

# Validación de Parámetros para la Fabricación de Productos Derivados del Bambú, Especie *Guadua Angustifolia* Kunth, como Elementos Estructurales, Mediante la Aplicación de Diseño de Experimentos

Cristina Alexandra Morales Luna <sup>(1)</sup>  
Ing. Víctor Guadalupe Echeverría, Director de Tesis <sup>(2)</sup>  
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción <sup>(1)</sup>  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador  
amorales@espol.edu.ec (1), vguadalu@espol.edu.ec (2)

## Resumen

*En la fabricación de productos derivados del bambú, se desconocen los valores de los factores de diseño, necesarios para la obtención de un elemento estructural con características de resistencia mecánica favorables. El proceso de fabricación está definido, sin embargo la ausencia del control en la aplicación de sus factores, origina variabilidad en los resultados de resistencia. El propósito de este estudio es validar los factores en el proceso de fabricación, haciendo referencia a estudios de productos similares, que permitan mejorar y robustecer el proceso actual. Apoyados en la experimentación, se opta por la aplicación del Diseño de Experimentos, mediante la Filosofía Taguchi, la cual propone un diseño robusto, que combina los factores de fabricación hasta lograr productos y procesos robustos, frente a las posibles causas de variabilidad. Se inicia con el diagnóstico del proceso actual de fabricación de los productos, donde se presentan los valores de resistencia al corte, obtenidos en los ensayos mecánicos exploratorios, los mismos que son valores referenciales para el análisis, y comparación de resultados. Conocida la variable objetivo (respuesta), se determinan los factores influyentes sobre ésta, así como sus niveles ó tolerancias, es decir se define el diseño a cumplir en el (los) experimento (s). Se analizan el efecto generado por cada una de las combinaciones de factores propuestas en la experimentación. De acuerdo al análisis, finalmente se validan los factores al seleccionar la mejor combinación de éstos, y comparar sus resultados con los valores de resistencia obtenidos en estudios anteriores.*

**Palabras Claves:** Validar, Factores, Diseño de Experimentos, Filosofía Taguchi, Diseño Robusto, Proceso Robusto, Variable de Respuesta.

## Abstract

*In the manufacture of bamboo products, are unknown values of design factors, necessary for obtaining a structural element with favorable mechanical strength characteristics. The manufacturing process is defined, however the lack of control in the implementation of its factors, causes variability in the results of resistance. The purpose of this study is to validate the factors in the manufacturing process, referring to studies of similar products that enhance and strengthen the current process. Supported by experimentation, is chosen by the application of Design of Experiments through Taguchi philosophy, which proposes a robust design that combines the factors of production to make products and processes robust against the possible causes of variability. It starts with the diagnosis of current manufacturing process of products, which presents the shear strength values obtained in mechanical tests exploratory, they are reference values for analysis and comparison of results. Knowing the target variable (response), defines the factors influencing on it, and their levels or tolerances, it defines the design to meet at (the) experiment (s). We analyze the effect generated by each of the combinations of factors proposed in the experiment. According to the analysis, it was finally validated the factors in selecting the best combination of these, and compare their results with the resistance values obtained in previous studies.*

**Keywords:** Validate, Factors, Design of Experiments, Philosophy Taguchi, Robust Design, Robust Process, Variable Response.

## 1. Introducción

En la industria de la construcción, se presenta una creciente demanda por productos con calidad. En este marco, es necesario que el diseño y comprobación de los productos estén de acuerdo a los principios de ingeniería y resistencia de materiales. Esto implica la utilización de técnicas ingenieriles, que permiten obtener la calidad, en términos de reducción de costos, disminución tiempos de proceso, sustitución de materiales, modificación de métodos de fabricación e incluso el diseño de nuevos productos.

Una propuesta de innovación, como material de construcción es la Guadua AK, en forma de secciones transversales, con diferentes longitudes, pegadas y prensadas. Para su desarrollo y producción, previamente se requiere del conocimiento de los factores de diseño, que en combinación permitan caracterizar al producto con propiedades de resistencia favorables. La aplicación de la herramienta estadística, Diseño de Experimentos conlleva al alcance de este objetivo.

En el campo estadístico, el Diseño de Experimentos es un método que permite el estudio de diferentes variables simultáneamente, involucrando planes de experimentos con procedimientos definidos que agilizan la determinación de soluciones e interpretación de datos. Un experimento es una prueba o ensayo, donde se inducen cambios deliberados en la variable de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida (Montgomery, 1996). A partir de estas observaciones, se analizan y determinan entre las propuestas de diseño del producto (combinación de factores), aquella que proporcionen el mejoramiento tanto del producto como proceso. Figura 1.

