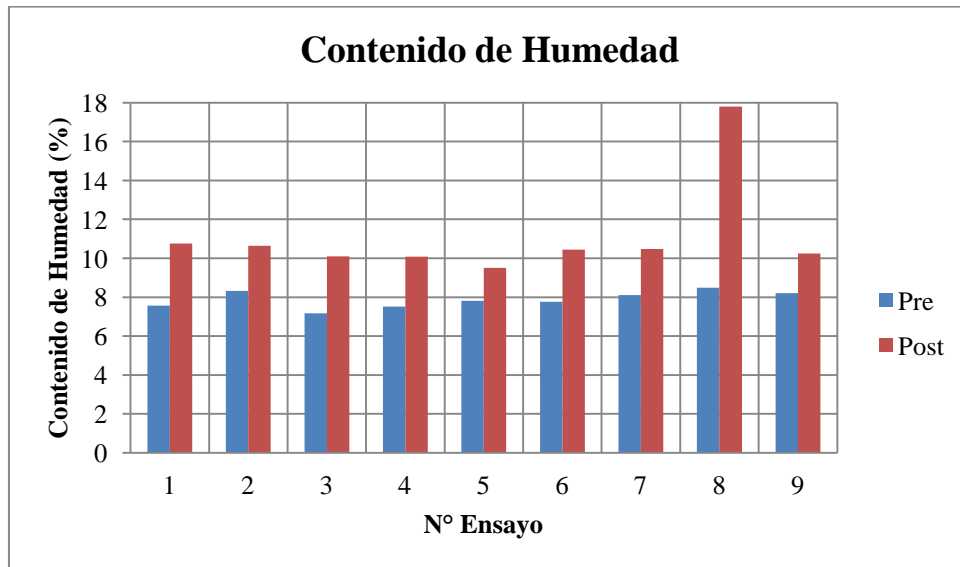


Figura 4.16. Contenido de humedad de las piezas de madera pre y post tratamiento térmico.

Resultados del Análisis Estadístico.

A pesar que se compararon los niveles de recuperación de alabeos para los distintos experimentos en términos medios, es importante realizar un análisis estadístico que entregue información certera sobre cuál es el mejor proceso de vaporizado ya que su estudio incorpora además, la variabilidad existente en las mediciones experimentales.

En concreto, se realiza un ANOVA para determinar si hay diferencia significativa entre los distintos tratamientos térmicos aplicados. Para ello, se comparan los índices de recuperación de alabeos medios de los nueve ensayos.

Por lo tanto, las varianzas V , V_B y V_W resultantes del ANOVA, son:

Tabla 4.10. Varianzas resultantes del análisis.

V (% ²)	V_B (% ²)	V_W (% ²)
36126,96	4781,55	31345,42

Así como también, los factores F_c y F_t son:

Tabla 4.11. Resultado del ANOVA asociado al Índice de Recuperación de Alabeo medio.

Variación	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F_c	F_t	F_t
Entre tratamiento	8	597,69	0,17	$F_t = F(8,9);0,95$	3,23
Dentro tratamiento	9	3482,82			

Observación: el detalle del cálculo estadístico está enmarcado en el Anexo C-Parte 1.

En este sentido, se cumple que $F_c < F_t$ (tabla 4.11), por ende, no hay diferencia significativa entre los diferentes experimentos realizados en términos del Índice de Recuperación de Alabeos (R_A) promedio. Esto quiere decir, que la aplicación de un tratamiento u otro es indistinto al resultado final.

Por lo tanto, una forma de escoger el mejor proceso de vaporizado es observar la magnitud de dichos índices, debido a que no existen dispersiones importantes entre ellos. En efecto, el experimento que obtuvo como consecuencia una mayor recuperación de alabeos promedio, fue el ensayo n°1. Por el contrario, el peor ensayo fue el n°9 (tabla 4.12).

Tabla 4.12. Índice de Recuperación de Alabeos (%).

Tratamiento	R _A _Torcedura	R _A _Encorvadura	R _A _prom
1	151,04	-2,35	74,34
2	55,69	-3,84	25,92
3	96,91	-1,41	47,75
4	65,46	-2,19	31,63
5	62,80	-0,62	31,09
6	75,57	-2,66	36,45
7	68,74	-0,63	34,06
8	75,19	-0,81	37,19
9	23,46	-1,87	10,79

No obstante, este resultado puede que no sea el más adecuado puesto que el índice de recuperación de alabeo del experimento n°1 se ve acrecentado por la recuperación de torcedura que es bastante superior a las demás (151,04%). El motivo es que las vigas ensayadas en dicho experimento presentaban una mayor deformación inicial (ver figura 4.17), lo cual genera un mayor potencial de recuperación. En este sentido, es posible que dicha mayor recuperación no sea debido al tipo de tratamiento sino al tipo de madera.

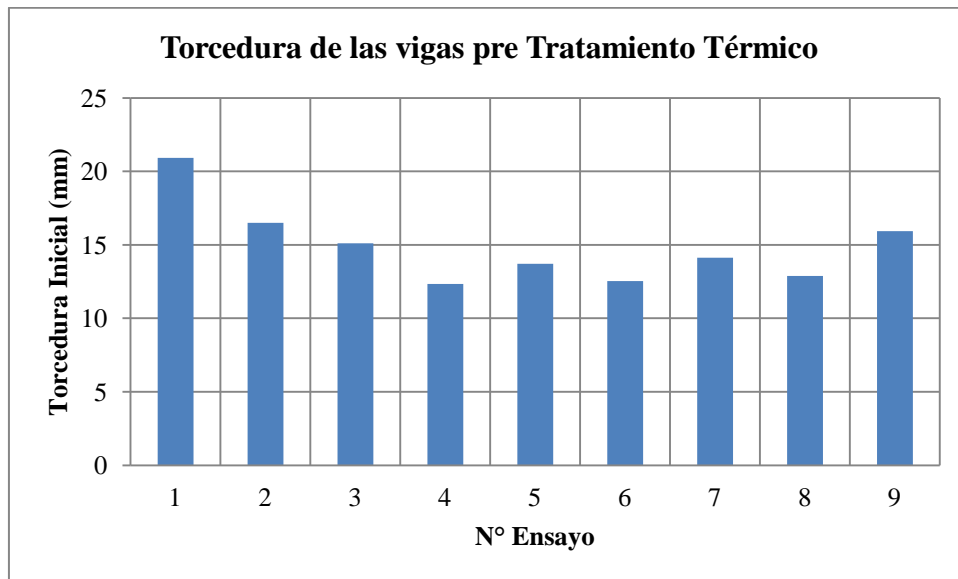


Figura 4.17. Torcedura de las vigas de madera antes de aplicar el tratamiento térmico

Por lo tanto, para determinar si la magnitud de este defecto difiere significativamente de los otros ensayos, es de utilidad la realización de un Análisis de Varianza. De ser correcta la afirmación planteada en el párrafo anterior, se puede obviar el experimento n°1 y realizar un nuevo ANOVA para determinar con certeza cuál es el mejor proceso de acondicionado. Particularmente, se tiene:

Tabla 4.13. Resultado del ANOVA asociado a la torcedura previo al tratamiento térmico.

Variación	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F _c	F _t	F _t
Entre tratamiento	8	203,31	11,81	F _t = F(8,243);0,95	1,94
Dentro tratamiento	243	17,21			

Observación: el detalle del cálculo estadístico está enmarcado en el Anexo C-Parte 2.

En este caso, se cumple que $F_c > F_t$ (tabla 4.13), por lo tanto, existe diferencia significativa entre los experimentos realizados en términos de la magnitud de la torcedura antes del tratamiento térmico. Este resultado permite discriminar con propiedad dicho experimento y analizar la efectividad del proceso entre las ocho experiencias restantes. Es por esto que a continuación se indica el nuevo análisis de varianza.

Tabla 4.14. Varianzas resultantes del segundo análisis.

V (% ²)	V _B (% ²)	V _W (% ²)
21154,04	2359,55	18794,50

Tabla 4.15. Resultado del 2° ANOVA asociado al Índice de Recuperación de Alabeo medio.

Variación	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F _c	F _t	F _t
Entre tratamiento	7	337,08	0,14	F _t = F(7,8);0,95	3,50
Dentro tratamiento	8	2349,31			

Observación: el detalle del cálculo estadístico está enmarcado en el Anexo C-Parte 3.

En efecto, se verifica que $F_c < F_t$ (tabla 4.15), por consiguiente, no hay diferencia significativa entre los diferentes experimentos realizados en términos del Índice de Recuperación de Alabeos (R_A) promedio, vale decir, la aplicación de un tratamiento u otro es indistinto.

Este nuevo resultado es de esperarse, ya que al eliminar el experimento n°1, la uniformidad de los datos se evidencia aún más. En consecuencia, al comparar las medias de los índices de recuperación de alabeos, se determina que el mejor experimento es el n°3 con un resultado igual a 47,75%. Además, es obvio que el peor ensayo continúa siendo el n°9 ya que sólo se eliminó del análisis el experimento n°1.

Tabla 4.16. Índice de Recuperación de Alabeos (%).

Tratamiento	$R_{A_Torcedura}$	$R_{A_Encorvadura}$	R_{A_prom}
2	55,69	-3,84	25,92
3	96,91	-1,41	47,75
4	65,46	-2,19	31,63
5	62,80	-0,62	31,09
6	75,57	-2,66	36,45
7	68,74	-0,63	34,06
8	75,19	-0,81	37,19
9	23,46	-1,87	10,79

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En general se concluye que los tratamientos térmicos permitieron recuperar satisfactoriamente los alabeos en madera central seca de pino radiata.

En particular, se concluye que:

1.- Todos los ensayos permitieron disminuir las torceduras de las vigas, sin embargo el ensayo n°3 lo hizo en mayor proporción (56,82%); seguido por los ensayos 6 y 8 que consiguieron una reducción de torcedura de un 51,86% y un 51,08% en promedio, respectivamente. Por otro lado, la arqueadura sólo fue mejorada con el tratamiento térmico en los experimentos 1, 8 y 9, pero en menor proporción a la torcedura, siendo el ensayo n°1 el que obtuvo una reducción de 37,16%, continuado por un 16,54% del ensayo n°9 y por último, el ensayo n°8 con una disminución de arqueadura de un 8,29%. Finalmente, la encorvadura se incrementó luego del proceso de vaporizado en todos los ensayos aplicados; y la acanaladura fue el único alabeo que no se presentó en las piezas ni antes ni después del tratamiento, pudiéndose deber al alto espesor que presentaban las vigas.

2.- La calidad de las vigas luego del tratamiento térmico y los límites admisibles de alabeo establecidos para considerar la madera como un material de buena calidad, se tiene que sólo el 36% de las piezas cumple con dicha regla cuando se analiza la torcedura, siendo los experimentos 4 y 6 los que alcanzaron la mayor cantidad de piezas con calidad aceptable (61%). En cambio, el experimento n°9 fue el único ensayo que no obtuvo piezas dentro de los límites de calidad establecida. Sin embargo, a pesar de que el ensayo 4 y 6 lograron la mayor cantidad de piezas de buena calidad en términos de torcedura, es importante recalcar que el experimento n°1 logró reducir las torceduras de calidad severa e inaceptable en mayor medida entre el antes y el después del tratamiento, donde un 89% presentaron un daño severo e inaceptable antes del proceso y al finalizar el mismo, el daño se redujo a un 14%, produciéndose una reducción del daño en un 75% del total de piezas ensayadas. En este mismo contexto, los otros tres alabeos (arqueadura, encorvadura y acanaladura) respondieron de manera positiva a esta clasificación, ya que la cantidad de piezas con calidad sin defectos y/o leves fueron: 100%, 87% y 100%, respectivamente.

3.- Según los índices de recuperación de alabeos establecidos en este estudio, hay que destacar que la arqueadura y la acanaladura no fueron considerados dentro del análisis porque ambos cumplen con el nivel de calidad predeterminado, por lo tanto, sólo la torcedura y la encorvadura fueron incluidos. En este contexto, es interesante mencionar que el ensayo n°1 es el que presenta la mayor

magnitud de recuperación de alabeos, alcanzando un 74,34% promedio. No obstante, en este valor influye enormemente el índice de recuperación de torcedura (151,04%), escapando del orden de magnitud medio logrado en los otros experimentos (65,48%). Esto es respaldado por medio de un Análisis de Varianza (ANOVA) que determinó la existencia de diferencia significativa entre los índices de recuperación de torceduras dentro de las experiencias. En conclusión, la madera utilizada en el ensayo n°1 no presenta las mismas características que el resto, por lo que, no puede ser estudiada y analizada bajo las mismas condiciones. La razón es simple: estas vigas presentaban una mayor deformación inicial lo que se traduce a un mayor potencial de recuperación de torcedura, y por ende, un mayor índice de recuperación de alabeo.

4.- El ANOVA realizado para determinar la existencia de diferencia significativa entre los procesos de vaporizado aplicados entre el tratamiento 2 y 9, estableció que no existen efectos diferenciales entre los grupos. Por lo tanto, examinando las medias de los índices de recuperación de alabeos, se tiene que el mejor acondicionado es el que opera con vapor en un ambiente con temperaturas de 100°C durante 6 horas y con un sobre peso de 3 toneladas por metro cuadrado, produciendo un nivel de recuperación promedio de 47,75% (experimento n°3). Asimismo, el peor acondicionado es el trabaja con vapor saturado en un ambiente cuyas temperaturas equivalen a 100°C y 160°C durante 6 horas y 0,5 horas respectivamente, y con un sobre peso de 1,5 toneladas por metro cuadrado, generando un nivel de recuperación de 10,79% en promedio (experimento n°9).

5.- Además, el contenido de humedad medio obtenido en el mejor experimento (10,10%) cumple con lo señalado en la Norma Chilena NCh1198.Of06, por lo tanto, al término del proceso de acondicionado la madera puede ser usada plenamente como material de construcción. Adicionalmente, la densidad sólo se incrementó en un 3,86% luego del tratamiento térmico (desde 430 kg/m³ hasta 446 kg/m³), lo cual no es significativo, y por ende, tampoco es perjudicial.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS

- Ananías, R.; Broche, W.; Salinas, C.; Ruiz, P. 2001.** Modelación del Secado Convencional de Coigüe. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 3(1-2): 27-34.
- Ananías, R.; Vallejos, S.; Salinas, C. 2005.** Estudio de la Cinética del Secado Convencional y Bajo Vacío del Pino Radiata. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 7(1): 37-47.
- Ananías, R.; Ulloa, J.; Elustondo, D.; Salinas, C.; Rebolledo, P.; Fuentes C. 2012.** Energy Consumption in Industrial Drying of Radiata Pine. *Drying Technology* 30: 774-779.
- Bodig, J.; Jayne, B. 1993.** *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Krieger Publishing Company Malabar, Florida. 712pp.
- Cofré, D. 2003.** *Efecto del Vaporizado Final en las Tensiones de la Madera Aserrada, Pinus radiata*. Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero en Maderas, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia (Chile).
- Crespo, R.; Torres, M.; Valenzuela, L.; Poblete, H. 2013.** Propiedades Químicas, Color y Humectabilidad de Partículas de *Laureliopsis philippiana* (Tepa) con y sin Tratamiento Térmico. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 15(3): 337-348.
- Díaz-vaz, J. E. 2003.** *Anatomía de Maderas*. Marisa Cuneo Ediciones. 151pp.
- Espinosa, C. 2004.** *Cambio de Color en Madera de Renovales de Raulí (Nothofagus alpina) y Roble (Nothofagus obliqua) Mediante Procesos de Vaporizado*. Memoria de Titulación para optar al Título de Ingeniero en Maderas, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Santiago (Chile).
- Fernández, A.; Salvo, L. 2003.** Variación del área de pared celular en *Pinus radiata* D. Don. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 5(1): 80-87.
- Gatica, Y.; Salinas, C.; Ananías, R. 2011.** Modeling Conventional One-Dimensional Drying of Radiata Pine based on the Effective Diffusion Coefficient. *Latin American Applied Research* 41: 183-189.
- Guerrero, G. 1997.** Secado de Madera Juvenil de Pino Radiata. *IV Taller de Aserraderos y Remanufacturas*. Concepción, CORMA: 10-13.

- Haque, M. 2007.** Analysis of Heat and Mass Transfer During High-Temperature Drying of *Pinus radiata*. *Drying Technology* 25(2): 379-389.
- Haslett, A.; Simpson, I.; Kimberley, O. 1991.** Utilisation of 25-year-old *Pinus radiata* part 2: warp of structural timber in drying. *New Zealand J For Sci* 21(2/3): 228-234.
- Haygreen, J.; Bowyer, J. 1982.** Forest Products and Wood Science: An Introduction. The Iowa State University Press. Iowa.
- INFOR 2016.** *La Industria del Aserrío*. Boletín Estadístico N° 155. Instituto Forestal, Santiago-Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. NCh176/1.Of84:** *Madera - Parte 1: Determinación de Humedad*. Santiago, Chile, 1984.
- Instituto Nacional de Normalización. NCh176/2.Of86:** *Madera - Parte 2: Determinación de la Densidad*. Santiago, Chile, 1986.
- Instituto Nacional de Normalización. NCh993.Of72:** *Madera - Procedimiento y Criterios de Evaluación para Clasificación*. Santiago, Chile, 1972.
- Instituto Nacional de Normalización. NCh1198.Of06:** *Madera - Construcciones en Madera-Cálculo*. Santiago, Chile, 2006.
- Juacida, R.; Inzunza, L.; Barría, C. 2005.** Efecto del Vaporizado Inicial en el Secado Artificial de Madera de Coigüe de Magallanes (*Nothofagus betuloides*). *Bosque* 26(3): 81-86.
- Keey, R.; Langrish, T.; Walker, J. 2000.** *Kiln-Drying of Lumber*. Springer Series in Wood Science. 326pp.
- Miri, S.; Madhoushi, M. 2013.** Kiln Drying Schedule based on Diffusion Theory. *World of Sciences Journal* ISSN 2307-3071.
- Montgomery, D. 2004.** *Diseño y Análisis de Experimentos*. Limusa Wiley, Segunda Edición. 686pp.
- Moya, R.; Muñoz, F. 2008.** Wet Pockets in Kiln-Dried *Gmelina arborea* Lumber. *Journal of Tropical Forest Science* 20(1): 48-56.