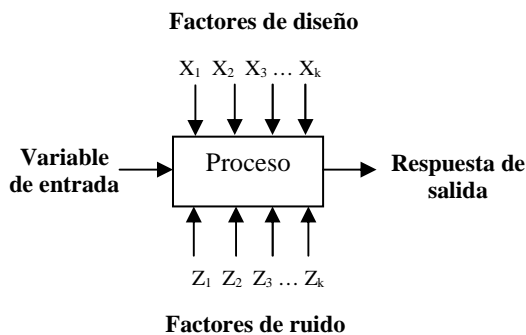


Figura 1. Factores y variables del proceso

A continuación se expone la aplicación de la Filosofía Taguchi, con el fin de observar el comportamiento de los factores involucrados en el proceso de fabricación de productos derivados de la Guadua AK.

## 2. Fundamento Teórico

### 2.1. Filosofía Taguchi

Para la realización y análisis de resultados en un experimento bajo esta filosofía se requiere además de

Desde inicios de los años 80 se denomina "Diseño de Experimentos" a la metodología científica que genera conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Es una metodología que se ha consolidado como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender la relación compleja de causa – efecto. Se utiliza en las etapas de diseño de productos y procesos, con el objetivo de minimizar la variación del desempeño de éstos en manos de los consumidores finales con respecto a los factores ambientales como medio para mejorar la calidad.

Taguchi contribuye a la calidad con la introducción del diseño de parámetros (diseño robusto), y establece que la calidad del producto deber ser medida en términos de abatir al mínimo las pérdidas generadas por el producto a la sociedad, desde que inicia su fabricación hasta que concluye su ciclo de vida. Su filosofía se concentra en el consumidor, valiéndose de la “función de pérdida”. La pérdida se calcula en dólares, y eso permite a los ingenieros comunicar su magnitud en un valor común, reconocible.

Entre las metas de la Filosofía Taguchi se encuentran: Diseño robustos (insensibles) ante el medio ambiente para productos y procesos, Diseño y desarrollo de productos, de modo que sean robustos a la variación de componentes y Minimización de las variaciones con respecto a su valor objetivo. Estas metas se concentran en tres etapas del desarrollo de un producto:

- Diseño del sistema: se utilizan principios científicos y de ingeniería.
- Diseño de parámetros: se determinan los valores específicos de los parámetros del sistema.
- Diseño de tolerancias: se determinan las mejores tolerancias para los parámetros.

Taguchi enfatiza la importancia de evaluar el desempeño bajo las condiciones de campo, como parte del proceso de diseño y el hecho que la variación funcional en el desempeño está influenciada por los factores de ruido, los cuales varían en el ambiente en el que los procesos o productos están funcionando.

Los diseños propuestos por Taguchi se denominan arreglos ortogonales, que son matrices de diseños factoriales completos, fraccionados o mixtos y que tienen la propiedad de ortogonalidad. La serie de arreglos particulares los denominó:

$$L_a(b)^c$$

Donde:

**a:** Representa el número de pruebas o condiciones experimentales que se tomarán. Esto es el número de renglones o líneas en el arreglo.

**b:** Representa los diferentes niveles a los que se tomará cada factor.

**c:** Es el número de efectos independientes que se pueden analizar, esto es el número de columnas.

la medida de variabilidad denominada razón señal ruido (S/N).

### 3. Descripción del proceso

En esta sección se describe el proceso de fabricación de productos derivados de la Guadua. En la Figura 2., se presenta el diagrama de flujo del proceso actual.



**Figura 2.** Diagrama de Flujo de proceso – producción derivados de la Guadua

La descripción del proceso comprende las siguientes operaciones:

1. **Recepción:** Se reciben las medias cañas de Guadua procesadas en el campo.
2. **Selección:** Se seleccionan las medias cañas, de acuerdo a características adecuadas, es decir: longitud, diámetro y espesor.
3. **Presentación y aplastado:** Se colocan las medias cañas - con la concavidad hacia abajo - en la

prensa fría y aplica presión hasta su aplastamiento total.

4. **Unión:** Las medias cañas se unen en piezas - de manera preferente no deberán coincidir sus nudos - que formarán el tablero.
5. **Dimensionado:** Con una escuadra se fijan las medidas en las piezas de medias cañas a ser procesadas.
6. **Corte transversal:** El operario realiza el corte a las piezas con la utilización de la sierra de mano.
7. **Escuadrado:** El operario esquadra las piezas, utilizando escuadra y sierra de mano.
8. **Aplicación del pegante:** El operario aplica el pegante con brocha y/o rodillo en la parte interna de una de las piezas a unir.
9. **Unión:** El operario une las piezas, colocando la parte interna sin pegante sobre la que tiene.
10. **Prensado:** Se prensa en caliente, el conjunto de piezas hasta su compactación total.
11. **Escuadrado:** Concluido el proceso de prensado, se procede al esquadro del tablero, utilizando la escuadra y sierra.
12. **Lijado:** Una vez cuadrada el tablero, el operario lo lija.
13. **Acabado:** El operario aplica el acabado que requiera el tablero.

### 4. Factores experimentales

Previo a la selección del diseño experimental es necesaria la determinación de los factores experimentales. En este estudio, se realiza una primera fase experimental, donde se identifican ciertos factores, que haciendo referencia a estudios similares, eran considerados fundamentales por la generación de ruido en el diseño. Por lo que se analizan los siguientes parámetros con sus valores: Ver Tabla 1

**Tabla 1.** Factores de diseño preliminares

Factores	Descripción
Edad	3 – 4 años
Parte de la caña	Basa / Media
Tipo de superficie de contacto	Interior – interior (DD)

A partir de estos factores se identifica que de manera significativa, la parte media de la caña influye en el proceso, seguido de la edad era de 3 a 4 años, y finalmente el tipo de contacto para la unión de las partes de la caña, es decir interior con interior (Dermis - Dermis).

En la segunda fase se establecen estos parámetros con sus valores fijos, y se complementan con los parámetros de control, entre ellos: Ver Tabla 2.

### 5. Experimentación con el método Taguchi

**Tabla 2.** Factores de control

Factores
Tipo de pegante
Presión
Tiempo de prensado
Temperatura
Contenido de humedad

A continuación se presentan los resultados obtenidos con la Metodología Taguchi en el proceso de fabricación de productos derivados de la Guadua, tomando como variable respuesta la resistencia (esfuerzo) al corte de los productos, relacionada con los factores controlables descritos en la sección anterior. De acuerdo a los factores, se selecciona un arreglo ortogonal L<sub>8</sub>, que permite estudiar los cinco factores controlables a dos niveles cada uno. Ver Tabla 3.

**Tabla 3.** Factores de control a dos niveles

Parámetro	Nivel 1	Nivel 2
Contenido de Humedad (%)	12	16
Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	12	15
Tiempo de acción del pegante (min)	0	5
Temperatura (°C)	105	115
Tiempo de prensado (min)	15	25

La razón señal – ruido corresponde a “su valor nominal es lo mejor” (expresión 1):

$$10 \log \left( \frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right) \quad (1)$$

Utilizando la herramienta estadística Minitab 15 versión español, se genera el arreglo experimental junto con los resultados de tres corridas experimentales. Ver Tabla 4.

**Tabla 4.** Arreglo experimental y resultados obtenidos

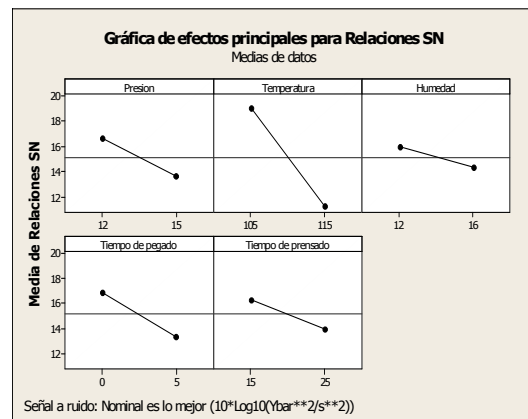
DoE	Presión	Temperatura	Humedad	Tiempo de pegado	Tiempo de prensado	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Esfuerzo 3
1	12	105	12	0	15	2,82	2,72	3,05
2	12	105	12	5	25	6,74	5,28	6,3
3	12	115	16	0	15	2,88	4,1	3,22
4	12	115	16	5	25	3,36	1,74	3,49
5	15	105	16	0	15	3,64	2,68	4
6	15	105	16	5	25	7,31	7,12	8,64
7	15	115	12	0	15	4,96	3,76	3,52
8	15	115	12	5	25	1,25	1,58	2,94

Se realiza el análisis correspondiente a los valores generados sobre la variable de respuesta, a través de las Gráficas de Efectos principales tanto de las relaciones S/N como la de Medias.