- Muñoz, F. 2008.** Secado de la Madera Aserrada. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú (Costa Rica)* 5(13).
- Pang, S. 1996.** Development and Validation of a Kiln-Wide Model for Drying of Softwood Lumber. *5th International IUFRO Wood Drying Conference*.
- Peredo, M.; Figueroa, R. 1992.** Secado Artificial de Madera de Coigüe. *Bosque* 13(2): 45-55.
- Salinas, C.; Ananías, R.; Ruminot, P. 2008.** Modelación Fenomenológica de las Curvas de Secado por Alta Temperatura de Pino Radiata. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 10(3): 207-217.
- Salinas, C.; Gatica, Y.; Vargas, H.; Ananías, R. 2013.** Three-Dimensional Simulation of Isothermal Wood Drying of Radiata Pine using Effective Diffusion Coefficients. *Latin American Applied Research* 43: 95-102.
- Salvo, L.; Ananías, R.; Cloutier, A. 2004.** Influencia de la Estructura Anatómica en la Permeabilidad Transversal al Gas de Pino Radiata. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 6(1): 33-44.
- Siau, J. F. 1984.** *Transport Processes in Wood*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 245pp.
- Simpson, W. 1980.** Sorption Theories Applied to Wood. *Wood Fiber Science* 12(3): 183-195.
- Skaar, C. 1972.** *Water in Wood*. Syracuse University Press, Syracuse New York. 218pp.
- Skaar, C. 1988.** *Wood-Water Relations*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 283pp.
- Stamm, A. 1964.** *Wood and Cellulose Science*. The Ronald Press Company, New York. 543pp.
- Vásquez, A. 2005.** *Evaluación del Efecto de la Clasificación Dimensional de Madera Aserrada, sobre la Calidad del Secado en Pinus radiata*. Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero en Maderas, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia (Chile).
- Vidal, M.; Cloutier, A. 2005.** Evaluation of Wood Sorption Models for High Temperatures. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 7(3): 145-158.

CAPÍTULO 7

ANEXO A

Parte 1

Tabla A.4.1.1. Propiedades físicas y alabeos pre y post tratamiento: Ensayo 1.

Viga	Densidad (kg/m ³)		CH (%)		Tor (mm)		Arq (mm)		Enc (mm)		Aca (mm)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	490,8	528,4	8,7	13,5	23,32	20,58	5,75	9,03	0,00	0,00	0,00	0,00
2	461,7	484,1	7,3	13,8	11,23	9,96	4,79	3,69	0,00	1,45	0,00	0,00
3	450,9	470,6	7,4	12,9	11,92	6,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	407,7	429,6	6,3	9,4	15,17	8,9	0,00	5,74	0,00	0,00	0,00	0,00
5	443,9	461,8	7,6	13,2	17,8	10,07	0,00	3,86	6,18	5,21	0,00	0,00
6	477,1	482,6	8,8	11,4	27,26	7,92	5,38	4,48	4,11	6,00	0,00	0,00
7	443,4	448,7	8,1	10,6	12,89	9,43	0,00	2,67	4,29	2,11	0,00	0,00
8	419,0	426,8	7,2	10,0	23,67	14,63	0,00	0,00	6,77	4,31	0,00	0,00
9	489,0	491,6	7,4	12,2	20,5	7,89	0,00	0,00	0,00	2,47	0,00	0,00
10	457,4	466,3	7,7	10,1	14,34	5,45	0,00	0,00	2,96	0,00	0,00	0,00
11	410,7	425,2	6,0	9,2	17,99	7,84	0,00	0,00	2,9	0,00	0,00	0,00
12	397,5	403,2	5,9	8,3	18,71	10,71	0,00	0,00	3,68	0,00	0,00	0,00
13	477,3	479,4	8,0	11,9	15,58	9,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	461,0	467,5	8,9	9,9	24,09	10,56	5,46	0,00	2,97	0,00	0,00	0,00
15	401,8	407,1	6,2	8,4	22,89	8,62	0,00	0,00	4,98	4,22	0,00	0,00
16	406,7	409,4	7,5	9,7	28,2	23,52	9,54	7,15	0,00	3,05	0,00	0,00
17	469,3	475,0	7,6	10,1	20,39	5,21	0,00	0,00	0,00	2,7	0,00	0,00
18	452,4	460,9	7,7	10,3	19,22	7,00	4,47	0,00	4,31	4,28	0,00	0,00
19	428,3	435,1	6,8	9,6	17,82	13,00	0,00	0,00	3,24	2,71	0,00	0,00
20	478,2	478,8	7,4	9,7	28,45	14,29	0,00	0,00	7,55	8,84	0,00	0,00
21	517,3	538,4	10,9	12,4	19,68	4,37	0,00	0,00	0,00	7,56	0,00	0,00
22	455,4	464,5	7,2	10,8	27,13	11,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	416,4	431,4	6,6	9,0	17,69	12,16	0,00	3,53	0,00	0,00	0,00	0,00
24	442,2	440,2	8,7	10,9	21,25	10,9	3,85	0,00	5,82	7,54	0,00	0,00
25	455,6	458,3	7,7	11,2	41,75	11,72	13,0	0,00	0,00	2,65	0,00	0,00
26	432,7	448,4	7,5	10,5	21,84	7,13	0,00	0,00	4,9	5,12	0,00	0,00
27	443,2	464,2	8,5	12,6	28,68	8,08	4,14	0,00	0,00	4,66	0,00	0,00
28	423,5	431,9	6,2	9,8	16,18	10,72	7,52	0,00	3,45	0,00	0,00	0,00

Tabla A.4.1.2. Propiedades físicas y alabeos pre y post tratamiento: Ensayo 2.

Viga	Densidad (kg/m ³)		CH (%)		Tor (mm)		Arq (mm)		Enc (mm)		Aca (mm)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	452,7	471,2	9,2	11,9	15,59	25,73	0,00	9,11	0,00	0,00	0,00	0,00
2	393,8	433,7	7,7	13,1	12,37	26,75	0,00	11,71	1,82	0,00	0,00	0,00
3	420,8	434,0	8,3	13,8	15,35	23,16	3,12	8,43	3,7	3,91	0,00	0,00
4	490,8	510,0	8,1	10,2	14,73	22,12	0,00	10	3,27	0,00	0,00	0,00
5	425,1	431,5	7,6	9,7	21,26	14,42	2,84	2,87	5,9	11,73	0,00	0,00
6	489,7	502,2	10,4	11,1	17,61	10,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	471,3	482,8	10,0	12,5	20,47	12,38	0,00	4,07	0,00	4,19	0,00	0,00
8	406,8	426,5	7,8	11,4	20,76	8,43	2,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	393,0	395,8	6,7	7,4	10,12	10,35	0,00	0,00	4,25	4,38	0,00	0,00
10	452,0	457,4	8,3	10,0	18,41	15,59	2,77	4,39	0,00	0,00	0,00	0,00
11	484,4	493,5	10,1	12,0	15,16	6,4	0,00	0,00	3,26	2,94	0,00	0,00
12	435,3	454,9	7,1	9,0	13,27	10,7	0,00	3,09	2,1	0,00	0,00	0,00
13	427,0	423,4	7,9	9,4	11,06	9,26	0,00	0,00	2,47	4,87	0,00	0,00
14	480,9	482,5	8,5	10,7	15,23	14,2	0,00	0,00	3,33	3,74	0,00	0,00
15	449,4	449,4	7,3	9,2	14,46	9,01	0,00	0,00	3,29	3,53	0,00	0,00
16	445,8	451,5	7,1	8,5	12,03	7,7	0,00	0,00	1,86	0,00	0,00	0,00
17	422,8	421,8	7,9	9,4	18,38	19,31	0,00	3,44	3,15	5,59	0,00	0,00
18	473,6	479,3	10,6	11,5	22,78	12,43	0,00	0,00	1,98	3,67	0,00	0,00
19	438,6	439,9	7,2	10,1	19,27	17,18	0,00	0,00	3,01	3,25	0,00	0,00
20	433,1	456,8	7,6	12,6	14,21	4,64	0,00	0,00	3,62	0,00	0,00	0,00
21	448,8	454,9	8,1	9,4	19,00	11,17	2,75	0,00	4,27	3,8	0,00	0,00
22	431,1	437,2	7,4	9,4	15,37	10,29	2,79	0,00	2,14	2,67	0,00	0,00
23	461,5	467,8	8,9	9,7	23,12	9,70	3,21	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00
24	461,6	490,7	8,8	12,2	18,6	7,09	0,00	0,00	0,00	2,77	0,00	0,00
25	437,7	448,4	9,3	11,6	8,31	5,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	434,4	439,2	7,5	9,3	19,15	9,25	3,26	1,57	3,67	4,23	0,00	0,00
27	513,4	530,1	9,6	11,1	20,15	7,29	0,00	0,00	3,52	2,42	0,00	0,00
28	452,4	500,4	8,0	12,1	15,95	7,61	0,00	0,00	4,67	2,73	0,00	0,00

Tabla A.4.1.3. Propiedades físicas y alabeos pre y post tratamiento: Ensayo 3.

Viga	Densidad (kg/m ³)		CH (%)		Tor (mm)		Arq (mm)		Enc (mm)		Aca (mm)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	398,8	417,2	6,0	14,3	12,87	1,68	0,00	9,10	0,00	0,00	0,00	0,00
2	390,6	412,9	5,9	13,5	10,14	1,52	0,00	4,45	5,35	5,38	0,00	0,00
3	440,1	464,2	6,6	10,2	15,69	1,64	4,00	8,15	5,56	7,05	0,00	0,00
4	443,3	461,3	6,7	11,5	24,77	3,33	0,00	2,19	0,00	2,18	0,00	0,00
5	391,7	396,5	5,5	6,6	15,45	8,33	0,00	0,00	0,00	3,25	0,00	0,00
6	369,4	375,9	5,3	9,6	19,06	3,55	2,95	7,47	2,15	3,11	0,00	0,00
7	447,5	465,2	8,1	9,5	18,65	5,40	0,00	3,60	2,79	3,12	0,00	0,00
8	400,3	415,1	6,5	11,0	11,1	5,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	362,2	368,1	5,3	6,1	10,66	6,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	494,4	499,7	8,9	9,1	19,48	12,34	0,00	0,00	4,30	6,18	0,00	0,00
11	478,9	489,1	8,3	10,8	12,54	3,46	3,7	5,46	4,24	0,00	0,00	0,00
12	418,5	440,1	6,7	10,0	19,49	6,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	400,3	402,7	6,2	7,4	14,1	14,45	0,00	0,00	2,79	3,98	0,00	0,00
14	494,8	498,3	7,5	9,0	12,1	9,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	418,1	429,6	7,7	9,9	12,27	6,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	492,5	507,8	8,4	12,7	21,05	9,01	0,00	0,00	3,76	3,51	0,00	0,00
17	460,8	463,8	8,5	9,0	17,46	11,81	0,00	0,00	3,36	3,44	0,00	0,00
18	376,9	384,2	6,0	7,3	14,97	9,13	0,00	0,00	3,52	0,00	0,00	0,00
19	460,0	471,6	8,7	10,5	13,06	7,50	2,83	0,00	2,66	3,10	0,00	0,00
20	418,7	454,5	7,4	12,4	11,28	3,38	0,00	0,00	2,96	0,00	0,00	0,00
21	511,8	515,7	9,9	10,5	17,72	7,79	2,93	0,00	3,47	5,25	0,00	0,00
22	473,9	443,4	6,8	8,2	12,41	12,1	0,00	0,00	0,63	3,31	0,00	0,00
23	423,0	448,2	6,6	9,9	14,87	9,15	2,50	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00
24	425,2	495,4	7,1	14,9	11,51	0,00	0,00	0,00	5,14	5,16	0,00	0,00
25	364,8	377,9	8,0	8,3	16,26	6,55	0,00	0,00	3,58	2,22	0,00	0,00
26	438,1	456,5	6,6	8,0	13,62	9,54	0,00	0,00	4,02	5,25	0,00	0,00
27	398,3	432,0	6,4	10,0	14,19	6,46	0,00	4,38	0,00	0,00	0,00	0,00
28	442,4	514,0	9,3	12,7	16,25	0,00	3,43	0,00	0,00	3,36	0,00	0,00

Tabla A.4.1.4. Propiedades físicas y alabeos pre y post tratamiento: Ensayo 4.

Viga	Densidad (kg/m ³)		CH (%)		Tor (mm)		Arq (mm)		Enc (mm)		Aca (mm)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	461,6	491,5	7,3	12,3	10,35	1,00	13	17,34	3,51	3,77	0,00	0,00
2	439,7	466,1	7,7	10,0	6,4	2,58	9,7	3,04	0,00	0,00	0,00	0,00
3	416,3	444,8	7,4	10,7	7,83	1,00	6,32	13,45	0,00	0,00	0,00	0,00
4	420,3	438,3	6,7	11,9	8,17	1,12	4,39	6,81	3,27	2,42	0,00	0,00
5	452,9	454,2	8,0	11,8	10,32	5,79	0,00	0,00	2,17	1,71	0,00	0,00
6	388,3	400,0	7,6	10,3	18,52	4,16	0,00	1,85	0,00	0,00	0,00	0,00
7	429,0	442,0	7,5	10,8	10,63	4,43	5,36	4,61	3,19	3,12	0,00	0,00
8	457,0	466,9	8,0	11,7	13,26	6,62	0,00	4,62	3,07	4,2	0,00	0,00
9	386,1	392,3	6,1	9,6	15,00	11,99	4,19	6,03	0,00	3,19	0,00	0,00
10	439,7	449,1	6,7	9,2	17,14	9,82	0,00	2,78	2,71	0,00	0,00	0,00
11	378,9	389,1	6,6	7,5	7,42	4,3	0,00	1,65	2,99	3,87	0,00	0,00
12	460,1	478,0	9,2	11,0	15,82	4,65	0,00	3,41	1,00	3,17	0,00	0,00
13	449,6	458,5	8,5	11,1	9,79	6,71	0,00	3,57	6,7	9,74	0,00	0,00
14	414,8	421,4	6,6	7,9	9,22	6,54	2,52	3,62	0,00	2,95	0,00	0,00
15	447,8	458,5	8,5	10,6	10,97	5,77	0,00	0,00	2,62	3,44	0,00	0,00
16	466,9	481,9	9,2	13,0	27,87	9,1	0,00	2,98	0,00	2,63	0,00	0,00
17	419,8	420,8	7,6	8,6	10,33	7,66	0,00	0,00	4,55	2,96	0,00	0,00
18	122,7	426,5	6,7	8,3	11,56	9,65	0,00	3,02	0,00	3,36	0,00	0,00
19	430,2	443,4	8,4	9,9	15,75	7,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	483,3	458,3	8,1	10,1	15,67	9,64	2,81	3,13	3,38	2,72	0,00	0,00
21	410,2	410,7	5,9	7,0	10,53	11,18	2,32	0,00	3,4	3,37	0,00	0,00
22	459,7	474,0	7,4	9,1	9,62	5,25	0,00	2,97	5,35	5,84	0,00	0,00
23	472,4	485,5	8,5	12,0	10,82	4,97	0,00	0,00	0,00	2,77	0,00	0,00
24	491,7	494,9	8,3	10,3	9,96	6,50	1,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	471,8	486,7	8,1	10,2	7,85	4,71	2,68	0,00	0,00	3,51	0,00	0,00
26	426,2	447,4	6,4	8,9	11,36	7,15	0,00	1,01	0,00	2,83	0,00	0,00
27	354,6	413,2	6,2	9,8	18,72	7,07	2,41	3,35	0,00	2,58	0,00	0,00
28	425,5	442,1	7,4	8,9	14,55	8,45	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla A.4.1.5. Propiedades físicas y alabeos pre y post tratamiento: Ensayo 5.

Viga	Densidad (kg/m3)		CH (%)		Tor (mm)		Arq (mm)		Enc (mm)		Aca (mm)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	520,1	514,5	8,1	11,3	11,39	4,33	2,28	1,59	1,89	1,52	0,00	0,00
2	429,4	440,1	9,3	13,3	8,72	2,62	3,39	0,00	1,99	2,84	0,00	0,00
3	428,3	423,2	7,1	8,9	15,14	6,38	2,1	0,00	0,00	3,26	0,00	0,00
4	435,9	441,0	7,2	10,7	11,9	6,67	1,71	2,96	2,3	2,82	0,00	0,00
5	416,1	449,1	7,5	10,0	18,9	6,76	0,00	0,00	0,00	2,25	0,00	0,00
6	483,4	484,3	8,3	11,0	12,35	6,13	2,3	2,16	3,37	3,26	0,00	0,00
7	450,4	419,8	8,7	11,1	16,06	6,58	1,79	0,00	0,00	2,85	0,00	0,00
8	434,9	431,5	7,5	9,2	10,18	4,94	0,00	0,00	2,10	4,50	0,00	0,00
9	452,7	455,6	8,5	12,2	15,25	5,26	1,63	0,00	0,00	1,62	0,00	0,00
10	440,1	438,4	7,0	8,8	13,61	9,89	0,00	0,00	2,21	3,05	0,00	0,00
11	471,4	477,2	8,3	9,7	12,57	9,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	426,0	434,8	7,4	8,5	20,29	15,7	0,00	0,00	5,48	4,20	0,00	0,00
13	465,9	462,6	8,6	9,7	12,35	10,46	0,00	0,00	3,05	2,03	0,00	0,00
14	435,4	443,0	7,4	7,1	15,61	13,99	0,00	0,00	2,45	3,96	0,00	0,00
15	448,5	450,7	7,6	8,1	15,95	11,13	2,83	0,00	1,98	2,02	0,00	0,00
16	424,8	432,7	8,0	11,0	16,16	10,00	0,00	0,00	3,18	2,70	0,00	0,00
17	410,1	413,3	8,9	7,8	18,27	12,13	0,00	0,00	1,91	2,75	0,00	0,00
18	470,8	482,6	8,1	9,5	14,12	10,24	0,00	0,00	2,89	2,37	0,00	0,00
19	459,6	467,9	8,2	9,3	14,18	7,70	2,40	1,93	2,50	3,49	0,00	0,00
20	465,6	474,2	9,4	10,8	16,7	9,23	0,00	0,00	2,43	3,22	0,00	0,00
21	405,7	413,8	7,6	8,7	20,81	13,26	2,51	3,68	5,38	3,65	0,00	0,00
22	460,9	474,3	7,9	8,2	8,52	9,61	0,00	1,89	0,00	2,57	0,00	0,00
23	431,1	449,5	6,7	8,3	12,37	9,72	2,16	2,93	2,68	3,41	0,00	0,00
24	384,6	397,1	6,2	7,3	11,92	10,03	2,67	2,49	3,17	2,8	0,00	0,00
25	442,9	456,2	6,5	9,3	11,06	12,7	0,00	2,34	2,83	3,72	0,00	0,00
26	455,1	465,1	9,9	9,8	16,34	8,97	0,00	2,26	2,53	2,78	0,00	0,00
27	415,6	441,4	6,0	8,0	5,85	7,60	4,82	8,73	3,33	6,45	0,00	0,00
28	421,8	441,3	6,7	8,8	7,34	6,47	2,69	3,47	0,00	2,94	0,00	0,00

Tabla A.4.1.6. Propiedades físicas y alabeos pre y post tratamiento: Ensayo 6.

Viga	Densidad (kg/m ³)		CH (%)		Tor (mm)		Arq (mm)		Enc (mm)		Aca (mm)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	440,9	462,8	8,1	10,0	19,39	0,00	5,2	12,93	2,13	2,97	0,00	0,00
2	372,7	416,5	7,1	11,9	15,99	5,79	0,00	12,35	2,35	3,04	0,00	0,00
3	438,5	464,8	7,4	10,2	12,64	0,00	3,46	3,6	3,11	1,83	0,00	0,00
4	504,4	514,6	8,0	9,8	8,02	3,00	0,00	2,00	0,00	2,88	0,00	0,00
5	455,0	465,7	7,4	9,1	13,13	6,66	1,97	3,31	3,85	4,76	0,00	0,00
6	436,3	447,2	7,3	9,0	10,51	5,75	2,86	4,3	0,00	3,17	0,00	0,00
7	418,2	425,3	5,6	8,3	15,07	10,26	3,39	2,54	2,23	5,65	0,00	0,00
8	460,7	470,1	8,3	12,1	14,76	6,82	3,11	2,88	1,86	3,3	0,00	0,00
9	467,8	471,4	8,1	10,5	5,7	2,01	0,00	2,79	2,48	3,38	0,00	0,00
10	463,8	472,8	7,6	10,3	14,8	9,84	0,00	2,94	4,05	9,45	0,00	0,00
11	462,3	486,2	8,2	11,0	12,87	8,33	4,58	2,13	2,51	2,11	0,00	0,00
12	443,0	478,1	8,3	13,3	16,86	4,3	4,25	0,00	2,06	2,02	0,00	0,00
13	399,6	401,7	6,6	8,4	8,51	8,43	3,54	3,44	2,17	2,86	0,00	0,00
14	384,8	395,2	6,6	8,7	8,96	4,55	6,68	2,99	1,85	0,00	0,00	0,00
15	448,7	452,4	8,2	10,5	17,55	6,92	3,11	3,13	4,48	3,35	0,00	0,00
16	498,5	538,6	9,8	13,9	10,34	7,19	2,64	2,23	3,24	1,97	0,00	0,00
17	424,7	433,5	6,8	8,2	10,03	6,49	4,45	3,51	2,52	3,00	0,00	0,00
18	429,6	442,7	8,4	8,5	3,67	4,82	3,17	2,68	3,00	2,8	0,00	0,00
19	434,6	465,4	8,3	10,2	17,82	8,00	2,7	1,59	3,59	2,25	0,00	0,00
20	394,7	450,4	8,1	13,0	17,9	4,32	2,76	2,12	3,41	2,16	0,00	0,00
21	409,2	426,2	8,2	8,6	9,72	5,44	1,71	0,00	2,22	1,2	0,00	0,00
22	451,3	467,1	8,1	8,5	13,13	8,00	1,91	3,27	3,88	2,69	0,00	0,00
23	424,5	462,0	7,4	9,3	4,62	6,57	2,9	1,73	4,26	5,50	0,00	0,00
24	503,8	527,0	9,6	13,0	12,75	6,92	2,97	1,68	2,59	1,98	0,00	0,00
25	424,9	451,8	7,9	10,8	11,3	8,62	2,59	3,02	2,93	1,93	0,00	0,00
26	435,6	452,3	7,3	9,8	15,65	8,41	3,72	2,05	2,92	2,41	0,00	0,00
27	414,1	449,6	6,7	12,4	11,03	5,37	2,13	1,74	4,17	4,93	0,00	0,00
28	447,7	491,0	7,9	13,0	18,47	6,24	3,68	2,24	2,33	2,97	0,00	0,00

Tabla A.4.1.7. Propiedades físicas y alabeos pre y post tratamiento: Ensayo 7.

Viga	Densidad (kg/m ³)		CH (%)		Tor (mm)		Arq (mm)		Enc (mm)		Aca (mm)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	501,4	509,5	9,3	12,3	9,61	7,84	0,00	3,67	2,62	3,45	0,00	0,00
2	412,7	440,3	7,0	12,9	16,4	1,00	6,24	15,2	5,88	5,4	0,00	0,00
3	415,4	443,7	7,5	14,3	9,29	1,00	4,66	3,5	3,51	3,6	0,00	0,00
4	414,4	443,4	8,0	14,1	11,22	1,00	2,46	7,87	2,67	2,71	0,00	0,00
5	426,6	429,1	7,9	9,7	16,18	8,44	2,03	3,89	5,47	6,85	0,00	0,00
6	457,7	457,9	8,3	10,0	10,92	6,61	2,4	2,29	3,13	2,74	0,00	0,00
7	421,6	430,2	7,4	9,7	17,9	11,96	0,00	2,39	3,88	4,82	0,00	0,00
8	399,8	413,4	7,0	10,0	14,93	6,11	2,74	2,48	5,22	3,85	0,00	0,00
9	452,3	459,1	8,7	10,4	13,69	8,81	2,63	2,03	4,19	3,33	0,00	0,00
10	450,4	454,1	8,4	10,7	15,65	9,45	3,16	2,58	2,18	2,94	0,00	0,00
11	491,9	490,2	10,3	11,5	18,13	10,25	2,55	1,31	4,11	3,26	0,00	0,00
12	488,6	487,5	8,4	9,9	16,69	9,12	2,21	2,52	2,52	3,76	0,00	0,00
13	408,5	411,9	6,9	8,5	14,91	12,07	2,7	6,4	2,2	2,54	0,00	0,00
14	431,6	441,9	8,7	9,7	17,96	13,5	2,07	1,68	3,39	4,22	0,00	0,00
15	405,9	411,5	8,2	9,6	14,19	11,77	4,73	2,83	2,82	3,25	0,00	0,00
16	460,7	468,9	8,3	10,3	16,58	9,8	2,27	2,6	3,52	3,34	0,00	0,00
17	451,0	450,8	8,6	8,3	15,26	14,87	1,78	2,07	1,75	2,21	0,00	0,00
18	414,6	421,6	7,1	7,9	12,17	12,45	3,05	1,88	3,98	4,94	0,00	0,00
19	425,6	436,2	8,0	10,0	11,48	8,46	4,4	3,62	1,69	2,4	0,00	0,00
20	384,3	396,8	7,1	9,8	14,9	7,70	3,02	2,56	2,38	3,75	0,00	0,00
21	436,9	441,2	7,8	9,0	11,79	11,33	2,04	1,75	2,59	2,56	0,00	0,00
22	398,6	411,4	8,2	9,2	17,05	9,3	2,68	2,43	2,4	4,26	0,00	0,00
23	433,5	457,4	8,5	11,4	19,9	11,48	1,68	2,33	2,17	2,00	0,00	0,00
24	435,5	449,3	8,7	11,9	13,54	8,77	1,76	2,63	1,86	3,89	0,00	0,00
25	431,4	453,1	8,4	10,3	4,03	3,67	2,46	2,38	1,68	1,75	0,00	0,00
26	400,9	431,0	7,3	9,8	10,6	8,22	1,74	2,93	2,26	2,69	0,00	0,00
27	470,1	495,4	8,3	11,0	14,81	8,22	0,00	2,47	2,84	4,02	0,00	0,00
28	432,9	607,5	8,8	10,9	15,5	7,7	2,91	2,5	2,19	2,82	0,00	0,00

Tabla A.4.1.8. Propiedades físicas y alabeos pre y post tratamiento: Ensayo 8.

Viga	Densidad (kg/m ³)		CH (%)		Tor (mm)		Arq (mm)		Enc (mm)		Aca (mm)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	481,4	497,3	9,3	23,3	11,92	5,66	2,24	1,97	2,66	2,29	0,00	0,00
2	453,1	466,9	7,4	21,1	7,66	3,71	2,63	2,47	2,62	2,88	0,00	0,00
3	415,2	439,2	7,6	21,4	8,61	3,87	2,05	2,76	3,25	3,23	0,00	0,00
4	488,6	508,6	8,9	20,3	11,72	2,99	2,94	2,84	2,4	2,65	0,00	0,00
5	438,8	446,2	9,1	18,6	13,95	9,23	2,07	1,58	1,78	2,9	0,00	0,00
6	434,4	441,3	8,8	16,8	9,01	3,88	4,08	3,09	4,32	4,9	0,00	0,00
7	514,0	520,2	10,1	19,4	10,53	4,7	3,13	3,4	3,27	3,53	0,00	0,00
8	437,1	447,8	9,2	16,9	11,49	4,01	2,94	2,35	4,7	2,77	0,00	0,00
9	482,2	488,4	10,0	16,8	12,4	9,3	1,28	2,46	3,47	4,94	0,00	0,00
10	442,6	453,0	9,3	17,5	12,73	7,23	2,82	2,3	2,98	1,78	0,00	0,00
11	432,3	443,9	8,0	16,6	18,27	8,35	2,87	2,65	2,3	3,39	0,00	0,00
12	447,0	463,9	9,9	21,2	12,69	5,36	2,37	2,64	2,22	1,97	0,00	0,00
13	457,2	462,6	9,6	17,6	14,51	9,87	1,92	2,24	3,14	3,81	0,00	0,00
14	425,9	441,1	7,8	16,9	8,81	4,89	3,6	2,58	2,34	2,16	0,00	0,00
15	417,2	426,2	7,8	14,8	13,36	6,67	4,1	1,52	2,93	1,75	0,00	0,00
16	443,7	456,3	9,4	20,4	12,19	4,6	2,35	2,28	2,37	2,66	0,00	0,00
17	403,4	409,4	7,7	15,9	10,34	7,3	2,06	2,4	2,63	2,81	0,00	0,00
18	438,5	447,0	8,9	16,4	22,98	8,41	2,38	2,78	1,82	2,8	0,00	0,00
19	437,2	452,4	8,1	18,3	9,57	4,3	4,43	2,9	2,69	2,41	0,00	0,00
20	503,9	508,9	8,7	19,2	11,78	5,63	3,22	1,85	3,05	2,89	0,00	0,00
21	402,1	407,9	7,3	14,6	14,23	9,09	2,61	1,48	3,04	4,89	0,00	0,00
22	425,7	433,3	7,9	16,2	12,54	9,36	2,01	3,07	5,34	5,95	0,00	0,00
23	422,9	433,4	7,0	15,5	11,47	5,16	2,68	2,78	2,57	2,88	0,00	0,00
24	402,6	414,7	6,9	15,8	12,41	7,28	2,72	2,44	2,45	3,93	0,00	0,00
25	405,8	418,3	7,1	15,0	16,97	8,98	3,25	2,97	5,69	6,85	0,00	0,00
26	435,4	456,8	9,0	18,3	17,07	5,84	3,23	2,68	3,14	3,14	0,00	0,00
27	440,1	457,1	8,9	17,2	19,61	5,58	2,82	3,44	5,86	5,46	0,00	0,00
28	443,9	450,0	7,9	16,3	11,95	5,23	1,66	2,2	2,36	2,29	0,00	0,00

Tabla A.4.1.9. Propiedades físicas y alabeos pre y post tratamiento: Ensayo 9.

Viga	Densidad (kg/m ³)		CH (%)		Tor (mm)		Arq (mm)		Enc (mm)		Aca (mm)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	483,6	486,5	8,8	7,8	22,03	24,03	3,2	6,37	2,84	6,19	0,00	0,00
2	399,0	410,6	6,6	11,4	13,67	8,41	8,88	12,15	2,38	2,31	0,00	0,00
3	438,3	449,1	8,6	13,4	14,19	8,68	1,55	3,71	2,47	2,44	0,00	0,00
4	451,8	449,4	8,9	11,5	15,26	10,37	3,94	11,87	1,75	1,8	0,00	0,00
5	427,3	432,7	6,5	9,8	19,22	14,82	1,45	1,97	0,00	3,02	0,00	0,00
6	419,3	426,6	7,7	9,4	19,15	10,21	4,23	1,69	2,4	2,83	0,00	0,00
7	425,3	429,0	7,8	12,7	19,99	13,71	3,49	1,95	2,73	2,37	0,00	0,00
8	459,1	460,8	8,1	11,2	14,04	8,39	6,79	2,49	3,56	2,06	0,00	0,00
9	473,3	471,4	8,9	9,8	12,64	14,82	9,91	1,7	6,08	7,92	0,00	0,00
10	471,5	469,5	9,5	10,6	17,6	13,09	2,68	1,61	2,84	1,91	0,00	0,00
11	448,0	447,9	8,3	9,9	19,23	14,13	2,46	2,6	3,63	5,07	0,00	0,00
12	414,2	408,3	7,6	10,7	10,57	9,31	2,87	3,89	2,98	7,84	0,00	0,00
13	437,4	437,5	8,2	8,8	16,52	16,37	5,18	3,44	4,55	3,52	0,00	0,00
14	433,7	441,3	9,0	10,5	13,62	11,87	9,29	4,23	3,13	1,95	0,00	0,00
15	413,1	419,4	8,2	10,7	16,32	17,09	1,84	2,1	2,81	3,00	0,00	0,00
16	392,2	397,6	7,2	9,8	16,38	19,5	1,85	2,28	2,78	2,21	0,00	0,00
17	429,7	432,7	7,7	8,7	20	17,18	0,00	1,28	2,62	2,71	0,00	0,00
18	403,5	403,8	8,2	8,8	10,99	9,52	3,72	2,85	2,82	2,69	0,00	0,00
19	442,8	441,1	7,8	10,2	14,42	14,47	4,88	3,17	3,79	3,49	0,00	0,00
20	476,3	475,9	7,6	12,3	21,46	13,76	7,39	2,13	7,49	5,08	0,00	0,00
21	401,2	404,1	8,1	9,2	16,52	16,69	6,64	5,94	3,38	2,2	0,00	0,00
22	439,7	439,5	8,7	10,2	14,06	11,62	3,02	3,49	2,46	2,22	0,00	0,00
23	464,9	467,2	8,7	11,4	14,81	14,26	4,65	2,88	3,99	5,14	0,00	0,00
24	402,9	404,5	7,7	10,0	10,17	11,57	3,08	2,18	2,58	2,37	0,00	0,00
25	451,2	448,3	9,6	8,1	16,49	26,05	1,75	2,21	3,11	4,33	0,00	0,00
26	477,9	480,9	9,8	11,6	14,05	11,07	7,63	2,93	2,95	3,44	0,00	0,00
27	434,8	436,7	9,1	10,7	15,65	22,44	1,75	2,65	2,9	3,8	0,00	0,00
28	410,1	413,9	6,9	7,9	17,01	16,65	2,77	1,79	2,44	1,96	0,00	0,00

Parte 2

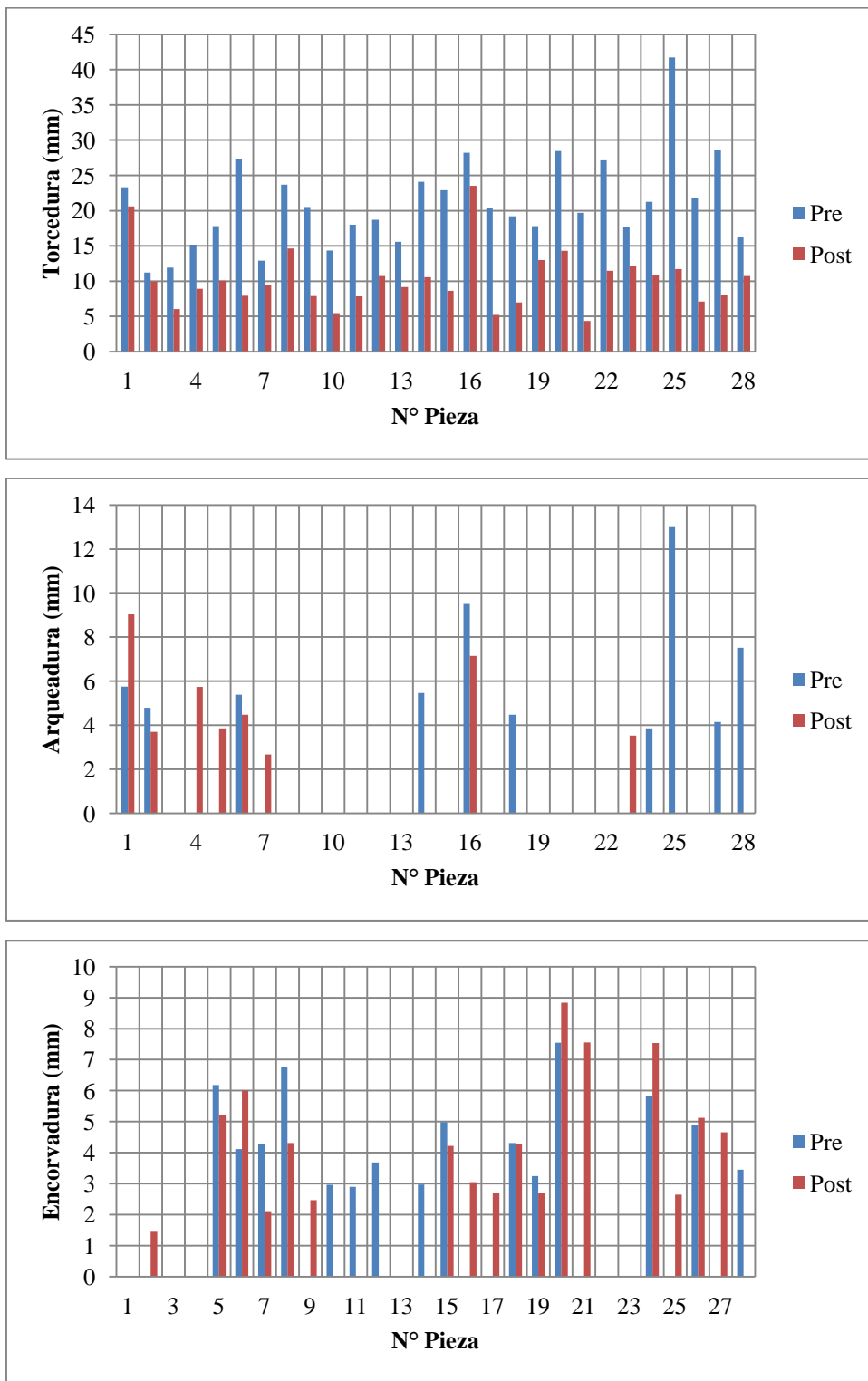


Figura A.4.2.1. Ensayo n°1: Alabeos pre y post tratamiento.