### Relaciones S/N

La temperatura y el tiempo de acción del pegante influyen de manera significativa sobre la resistencia al corte de los derivados de Guadua. En cuanto a sus niveles, se observa en la gráfica que para maximizar la robustez, se debe utilizar el nivel bajo tanto de la temperatura como del tiempo de acción del pegante, es decir 105°C y 0 minutos. Existe la posibilidad de que este tratamiento haga más robusto el proceso. Figura 3.

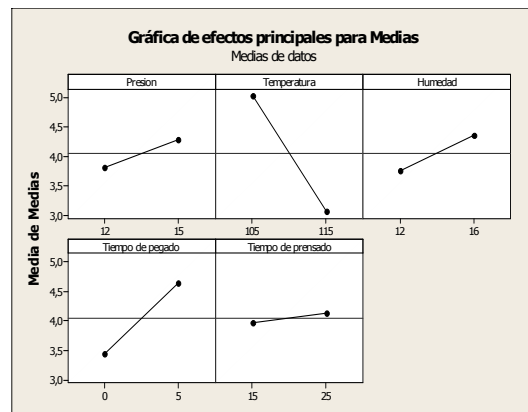
**Figura 3.** Efectos principales relaciones S/N



### Medias

A diferencia de las relaciones S/N, es marcada la influencia sobre la media de los factores temperatura y tiempo de acción del pegante, en relación a los demás factores. Se observa que el factor temperatura en ambos casos, tiene un efecto considerable en su nivel bajo, es decir 105°C. Sin embargo, la influencia del factor tiempo de acción del pegante es diferente en la media, ya que la mayor influencia que éste tiene es en su mayor nivel, es decir 5 minutos. Figura 4.

**Figura 4.** Efectos principales Medias



En concordancia a estos factores influyentes, se procede a realizar pruebas de validación. Considerando sus niveles, se fabrican probetas para ser sometidas al ensayo de corte y verificar si se alcanza la robustez en el proceso.

## 6. Pruebas de Validación

Los factores significativos, con sus respectivos niveles para la construcción de seis probetas se detallan en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Parámetros – Probetas de validación

Parámetros	
Temperatura	105°C
Presión	15 Kg/cm <sup>2</sup>
Contenido de Humedad	16 %
Tiempo de prensado	25 minutos
Tiempo de acción de pegante	5 minutos

Se observa que los valores de esfuerzo cortante de estas probetas son homogéneos. Referido al valor del esfuerzo cortante máximo de las probetas es de 6.60 MPa, el mínimo 5.03 MPa y el promedio 5.65 MPa con una variación de  $\pm 0.60$ .

Es importante observar que el proceso se vuelve más estable por la reducción del desperdicio, en cuanto a la cantidad del material sea en pegante y/o probeta final, es decir con la validación se verificó un 95% aproximadamente en que se redujo el desperdicio; de un total de seis probetas fabricadas, todas cumplieron con los factores del proceso y arrojaron datos homogéneos en los ensayos.

Finalmente, el estudio realizado permitió establecer las principales variables del proceso, de las cuales se obtuvo la mejor combinación de factores con sus respectivos niveles, permitiendo robustecer el proceso. Con las pruebas finales de validación, el estudio arroja un resultado positivo, que es la mejora del proceso mediante el incremento de los valores de resistencia al corte del producto, y disminuyendo la variabilidad de los mismos. Además de disminuir la cantidad de desperdicios y recursos, que hacen énfasis a la cantidad de pegante.

## 7. Agradecimientos

A Dios, por todas sus bendiciones en cada uno de los pasos que doy en la vida.

A mis padres, Franklin y Lucy, mi familia, por todo su amor, paciencia, sacrificio y apoyo incondicional.

Por los deseos de superación y alcance de metas juntos, a mi amor José Francisco.

A los amigos, Arq. Jorge Morán e Ing. Víctor Guadalupe, por ser los principales promotores de mi participación en el mundo de la Guadua, aportando a su evolución con conocimientos de la ingeniería.

## 8. Conclusiones

En la elaboración de productos derivados de la guadua, se identificaron las entradas y salidas, así como las operaciones de transformación de la materia prima en el proceso.