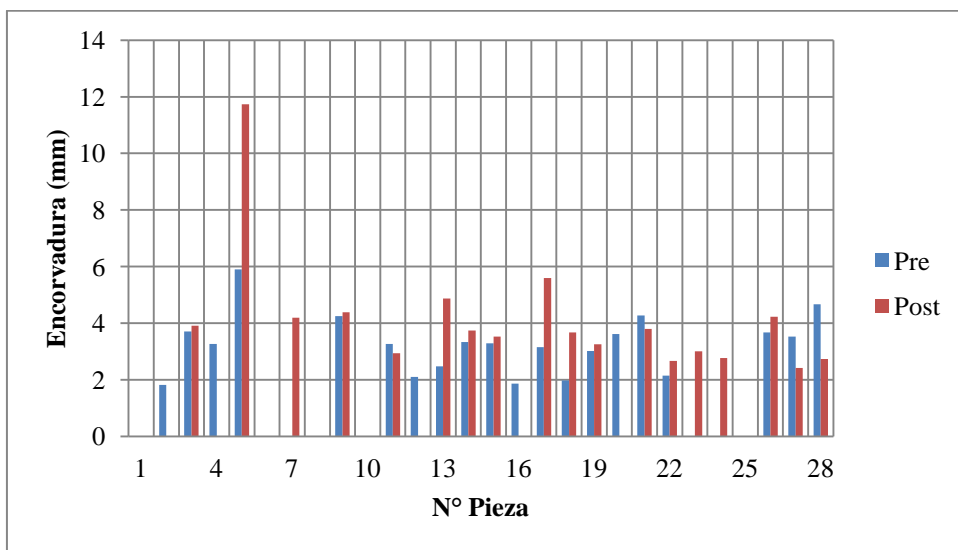
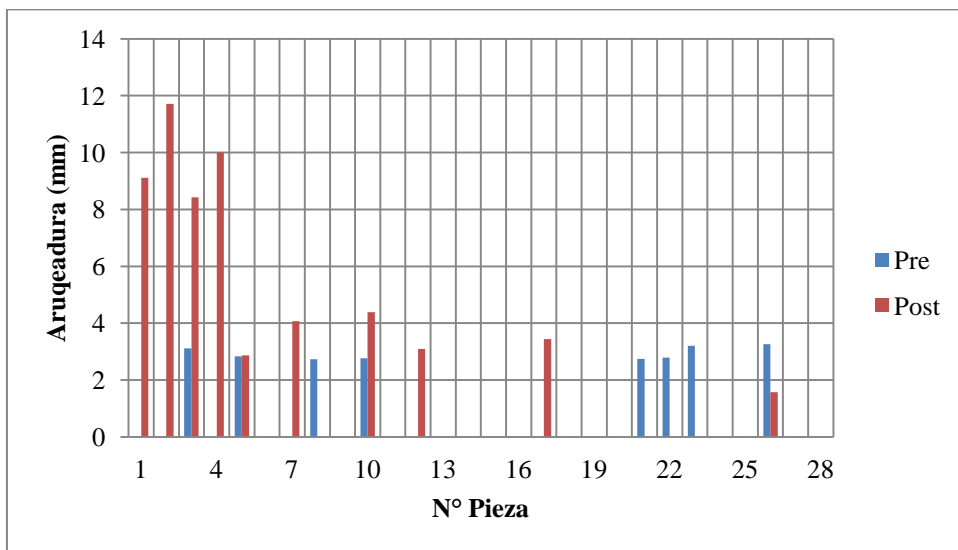
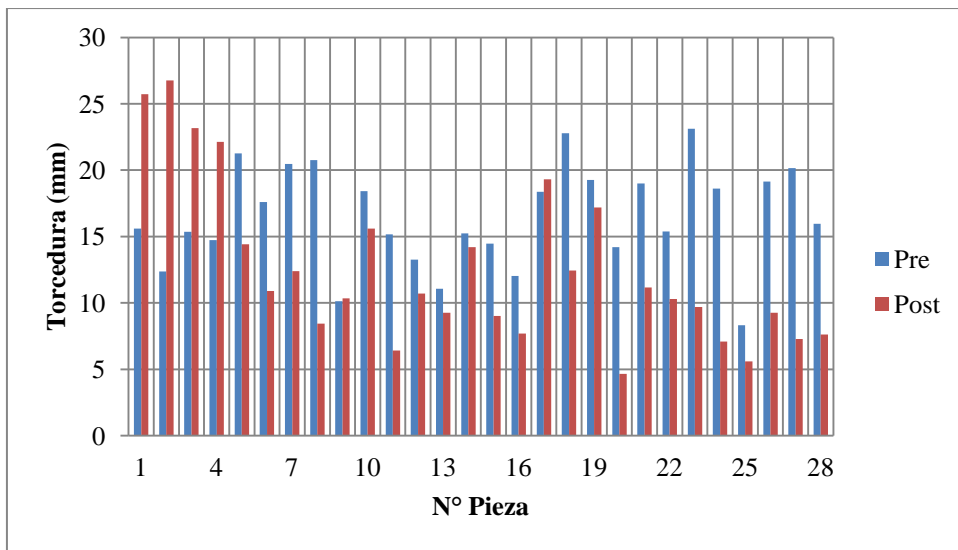


Figura A.4.2.2. Ensayo n°2: Alabeos pre y post tratamiento.

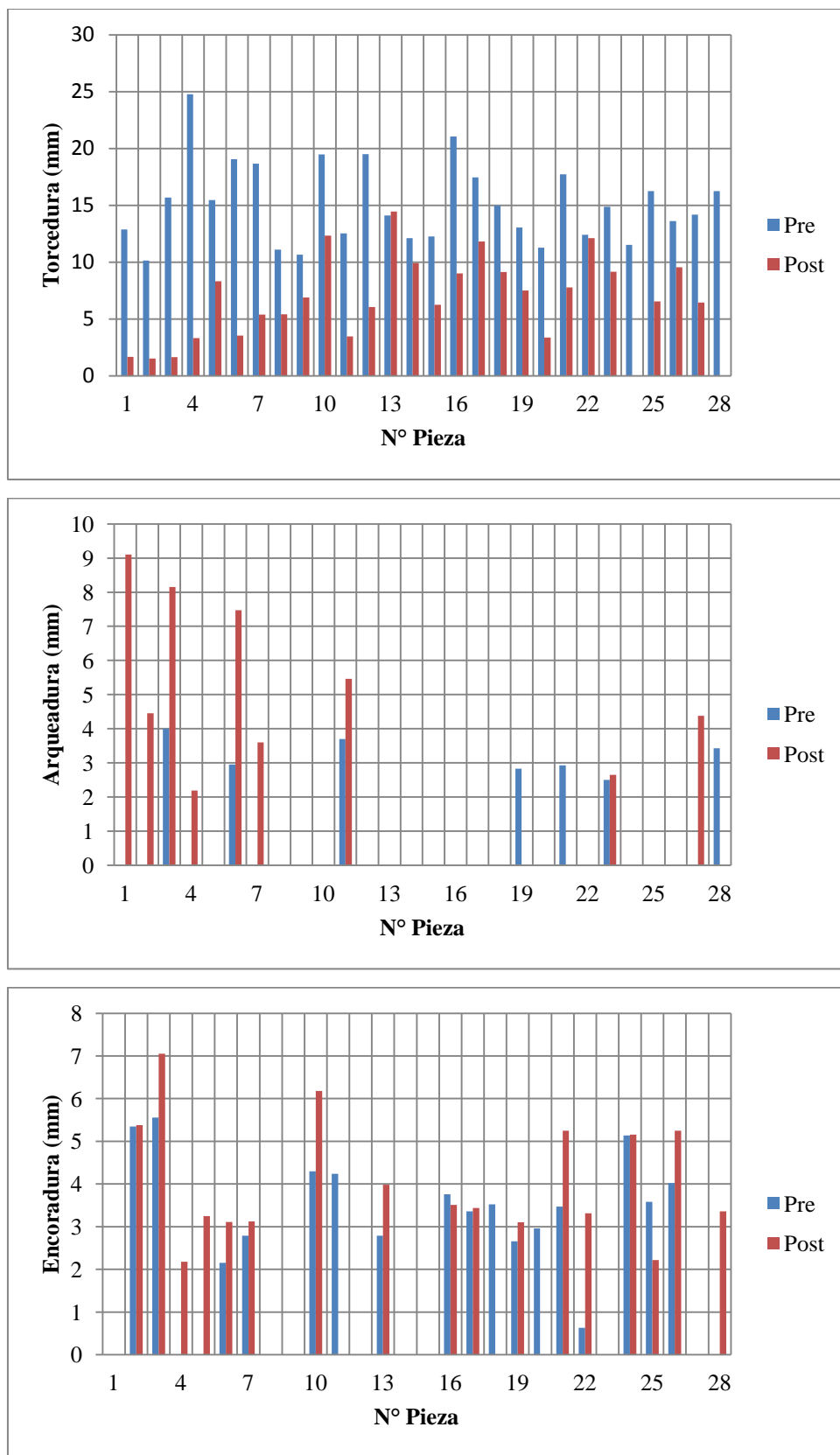


Figura A.4.2.3. Ensayo n°3: Alabeos pre y post tratamiento.

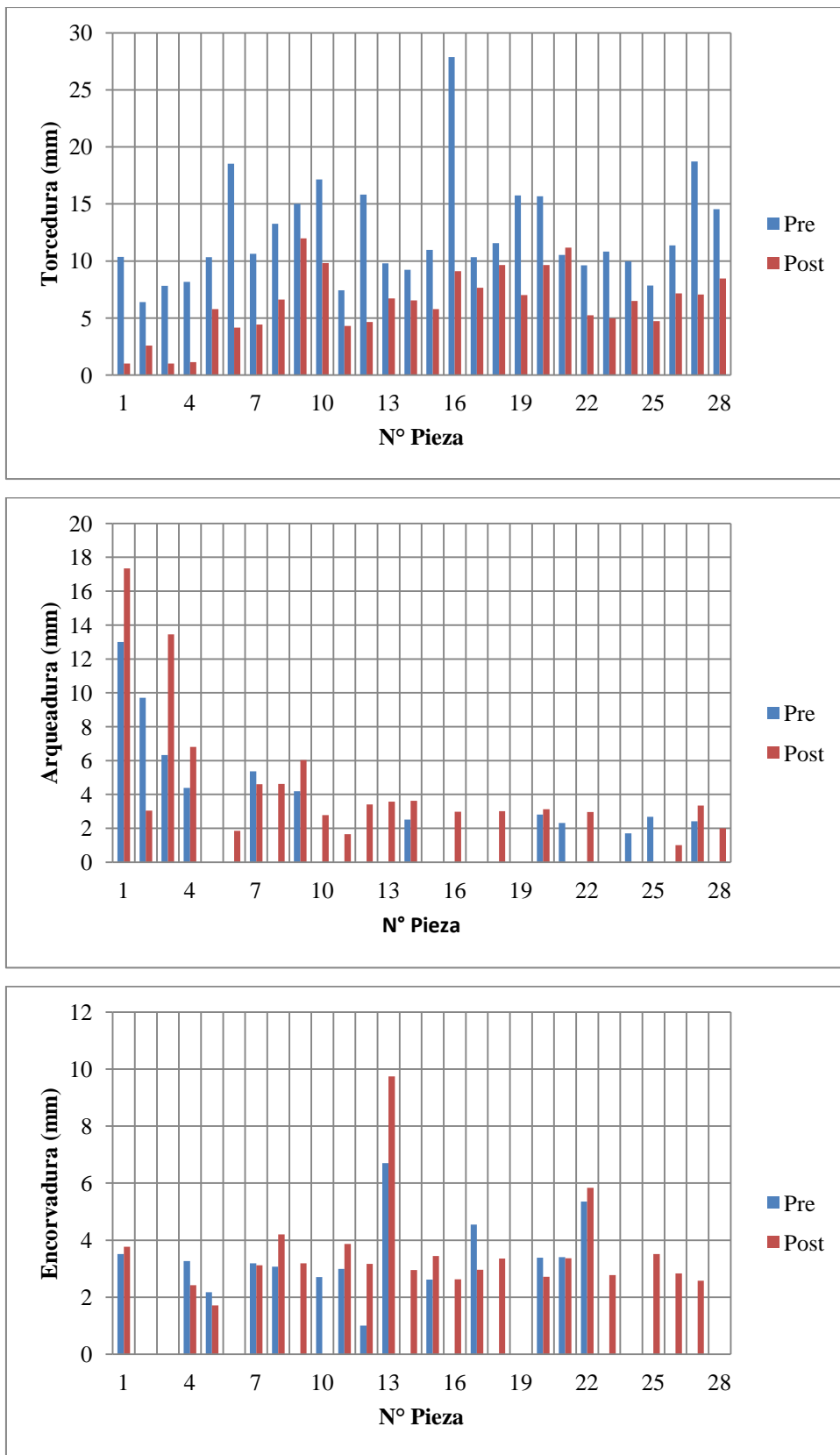


Figura A.4.2.4. Ensayo n°4: Alabeos pre y post tratamiento.

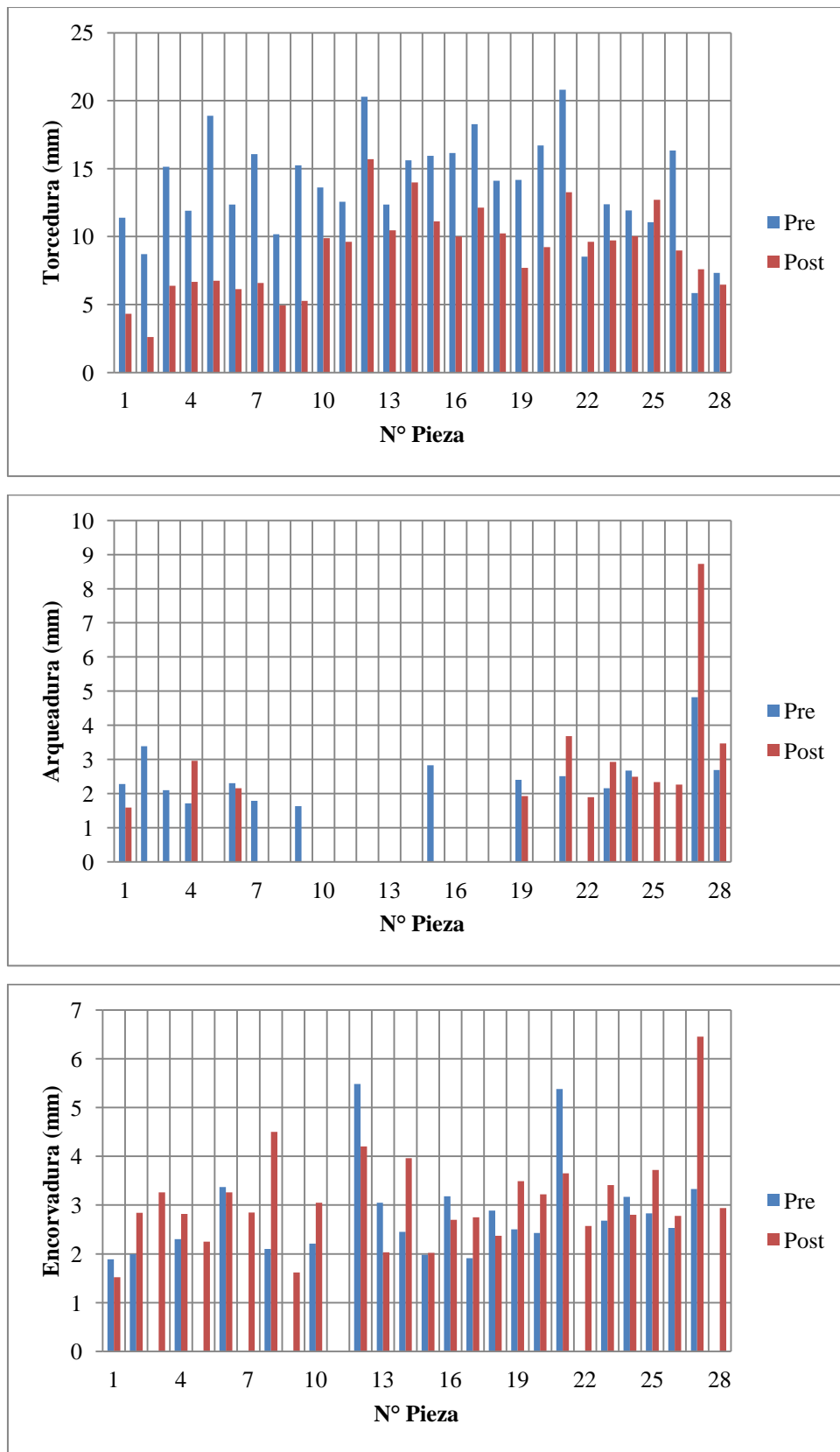


Figura A.4.2.5. Ensayo n°5: Alabeos pre y post tratamiento.

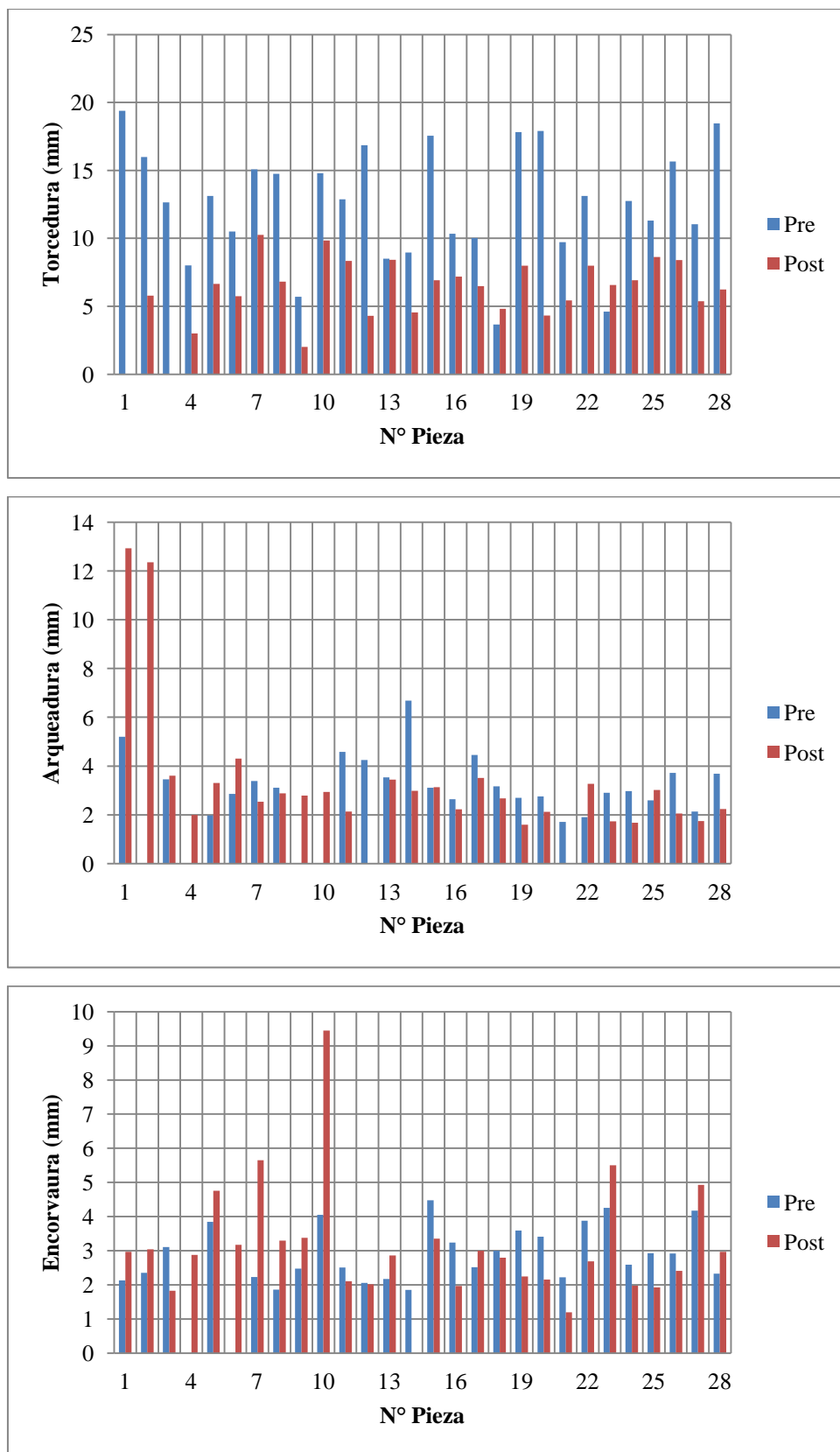


Figura A.4.2.6. Ensayo n°6: Alabeos pre y post tratamiento.

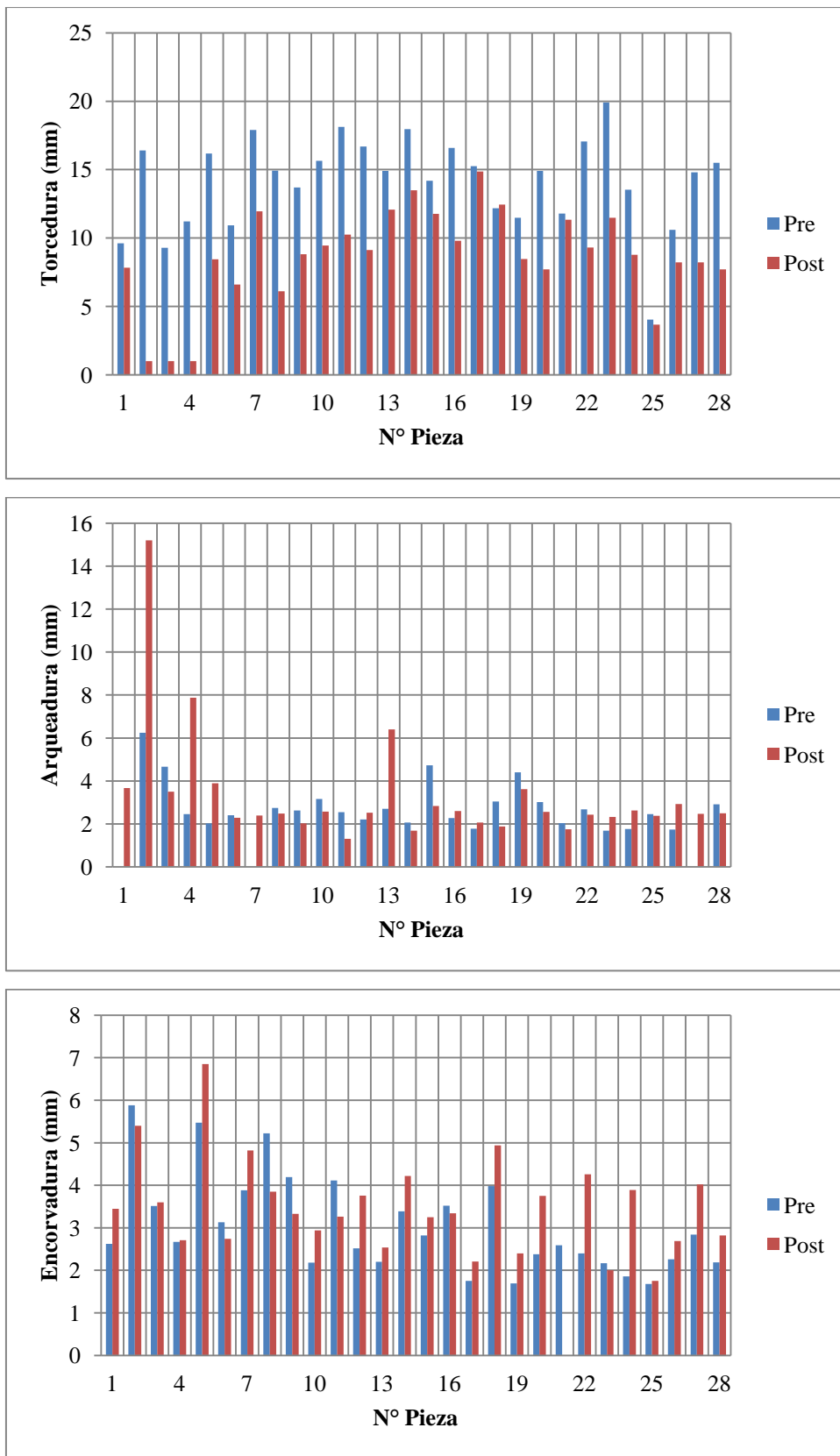


Figura A.4.2.7. Ensayo n°7: Alabeos pre y post tratamiento.

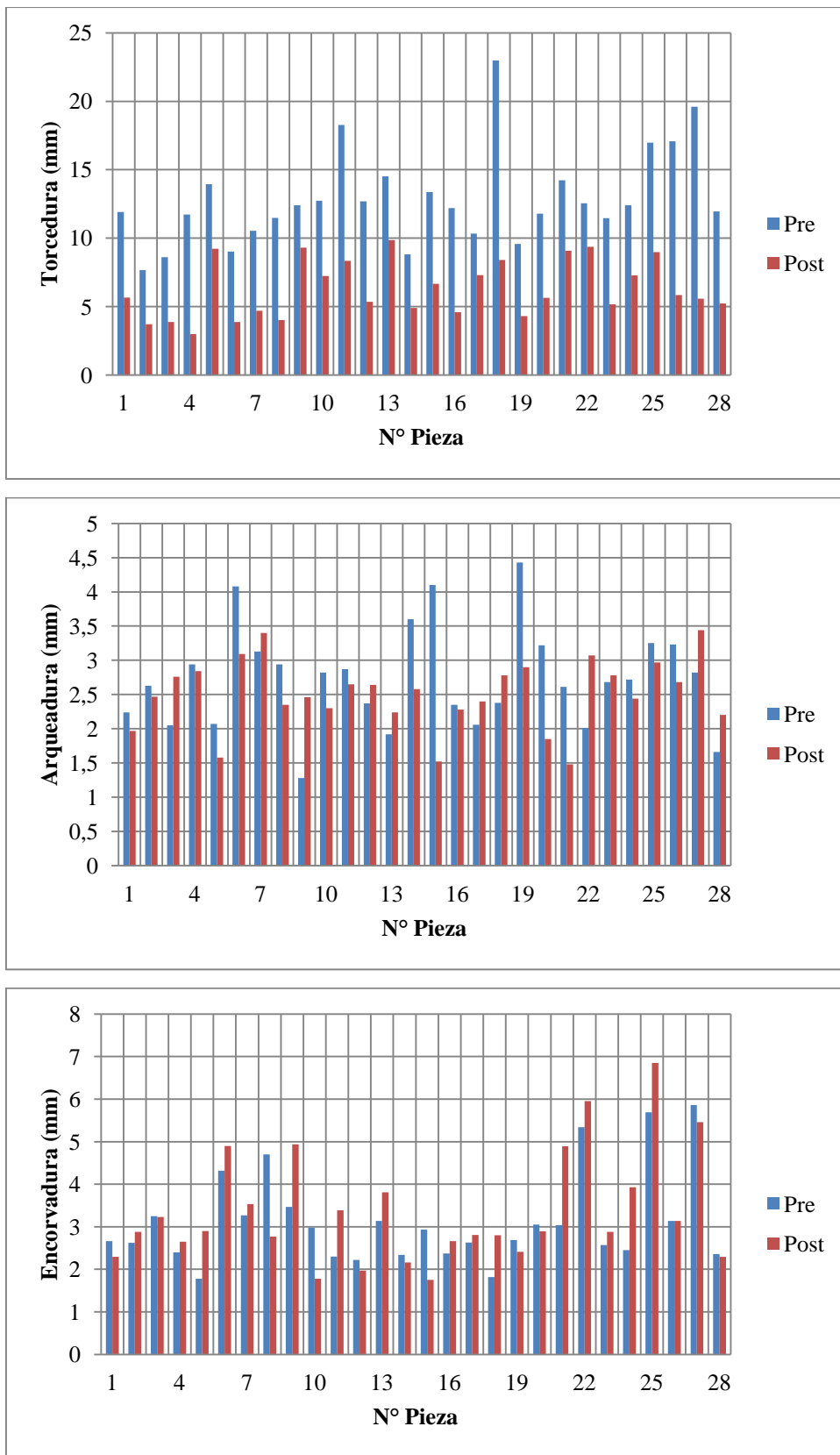


Figura A.4.2.8. Ensayo n°8: Alabeos pre y post tratamiento.

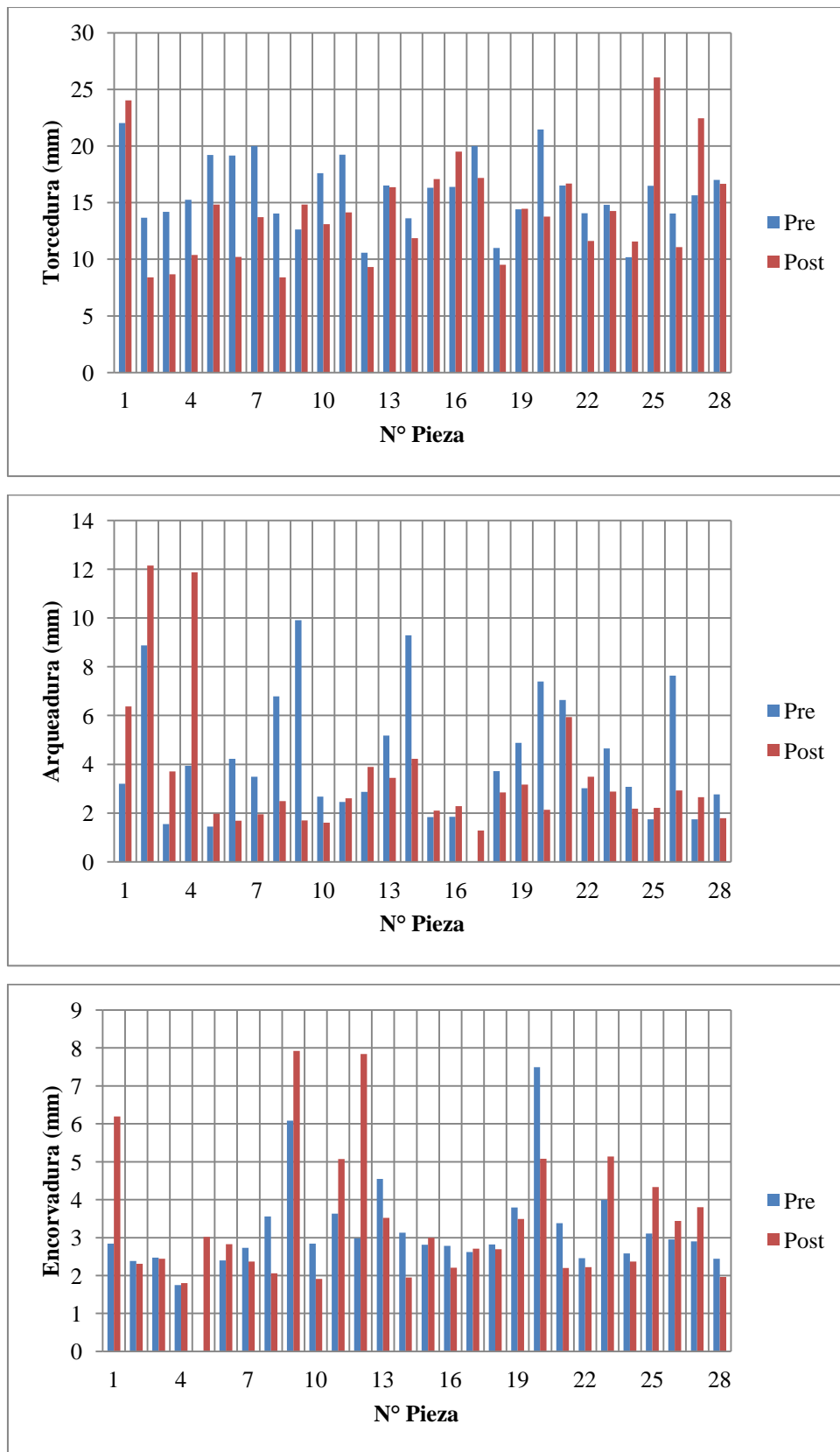


Figura A.4.2.9. Ensayo n°9: Alabeos pre y post tratamiento.

ANEXO B

Parte 1

Tabla B.4.1.1. Coeficientes de Alabeo (C) e Índice de recuperación de alabeos (R_A): Ensayo 1.

Viga	Tor (mm)			Arq (mm)			Enc (mm)			Aca (mm)		
	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)
1	2,38	1,98	39,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,63	0,44	18,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,73	0,00	72,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,20	0,29	90,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,58	0,46	112,03	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	12,36	0,00	0,00	0,00
6	2,95	0,15	280,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	-9,09	0,00	0,00	0,00
7	0,87	0,37	50,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	2,43	1,12	131,01	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	23,09	0,00	0,00	0,00
9	1,97	0,14	182,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,08	0,00	107,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1,61	0,14	147,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,71	0,55	115,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	1,26	0,33	93,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	2,49	0,53	196,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	2,32	0,25	206,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	3,09	2,41	67,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	1,96	0,00	195,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	1,79	0,01	177,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	1,58	0,88	69,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	3,12	1,07	205,22	0,00	0,00	0,00	0,37	0,61	-23,45	0,00	0,00	0,00
21	1,85	0,00	185,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	-37,45	0,00	0,00	0,00
22	2,93	0,66	227,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	1,56	0,76	80,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	2,08	0,58	150,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,37	-31,27	0,00	0,00	0,00
25	5,05	0,70	435,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	2,17	0,03	213,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	3,16	0,17	298,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	1,34	0,55	79,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
\bar{x}	2,03	0,52	151,04	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	-2,35	0,00	0,00	0,00
DS	0,92	0,57	89,40	0,00	0,00	0,00	0,08	0,14	11,25	0,00	0,00	0,00

Tabla B.4.1.2. Coeficientes de Alabeo (C) e Índice de recuperación de alabeos (R_A): Ensayo 2.

Viga	Tor (mm)			Arq (mm)			Enc (mm)			Aca (mm)		
	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)
1	1,23	2,68	-144,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,77	2,82	-205,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,19	2,31	-111,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,10	2,16	-105,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	2,04	1,06	97,71	0,00	0,00	0,00	0,07	1,13	-106,00	0,00	0,00	0,00
6	1,52	0,56	96,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1,92	0,77	115,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,97	0,20	176,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,45	0,48	-3,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,63	1,23	40,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1,17	0,00	116,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,90	0,53	36,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,58	0,32	25,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	1,18	1,03	14,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	1,07	0,29	77,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,72	0,10	61,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	1,63	1,76	-13,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	-1,64	0,00	0,00	0,00
18	2,25	0,78	147,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	1,75	1,45	29,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	1,03	0,00	103,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	1,71	0,60	111,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	1,20	0,47	72,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	2,30	0,39	191,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	1,66	0,01	164,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,19	0,00	18,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	1,74	0,32	141,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	1,88	0,04	183,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	1,28	0,09	119,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
\bar{x}	1,36	0,80	55,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	-3,84	0,00	0,00	0,00
DS	0,53	0,83	98,89	0,00	0,00	0,00	0,01	0,21	19,66	0,00	0,00	0,00

Tabla B.4.1.3. Coeficientes de Alabeo (C) e Índice de recuperación de alabeos (R_A): Ensayo 3.