En el estudio realizado se determinó la influencia de los distintos factores que afectan al producto; los más relevantes son: el desconocimiento de las propiedades del material, la falta de mano de obra calificada, el diseño del puesto de trabajo, la estandarización de los métodos utilizados, el control en las mediciones y la utilización de herramientas y equipos no calibrados en el proceso.

Se realizaron ensayos preliminares, donde se seleccionaron aquellos con mayor grado de influencia sobre la variable respuesta. Una vez determinados los niveles, se realizaron pruebas experimentales con los valores altos y bajos de cada factor, el objetivo fue escoger las mejores tolerancias que serían de utilidad para el diseño experimental.

Durante la construcción de probetas destinadas para los ensayos preliminares de corte, se presentaron algunos inconvenientes como:

- La falta, exceso o forma de aplicación del pegante, traducidos en la generación de desperdicios a partir de éste.
- La existencia o no de nudos, fue un aspecto fundamental relacionado directamente con el aumento o disminución de la resistencia.
- La utilización de la parte basal de la caña impedía la compactación total de la probeta, con lo que se obtenían resultados de resistencia inconsistentes por la construcción deficiente de las mismas. Por lo que se optó por trabajar con la parte media de la caña, para tener un proceso que mida el efecto de los factores de manera homogénea, obteniendo resultados favorables.

A medida que se determinaban los niveles por cada factor, la construcción de las probetas mejoraba en cuanto a los desperdicios, debido a que no existían cantidades considerables de probetas dañadas o con fallas.

Desarrollado el Diseño experimental, bajo la filosofía Taguchi se logró validar los factores de diseño, que de acuerdo a su influencia en la variable de respuesta, representaban oportunidades de mejora con el cambio en su valor. Ver Tabla 6.

Entre los factores con mayor influencia sobre la variable respuesta, se encontraron la temperatura y el tiempo de acción del pegante, así como las relaciones entre ellos.

## 9. Recomendaciones

Se debe estandarizar la elaboración de probetas y para ello se deben adquirir equipos que faciliten la construcción, establecer lugares de trabajo confortables, además de capacitar al personal técnico

de la planta, para conozcan la importancia que representa para el estudio, una correcta construcción de probetas; un tratamiento erróneo de éstas, aumenta la variabilidad de manera significativa en los resultados.

**Tabla 6.** Cuadro comparativo entre situación actual y propuesta

Situación actual	Situación propuesta	Beneficio
Temperatura: 100 °C	Temperatura: 105 °C	Mejora de la resistencia en 2.54 MPa
Presión: 10 kg/cm <sup>2</sup>	Presión: 15 kg/cm <sup>2</sup>	
C.H.: 12 %	C.H.: 16 %	
Tpo. prensado: 20 min	Tpo. prensado: 25 min	
Tpo. acción pegante: 0 min	Tpo. acción pegante: 5 min	
$\sigma$ cortante= 3.11 MPa	$\sigma$ cortante= 5.65 MPa	

Se requiere de la disponibilidad de los equipos e instrumentos debidamente calibrados, tal es el caso de la prensa hidráulica, higrómetro, balanzas, termómetros, calibrador vernier digital, etc.

Es necesaria la determinación de una metodología, que se emplee para la recolección de datos en cada una de las mediciones de los factores de estudio, es decir temperatura, presión, contenido de humedad, y tiempo. De manera que se tenga certeza en el cumplimiento de los valores de cada nivel establecido por cada factor.

Finalmente se recomienda utilizar la nueva combinación de valores de los factores, para tener un mejor resultado en la resistencia del producto.

## 10. Referencias

[1] MONTGOMERY D.C. (2005). Design and Analysis of Experiments: John Wiley & Sons, Inc.

[2] American Standar Test Methods for Evaluating Properties o Wood-Base Fiber and Particle Panels Material, ASTM D 1037-99. (1999).

[3] GUTIERREZ H., DE LA VARA R. (2004). Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma 6 $\sigma$ . McGraw – Hill Interamericana. México.

[4] GUTIERREZ H., DE LA VARA R. (2008). Análisis y Diseño de experimentos. Segunda edición. McGraw – Hill Interamericana, México.

[5] WU Y., WU A. (1997). Diseño robusto utilizando Métodos Taguchi ®. Ediciones Díaz de Santos S.A. Juan Bravo, MADRID.

[6] MINITAB® Inc. (2007). Meet Minitab 15 para Windows. Capítulo 5: Diseño de experimentos. P 5-1.