Viga	Tor (mm)			Arq (mm)			Enc (mm)			Aca (mm)		
	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)
1	0,84	0,00	83,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,45	0,00	44,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,24	0,00	124,14	0,00	0,00	0,00	0,01	0,28	-27,09	0,00	0,00	0,00
4	2,54	0,00	253,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,21	0,19	101,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	1,72	0,00	172,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1,66	0,00	166,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,59	0,00	58,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,52	0,00	52,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,78	0,76	102,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	-12,36	0,00	0,00	0,00
11	0,79	0,00	79,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,78	0,00	178,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	1,01	1,06	-5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,73	0,42	31,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,75	0,00	75,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	2,01	0,29	172,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	1,49	0,69	80,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	1,14	0,30	83,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,87	0,07	79,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,61	0,00	61,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	1,53	0,11	141,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,77	0,73	4,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	1,12	0,31	81,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,64	0,00	64,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	1,32	0,00	132,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	0,95	0,36	58,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	1,03	0,00	102,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	1,32	0,00	132,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
\bar{x}	1,16	0,19	96,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-1,41	0,00	0,00	0,00
DS	0,50	0,29	56,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	5,45	0,00	0,00	0,00

Tabla B.4.1.4. Coeficientes de Alabeo (C) e Índice de recuperación de alabeos (R_A): Ensayo 4.

Viga	Tor (mm)			Arq (mm)			Enc (mm)			Aca (mm)		
	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)
1	0,48	0,00	47,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,12	0,00	11,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,17	0,00	16,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,47	0,00	47,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	1,65	0,00	164,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,52	0,00	51,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,89	0,00	89,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	1,14	0,71	43,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,45	0,40	104,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,06	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,26	0,00	126,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,40	0,00	39,86	0,00	0,00	0,00	0,22	0,77	-55,27	0,00	0,00	0,00
14	0,32	0,00	31,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,57	0,00	56,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	2,98	0,30	268,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,48	0,09	38,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,65	0,38	27,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	1,25	0,00	124,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	1,24	0,38	86,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,50	0,60	-9,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,37	0,00	37,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	-6,18	0,00	0,00	0,00
23	0,55	0,00	54,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,42	0,00	42,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,12	0,00	12,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	0,62	0,02	60,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	1,67	0,01	166,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	1,08	0,21	87,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
\bar{x}	0,77	0,11	65,46	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	-2,19	0,00	0,00	0,00
DS	0,64	0,20	59,66	0,00	0,00	0,00	0,04	0,14	10,28	0,00	0,00	0,00

Tabla B.4.1.5. Coeficientes de Alabeo (C) e Índice de recuperación de alabeos (R_A): Ensayo 5.

Viga	Tor (mm)			Arq (mm)			Enc (mm)			Aca (mm)		
	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)
1	0,63	0,00	62,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,25	0,00	24,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,16	0,00	116,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,70	0,00	70,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,70	0,00	170,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,76	0,00	76,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1,29	0,00	129,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,45	0,00	45,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	1,18	0,00	117,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,94	0,41	53,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,80	0,37	42,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,90	1,24	65,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,76	0,49	27,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	1,23	1,00	23,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	1,28	0,59	68,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	1,31	0,43	88,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	1,61	0,73	87,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	1,02	0,46	55,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	1,03	0,10	92,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	1,39	0,32	106,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	1,97	0,89	107,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,22	0,37	-15,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,77	0,39	37,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,70	0,43	27,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,58	0,81	-23,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	1,33	0,28	105,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,00	0,09	-8,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	-17,27	0,00	0,00	0,00
28	0,05	0,00	4,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
\bar{x}	0,96	0,34	62,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,62	0,00	0,00	0,00
DS	0,51	0,35	45,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	3,21	0,00	0,00	0,00

Tabla B.4.1.6. Coeficientes de Alabeo (C) e Índice de recuperación de alabeos (R_A): Ensayo 6.

Viga	Tor (mm)			Arq (mm)			Enc (mm)			Aca (mm)		
	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)
1	1,77	0,00	177,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,28	0,00	128,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,81	0,00	80,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,15	0,00	14,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,88	0,00	87,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,50	0,00	50,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1,15	0,47	68,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	-2,73	0,00	0,00	0,00
8	1,11	0,00	110,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,11	0,41	70,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	-71,82	0,00	0,00	0,00
11	0,84	0,19	64,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,41	0,00	140,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,22	0,20	1,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,28	0,00	28,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	1,51	0,00	150,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,48	0,03	45,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,43	0,00	43,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	1,55	0,14	140,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	1,56	0,00	155,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,39	0,00	38,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,88	0,14	73,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,82	0,00	82,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,61	0,23	38,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	1,24	0,20	103,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,58	0,00	57,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	1,64	0,00	163,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
\bar{x}	0,83	0,07	75,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	-2,66	0,00	0,00	0,00
DS	0,53	0,13	52,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	13,32	0,00	0,00	0,00

Tabla B.4.1.7. Coeficientes de Alabeo (C) e Índice de recuperación de alabeos (R_A): Ensayo 7.

Viga	Tor (mm)			Arq (mm)			Enc (mm)			Aca (mm)		
	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)
1	0,37	0,12	25,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,34	0,00	134,29	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	6,91	0,00	0,00	0,00
3	0,33	0,00	32,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,60	0,00	60,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,31	0,21	110,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	-24,55	0,00	0,00	0,00
6	0,56	0,00	56,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1,56	0,71	84,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,13	0,00	113,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,96	0,26	69,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,24	0,35	88,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1,59	0,46	112,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,38	0,30	108,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	1,13	0,72	40,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	1,57	0,93	63,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	1,03	0,68	34,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	1,37	0,40	96,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	1,18	1,12	5,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,74	0,78	-4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,64	0,21	43,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	1,13	0,10	102,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,68	0,62	6,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	1,44	0,33	110,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	1,84	0,64	120,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,93	0,25	68,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	0,51	0,17	34,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	1,12	0,17	94,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	1,21	0,10	111,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
\bar{x}	1,03	0,34	68,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,63	0,00	0,00	0,00
DS	0,43	0,31	40,59	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	4,78	0,00	0,00	0,00

Tabla B.4.1.8. Coeficientes de Alabeo (C) e Índice de recuperación de alabeos (R_A): Ensayo 8.

Viga	Tor (mm)			Arq (mm)			Enc (mm)			Aca (mm)		
	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)
1	0,70	0,00	70,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,09	0,00	9,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,23	0,00	23,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,67	0,00	67,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,99	0,32	67,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,29	0,00	28,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,50	0,00	50,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,64	0,00	64,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,77	0,33	44,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,82	0,03	78,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1,61	0,19	141,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,81	0,00	81,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	1,07	0,41	66,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,26	0,00	25,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,91	0,00	90,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,74	0,00	74,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,48	0,04	43,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	2,28	0,20	208,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,37	0,00	36,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,68	0,00	68,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	1,03	0,30	73,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,79	0,34	45,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	-8,18	0,00	0,00	0,00
23	0,64	0,00	63,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,77	0,04	73,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	1,42	0,28	114,14	0,00	0,00	0,00	0,03	0,25	-21,09	0,00	0,00	0,00
26	1,44	0,00	143,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	1,80	0,00	180,14	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	6,55	0,00	0,00	0,00
28	0,71	0,00	70,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
\bar{x}	0,84	0,09	75,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,81	0,00	0,00	0,00
DS	0,49	0,14	45,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	4,38	0,00	0,00	0,00

Tabla B.4.1.9. Coeficientes de Alabeo (C) e Índice de recuperación de alabeos (R_A): Ensayo 9.

Viga	Tor (mm)			Arq (mm)			Enc (mm)			Aca (mm)		
	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)	C _{pre}	C _{post}	R _A (%)
1	2,15	2,43	-28,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	-12,55	0,00	0,00	0,00
2	0,95	0,20	75,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,03	0,24	78,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,18	0,48	69,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,75	1,12	62,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	1,74	0,46	127,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1,86	0,96	89,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,01	0,20	80,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,81	1,12	-31,14	0,00	0,00	0,00	0,11	0,44	-33,45	0,00	0,00	0,00
10	1,51	0,87	64,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1,75	1,02	72,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,51	0,33	18,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	-42,55	0,00	0,00	0,00
13	1,36	1,34	2,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,95	0,70	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	1,33	1,44	-11,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	1,34	1,79	-44,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	1,86	1,45	40,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,57	0,36	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	1,06	1,07	-0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	2,07	0,97	110,00	0,00	0,00	0,00	0,36	0,00	36,18	0,00	0,00	0,00
21	1,36	1,38	-2,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	1,01	0,66	34,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	1,12	1,04	7,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,45	0,65	-20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	1,36	2,72	-136,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	1,01	0,58	42,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	1,24	2,21	-97,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	1,43	1,38	5,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
\bar{x}	1,28	1,04	23,46	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	-1,87	0,00	0,00	0,00
DS	0,44	0,65	58,61	0,00	0,00	0,00	0,07	0,11	12,39	0,00	0,00	0,00

Parte 2

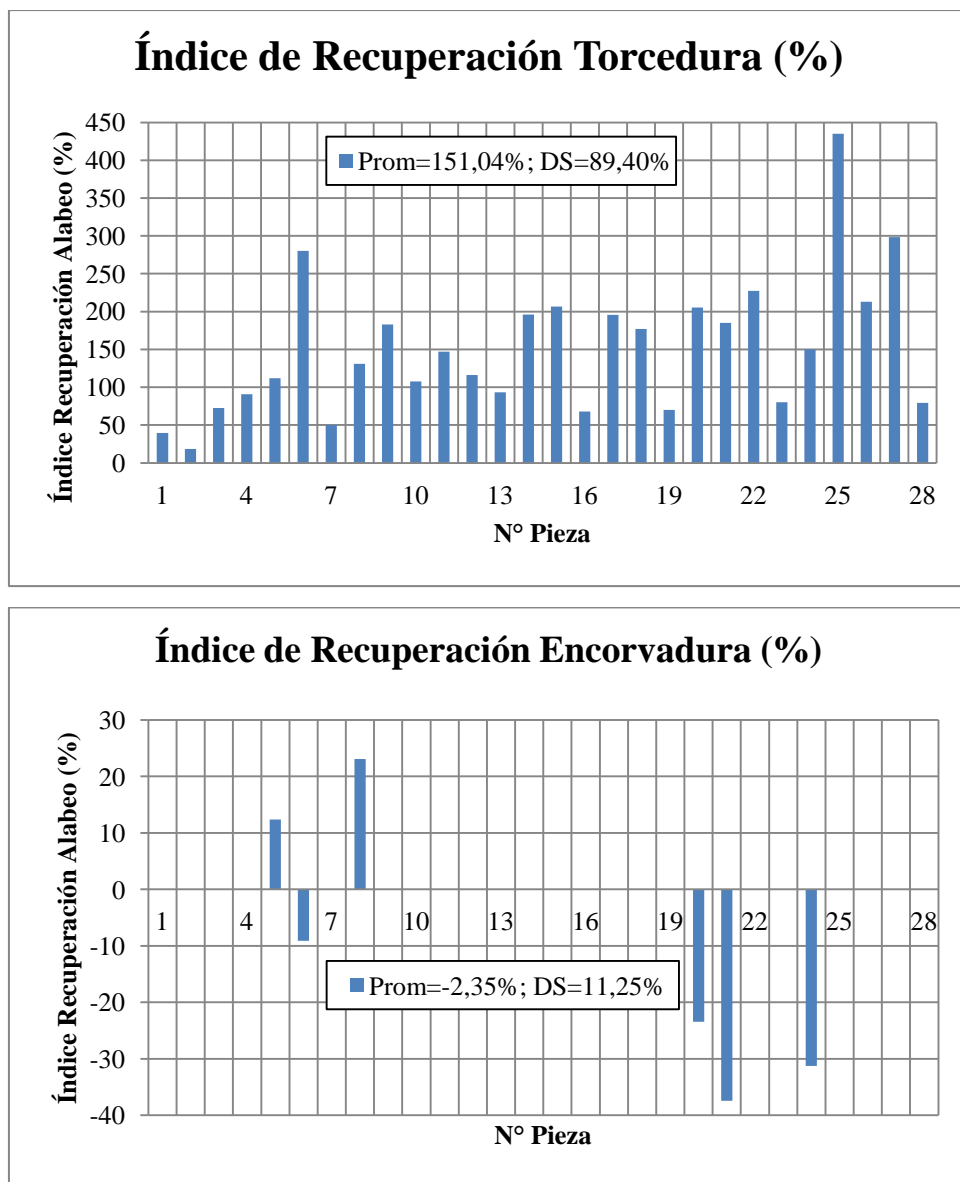


Figura B.4.2.1. Ensayo n°1: Índice de recuperación de alabeos post tratamiento.

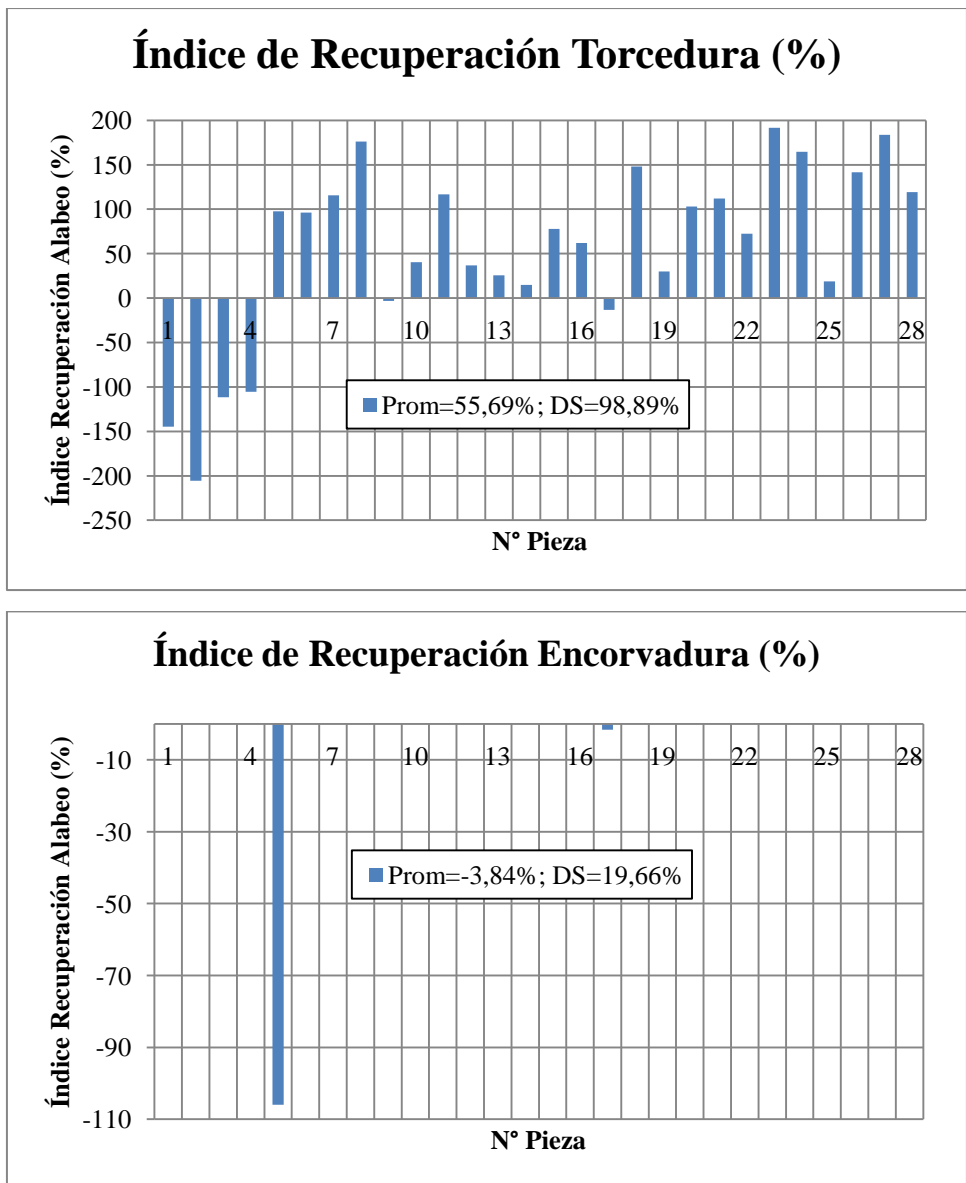


Figura B.4.2.2. Ensayo n°2: Índice de recuperación de alabeos post tratamiento.

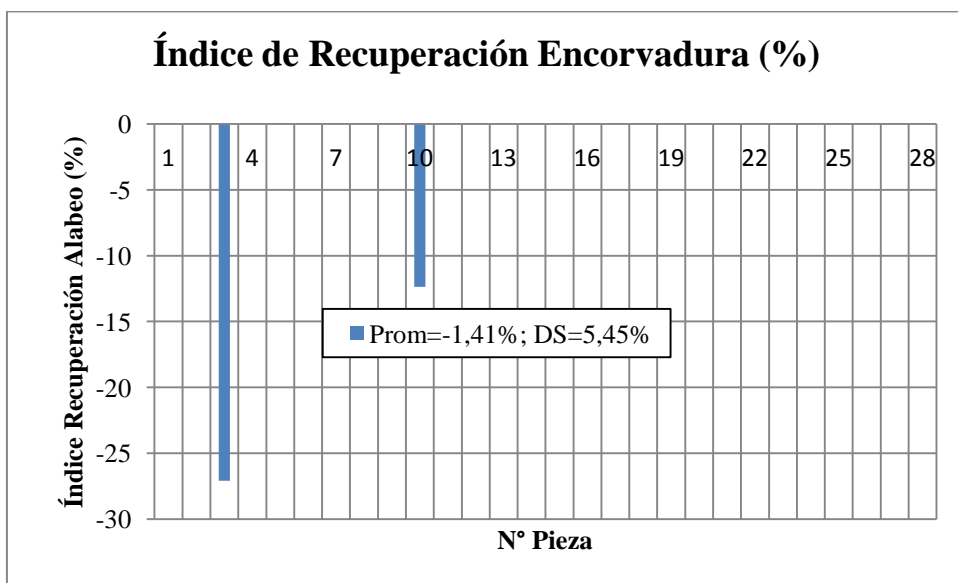
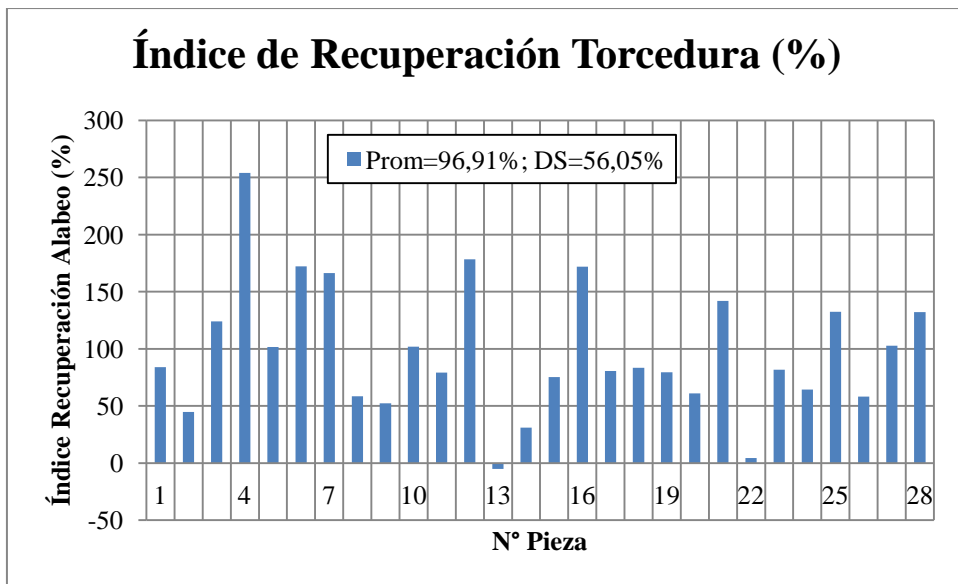


Figura B.4.2.3. Ensayo n°3: Índice de recuperación de alabeos post tratamiento.

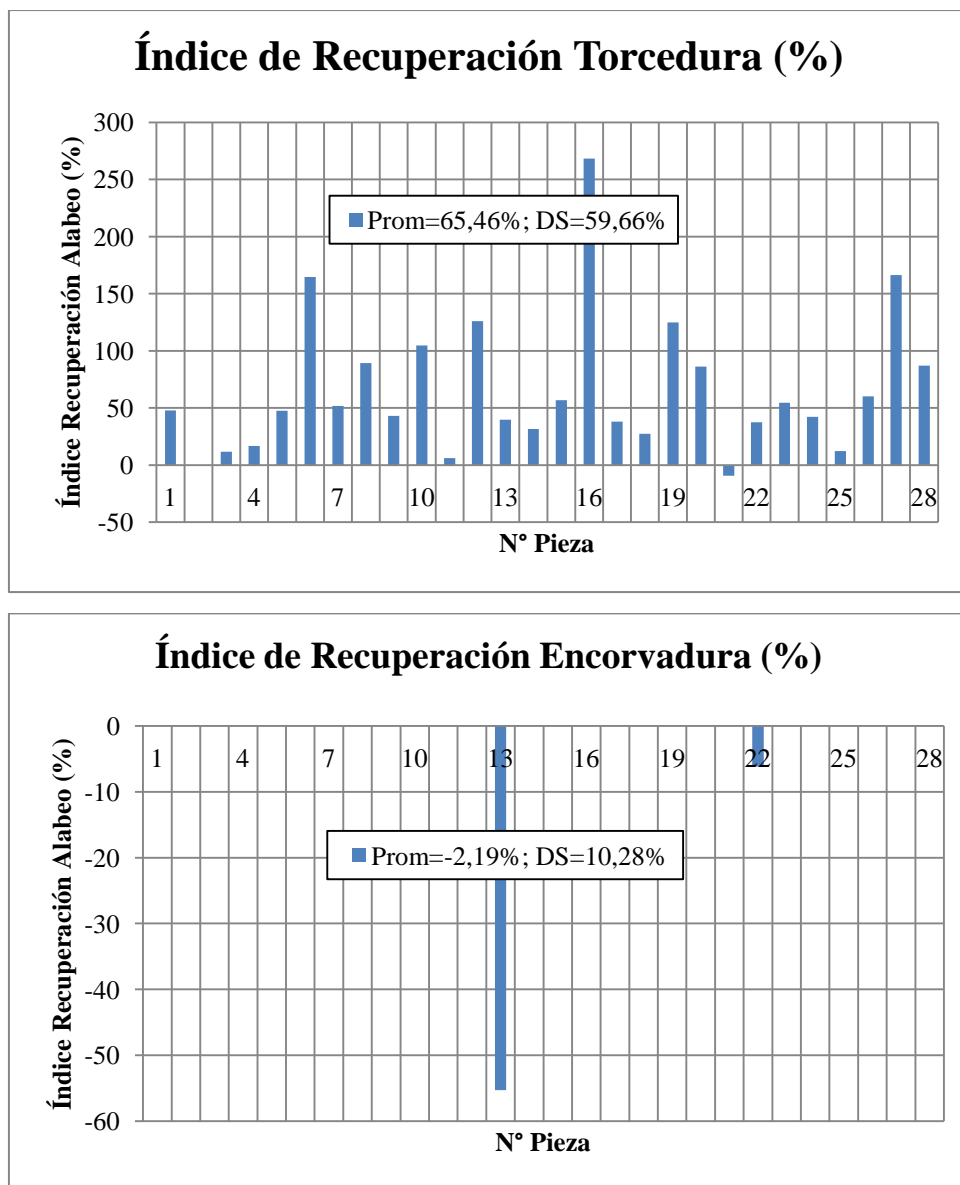


Figura B.4.2.4. Ensayo n°4: Índice de recuperación de alabeos post tratamiento.

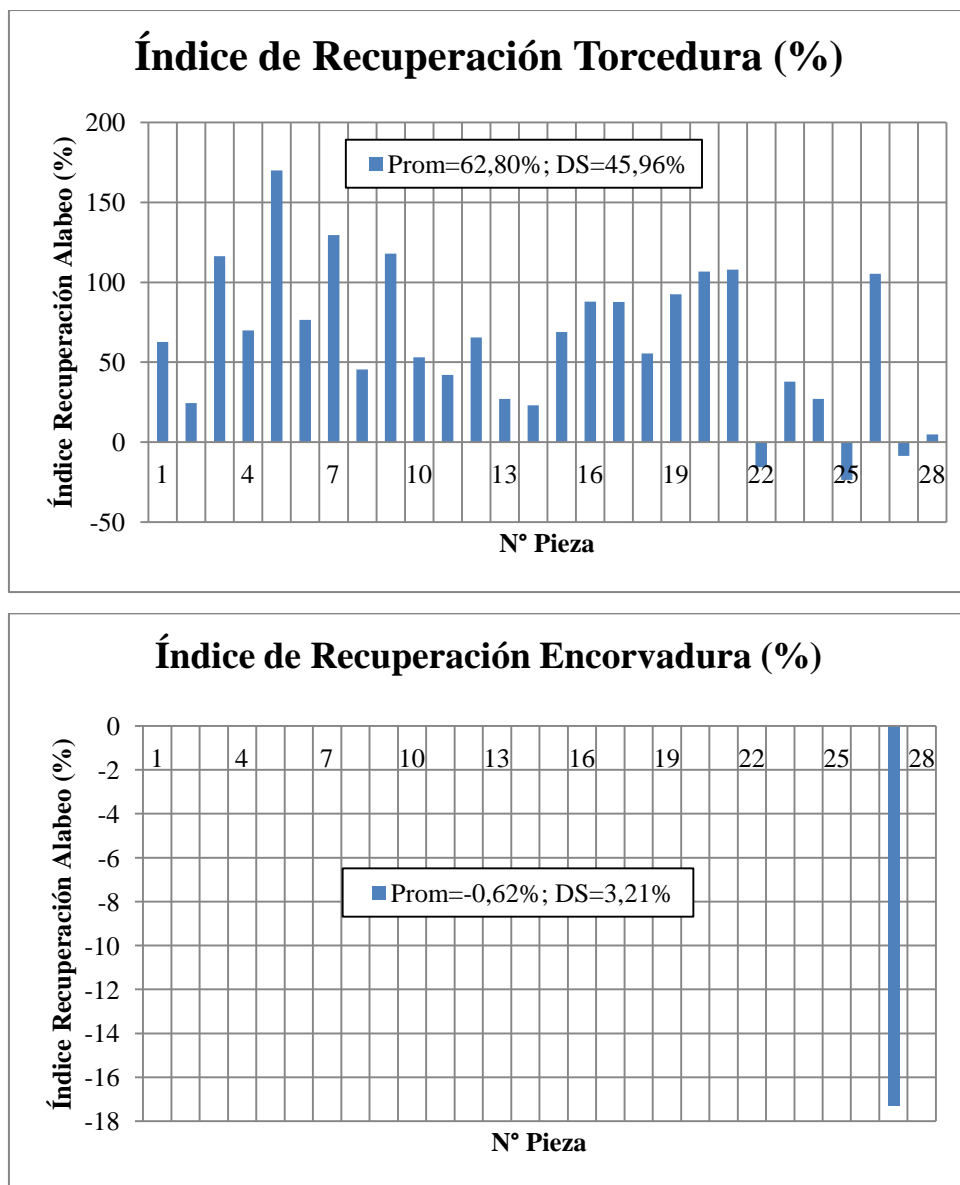


Figura B.4.2.5. Ensayo n°5: Índice de recuperación de alabeos post tratamiento.

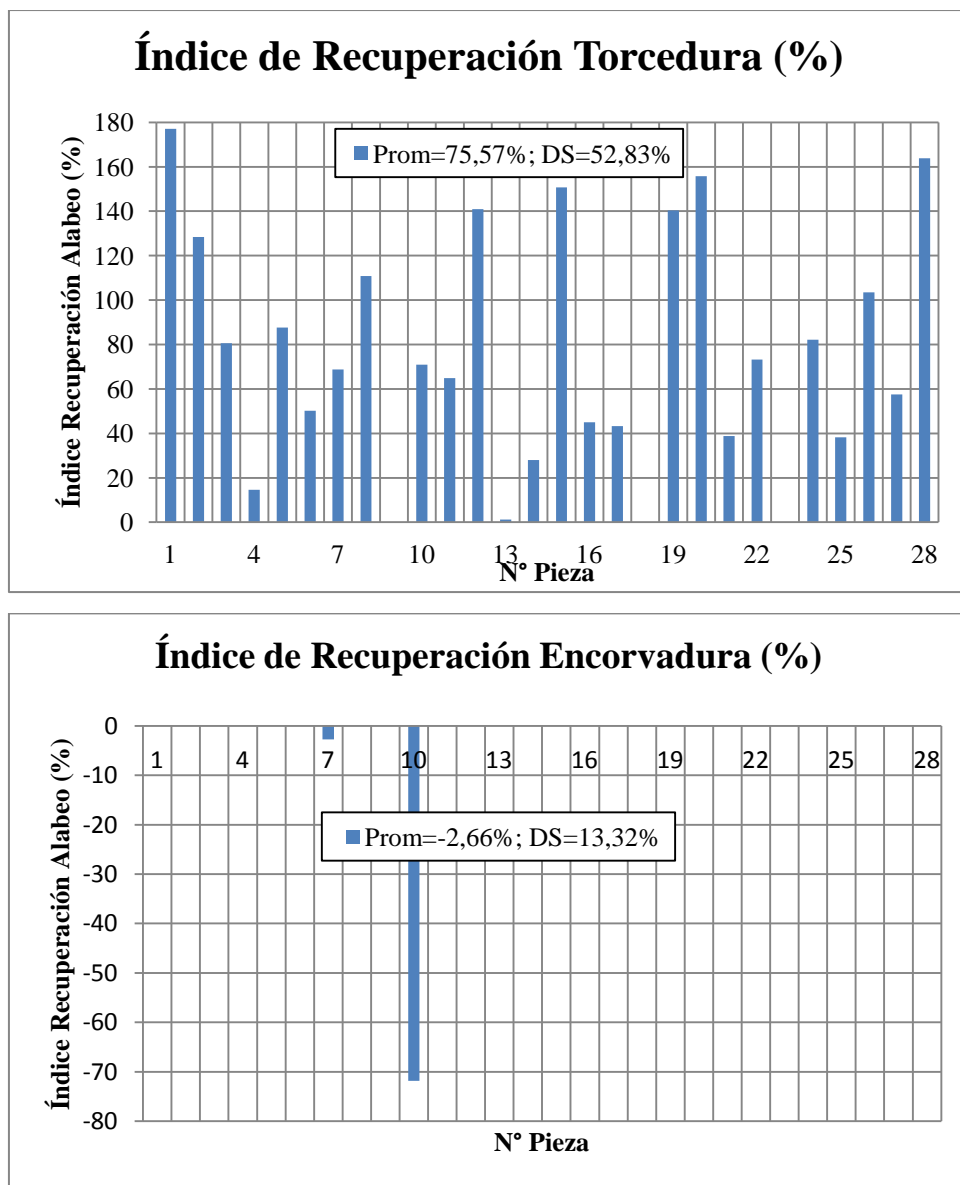


Figura B.4.2.6. Ensayo n°6: Índice de recuperación de alabeos post tratamiento.

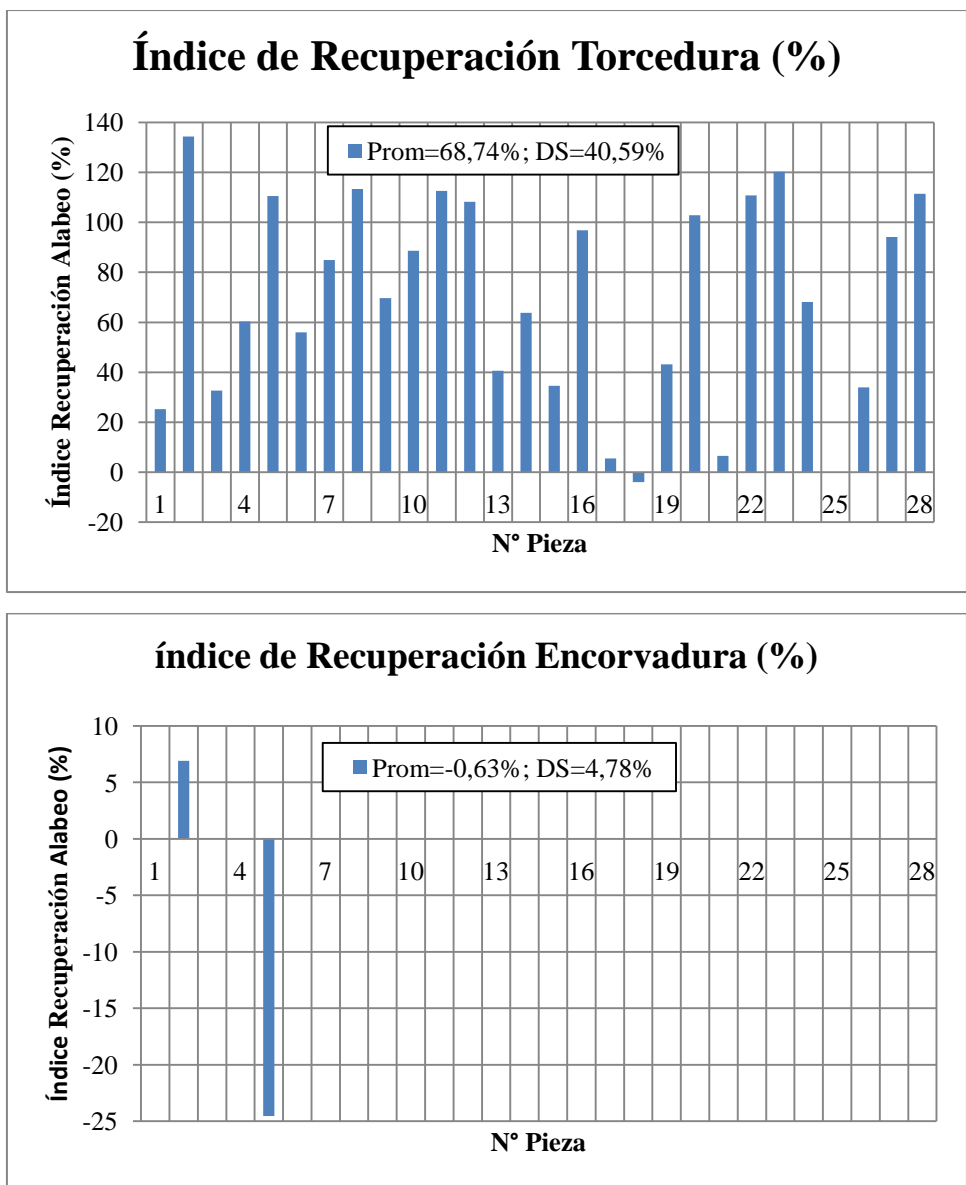


Figura B.4.2.7. Ensayo n°7: Índice de recuperación de alabeos post tratamiento.

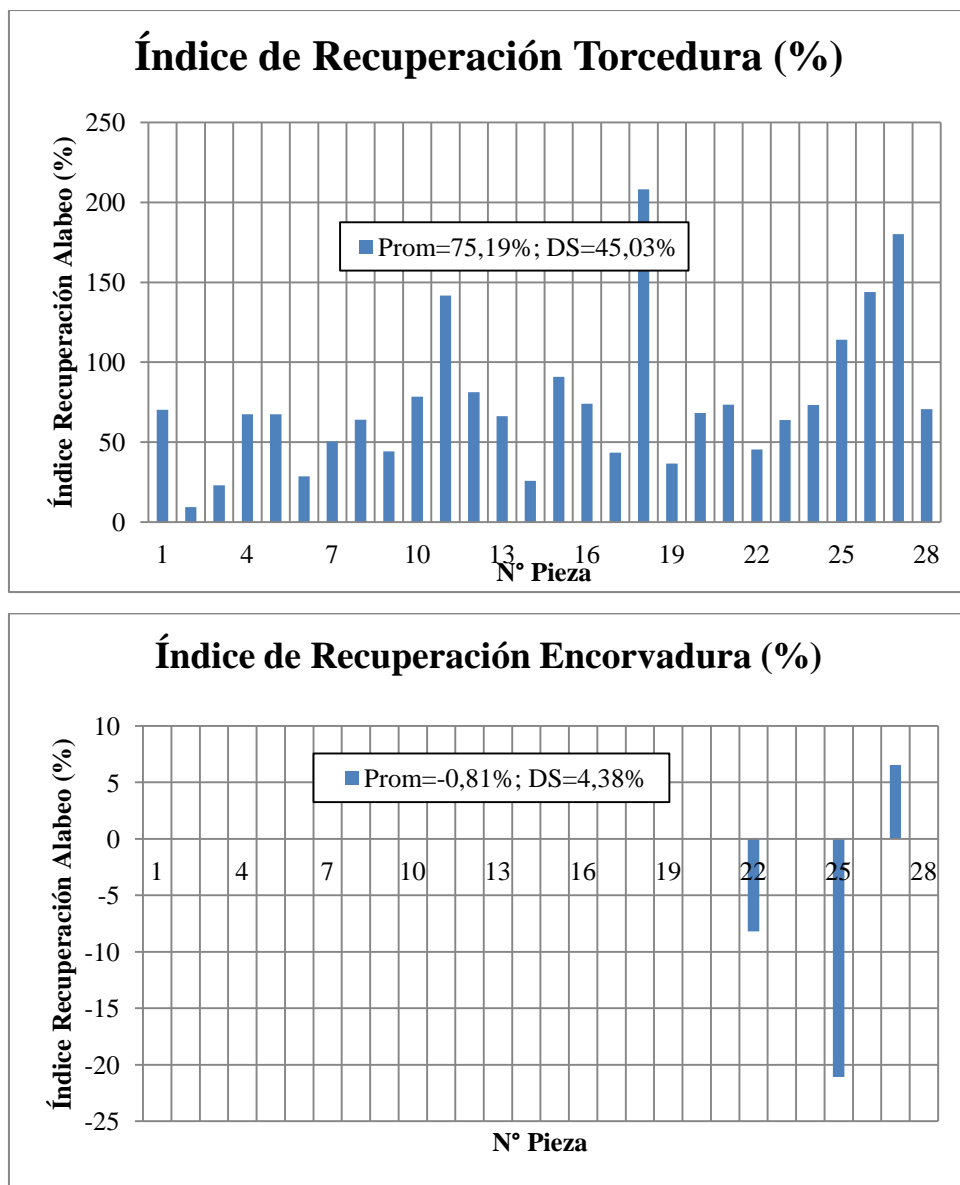


Figura B.4.2.8. Ensayo n°8: Índice de recuperación de alabeos post tratamiento.

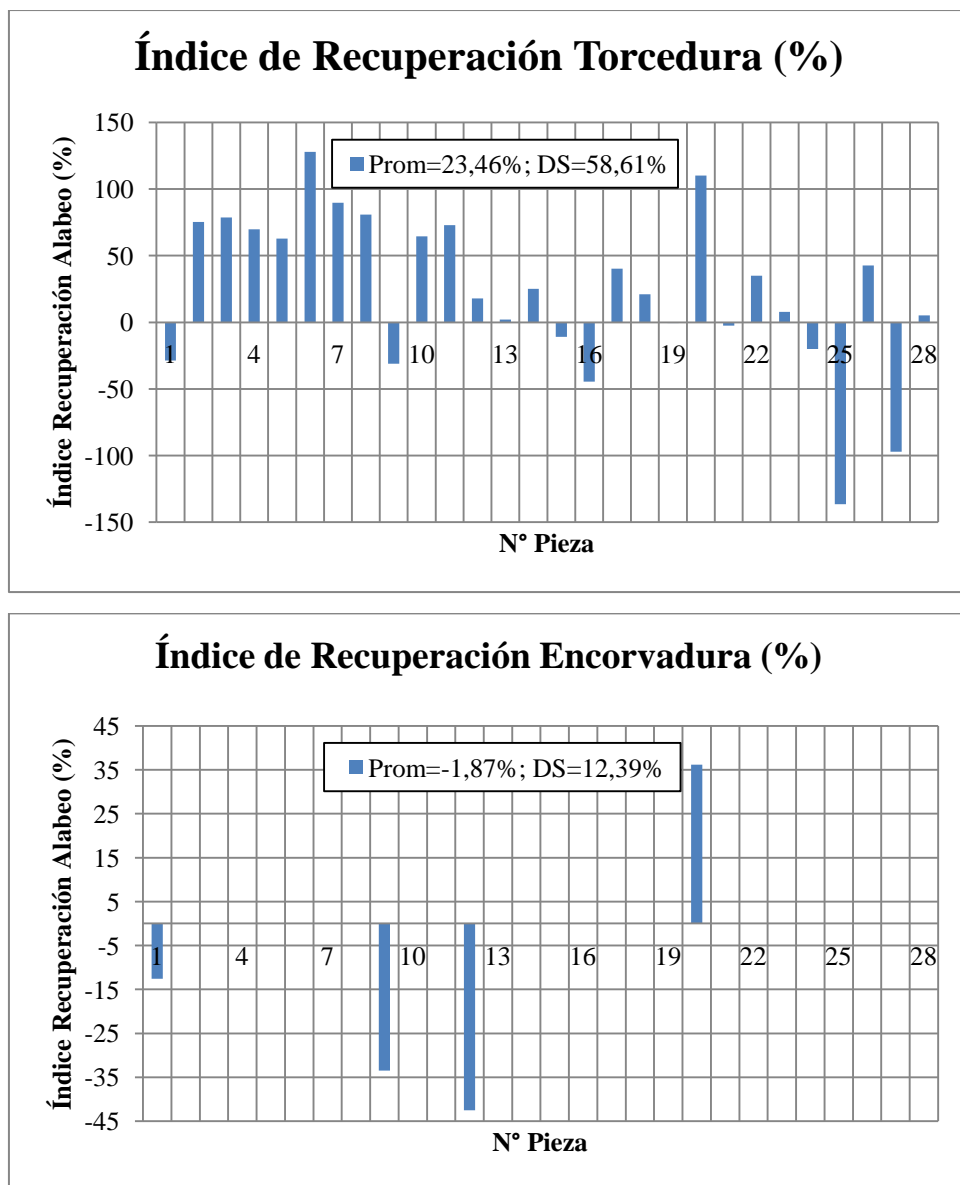


Figura B.4.2.9. Ensayo n°9: Índice de recuperación de alabeos post tratamiento.

ANEXO C

Parte 1

Tabla C.4.1.1. Desarrollo para el cálculo de la varianza entre tratamientos (V_B).

Tratamiento	x_{jk}		\bar{x}_j	$\bar{x}_j - \bar{x}$	$(\bar{x}_j - \bar{x})^2$
	R_A_Tor	R_A_Enc			
1	151,04	-2,35	74,34	37,76	1426,01
2	55,69	-3,84	25,92	-10,66	113,58
3	96,91	-1,41	47,75	11,17	124,76
4	65,46	-2,19	31,63	-4,95	24,48
5	62,80	-0,62	31,09	-5,49	30,17
6	75,57	-2,66	36,45	-0,13	0,02
7	68,74	-0,63	34,06	-2,52	6,37
8	75,19	-0,81	37,19	0,61	0,37
9	23,46	-1,87	10,79	-25,79	665,01
		\bar{x}	36,58	Σ	2390,77

Tabla C.4.1.2. Desarrollo para el cálculo de la varianza total (V).

Tratamiento	$x_{jk} - \bar{x}$		$(x_{jk} - \bar{x})^2$	
	R_A_Tor	R_A_Enc	R_A_Tor	R_A_Enc
1	114,46	-38,93	13100,64	1515,78
2	19,11	-40,43	365,25	1634,30
3	60,33	-37,99	3639,82	1443,35
4	28,88	-38,78	834,17	1503,67
5	26,21	-37,20	687,15	1383,78
6	38,99	-39,24	1520,15	1540,15
7	32,16	-37,21	1034,43	1384,75
8	38,61	-37,39	1490,46	1398,31
9	-13,12	-38,45	172,22	1478,59

Parte 2

Tabla C.4.2.1. Torcedura de las vigas pre tratadas térmicamente.

Tratamiento	Repeticiones																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	23,3	11,2	11,9	15,2	17,8	27,3	12,9	23,7	20,5	14,3	18	18,7	15,6	24,1	22,9	28,2	20,4	19,2	17,8	28,5	19,7	27,1	17,7	21,3	41,8	21,8	28,7	16,2
2	15,6	12,4	15,4	14,7	21,3	17,6	20,5	20,8	10,1	18,4	15,2	13,3	11,1	15,2	14,5	12	18,4	22,8	19,3	14,2	19	15,4	23,1	18,6	8,31	19,2	20,2	16
3	12,9	10,1	15,7	24,8	15,5	19,1	18,7	11,1	10,7	19,5	12,5	19,5	14,1	12,1	12,3	21,1	17,5	15	13,1	11,3	17,7	12,4	14,9	11,5	16,3	13,6	14,2	16,3
4	10,4	6,4	7,83	8,17	10,3	18,5	10,6	13,3	15	17,1	7,42	15,8	9,79	9,22	11	27,9	10,3	11,6	15,8	15,7	10,5	9,62	10,8	9,96	7,85	11,4	18,7	14,6
5	11,4	8,72	15,1	11,9	18,9	12,4	16,1	10,2	15,3	13,6	12,6	20,3	12,4	15,6	16	16,2	18,3	14,1	14,2	16,7	20,8	8,52	12,4	11,9	11,1	16,3	5,85	7,34
6	19,4	16	12,6	8,02	13,1	10,5	15,1	14,8	5,7	14,8	12,9	16,9	8,51	8,96	17,6	10,3	10	3,67	17,8	17,9	9,72	13,1	4,62	12,8	11,3	15,7	11	18,5
7	9,61	16,4	9,29	11,2	16,2	10,9	17,9	14,9	13,7	15,7	18,1	16,7	14,9	18	14,2	16,6	15,3	12,2	11,5	14,9	11,8	17,1	19,9	13,5	4,03	10,6	14,8	15,5
8	11,9	7,66	8,61	11,7	14	9,01	10,5	11,5	12,4	12,7	18,3	12,7	14,5	8,81	13,4	12,2	10,3	23	9,57	11,8	14,2	12,5	11,5	12,4	17	17,1	19,6	12
9	22	13,7	14,2	15,3	19,2	19,2	20	14	12,6	17,6	19,2	10,6	16,5	13,6	16,3	16,4	20	11	14,4	21,5	16,5	14,1	14,8	10,2	16,5	14,1	15,7	17

Tabla C.4.2.2. Desarrollo para el cálculo de V_B .

Tratamiento	\bar{x}_j	$\bar{x}_j - \bar{x}$	$(\bar{x}_j - \bar{x})^2$
1	20,92	6,02	36,25
2	16,51	1,61	2,60
3	15,11	0,21	0,05
4	12,34	-2,56	6,54
5	13,71	-1,18	1,40
6	12,54	-2,35	5,53
7	14,12	-0,78	0,60
8	12,88	-2,01	4,04
9	15,93	1,04	1,07
\bar{x}	14,89	Σ	58,09

Tabla C.4.2.3. Cálculo de la expresión: $(x_{jk} - \bar{x})$ para la determinación de la varianza total (V).

Tratamiento	Repeticiones																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	8,4	-3,7	-3,0	0,3	2,9	12,4	-2,0	8,8	5,6	-0,6	3,1	3,8	0,7	9,2	8,0	13,3	5,5	4,3	2,9	13,6	4,8	12,2	2,8	6,4	26,9	6,9	13,8	1,3
2	0,7	-2,5	0,5	-0,2	6,4	2,7	5,6	5,9	-4,8	3,5	0,3	-1,6	-3,8	0,3	-0,4	-2,9	3,5	7,9	4,4	-0,7	4,1	0,5	8,2	3,7	-6,6	4,3	5,3	1,1
3	-2,0	-4,8	0,8	9,9	0,6	4,2	3,8	-3,8	-4,2	4,6	-2,4	4,6	-0,8	-2,8	-2,6	6,2	2,6	0,1	-1,8	-3,6	2,8	-2,5	0,0	-3,4	1,4	-1,3	-0,7	1,4
4	-4,5	-8,5	-7,1	-6,7	-4,6	3,6	-4,3	-1,6	0,1	2,2	-7,5	0,9	-5,1	-5,7	-3,9	13,0	-4,6	-3,3	0,9	0,8	-4,4	-5,3	-4,1	-4,9	-7,0	-3,5	3,8	-0,3
5	-3,5	-6,2	0,2	-3,0	4,0	-2,5	1,2	-4,7	0,4	-1,3	-2,3	5,4	-2,5	0,7	1,1	1,3	3,4	-0,8	-0,7	1,8	5,9	-6,4	-2,5	-3,0	-3,8	1,4	-9,0	-7,6
6	4,5	1,1	-2,3	-6,9	-1,8	-4,4	0,2	-0,1	-9,2	-0,1	-2,0	2,0	-6,4	-5,9	2,7	-4,6	-4,9	-11,2	2,9	3,0	-5,2	-1,8	-10,3	-2,1	-3,6	0,8	-3,9	3,6
7	-5,3	1,5	-5,6	-3,7	1,3	-4,0	3,0	0,0	-1,2	0,8	3,2	1,8	0,0	3,1	-0,7	1,7	0,4	-2,7	-3,4	0,0	-3,1	2,2	5,0	-1,4	-10,9	-4,3	-0,1	0,6
8	-3,0	-7,2	-6,3	-3,2	-0,9	-5,9	-4,4	-3,4	-2,5	-2,2	3,4	-2,2	-0,4	-6,1	-1,5	-2,7	-4,6	8,1	-5,3	-3,1	-0,7	-2,4	-3,4	-2,5	2,1	2,2	4,7	-2,9
9	7,1	-1,2	-0,7	0,4	4,3	4,3	5,1	-0,9	-2,3	2,7	4,3	-4,3	1,6	-1,3	1,4	1,5	5,1	-3,9	-0,5	6,6	1,6	-0,8	-0,1	-4,7	1,6	-0,8	0,8	2,1

Tabla C.4.2.4. Cálculo de la expresión: $(x_{jk} - \bar{x})^2$ para la determinación de la varianza total (V).

Tratamiento	Repeticiones																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	71,0	13,4	8,8	0,1	8,4	152,9	4,0	77,0	31,4	0,3	9,6	14,6	0,5	84,6	63,9	177,0	30,2	18,7	8,6	183,7	22,9	149,7	7,8	40,4	721,2	48,2	190,0	1,7
2	0,5	6,4	0,2	0,0	40,5	7,4	31,1	34,4	22,8	12,4	0,1	2,6	14,7	0,1	0,2	8,2	12,1	62,2	19,1	0,5	16,9	0,2	67,7	13,7	43,4	18,1	27,6	1,1
3	4,1	22,6	0,6	97,5	0,3	17,3	14,1	14,4	17,9	21,0	5,5	21,1	0,6	7,8	6,9	37,9	6,6	0,0	3,4	13,1	8,0	6,2	0,0	11,5	1,9	1,6	0,5	1,8
4	20,7	72,2	49,9	45,2	20,9	13,1	18,2	2,7	0,0	5,0	55,9	0,9	26,1	32,2	15,4	168,4	20,8	11,1	0,7	0,6	19,1	27,8	16,6	24,4	49,6	12,5	14,6	0,1
5	12,3	38,1	0,1	9,0	16,0	6,5	1,4	22,2	0,1	1,7	5,4	29,1	6,5	0,5	1,1	1,6	11,4	0,6	0,5	3,3	35,0	40,6	6,4	8,8	14,7	2,1	81,8	57,1
6	20,2	1,2	5,1	47,3	3,1	19,2	0,0	0,0	84,5	0,0	4,1	3,9	40,8	35,2	7,1	20,7	23,7	126,0	8,6	9,0	26,8	3,1	105,6	4,6	12,9	0,6	14,9	12,8
7	27,9	2,3	31,4	13,5	1,7	15,8	9,0	0,0	1,5	0,6	10,5	3,2	0,0	9,4	0,5	2,8	0,1	7,4	11,7	0,0	9,6	4,6	25,1	1,8	118,0	18,4	0,0	0,4
8	8,8	52,3	39,5	10,1	0,9	34,6	19,1	11,6	6,2	4,7	11,4	4,9	0,1	37,0	2,4	7,3	20,7	65,4	28,4	9,7	0,4	5,5	11,7	6,2	4,3	4,7	22,2	8,7
9	50,9	1,5	0,5	0,1	18,7	18,1	26,0	0,7	5,1	7,3	18,8	18,7	2,6	1,6	2,0	2,2	26,1	15,2	0,2	43,1	2,6	0,7	0,0	22,3	2,5	0,7	0,6	4,5

Parte 3

Tabla C.4.3.1. Desarrollo para el cálculo de la varianza entre tratamientos (V_B).

Tratamiento	x_{jk}		\bar{x}_j	$(\bar{x}_j - \bar{x})$	$(\bar{x}_j - \bar{x})^2$
	R _{A_Tor}	R _{A_Enc}			
2	55,69	-3,84	25,92	-5,94	35,25
3	96,91	-1,41	47,75	15,89	252,49
4	65,46	-2,19	31,63	-0,23	0,05
5	62,80	-0,62	31,09	-0,77	0,60
6	75,57	-2,66	36,45	4,59	21,09
7	68,74	-0,63	34,06	2,20	4,82
8	75,19	-0,81	37,19	5,33	28,37
9	23,46	-1,87	10,79	-21,07	443,84
		\bar{x}	31,86	Σ	786,52

Tabla C.4.3.2. Desarrollo para el cálculo de la varianza total (V).

Tratamiento	$(x_{jk} - \bar{x})$		$(x_{jk} - \bar{x})^2$	
	R _{A_Tor}	R _{A_Enc}	R _{A_Tor}	R _{A_Enc}
2	23,83	-35,71	567,96	1274,93
3	65,05	-33,27	4231,66	1106,97
4	33,60	-34,06	1129,11	1159,87
5	30,93	-32,48	956,90	1054,88
6	43,71	-34,52	1910,51	1191,93
7	36,88	-32,49	1360,35	1055,72
8	43,33	-32,67	1877,21	1067,57
9	-8,40	-33,73	70,61	1137,86