

# **Análisis multifactorial para la caracterización y fabricación de prototipos de paneles de cartón reciclable de corta y larga duración**

## **Multifactorial analysis for the characterization and prototyping of recyclable cardboard panels of short and long term**

**Peña, Mariano\*; Méndez, María y Chacón Rubén**  
Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes  
Mérida, Venezuela  
\*marianop@ula.ve

### **Resumen**

*En la actualidad son de importancia capital las medidas que se tomen para tratar parte de la basura, resultando relevantes trabajos recientes orientados a fomentar la reutilización de desechos para la construcción de nuevos materiales que permitan prolongar la vida útil de la materia original. Un ejemplo es la construcción de paneles a partir de cartón de envases de bebidas de corta y larga duración los cuales fueron fabricados y evaluados mecánicamente en estudios previos realizados en la Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela. Con la finalidad de completar la caracterización de tan interesante material se presenta un estudio exhaustivo de la influencia de factores tales como temperatura, presión, tiempo de calentamiento y composición, además del efecto conjunto de todos ellos en las propiedades finales del nuevo material. El objetivo de la investigación es buscar las tendencias de fabricación que pudiera brindar mejores resultados en una propiedad relevante como es la resistencia a la tracción perpendicular; medida que representa la adhesión entre las partículas internas en los tableros. La alternativa para completar el estudio consiste en la aplicación de un análisis multifactorial a varias probetas con diferentes combinaciones de las variables antes mencionadas para evaluar su comportamiento al medir la resistencia a la tracción. El examen multifactorial empleó como herramienta el software SEMPRO II a partir del cual se obtuvieron respuestas gráficas que modelaron el efecto de la variación de las condiciones sobre el comportamiento del material compuesto. Del resultado análisis, se infiere que el uso de mayores temperaturas, tiempos y cantidades de cartón de larga duración; acompañado de menores presiones, podría mejorar la resistencia a la tracción de los paneles. Con base en el aporte del presente estudio sólo resta el hallazgo de los valores óptimos de las variables de fabricación para la producción comercial del producto.*

**Palabras claves:** Tectan ®, materiales compuestos, manufactura, reciclaje, análisis multifactorial

### **Abstract**

*Currently is very important the measures that take to treat part of the garbage, resulting in relevant recent work aimed to encourage the reuse of waste for the construction of new materials that allow extend the life of the original material. An example is the construction of panels from cardboard beverage packaging short and long term which were manufactured and mechanically tested in previous studies in the University of Los Andes, Merida Venezuela. In order to complete the characterization of interesting material as a comprehensive study of the influence of factors such as temperature, pressure, heating time and composition, in addition to the combined effect of all of them in the final properties of the new material it is presented. The objective of the research is to look for trends in manufacturing that could provide better results in a relevant property such as the tensile strength perpendicular; As represents the adhesion between the internal particles on the boards. The alternative to complete the study involves the application of a multifactorial analysis on several samples with different combinations of the above variables to evaluate their behavior to measure the tensile strength. Multifactorial test used as the SEMPRO II software tool from which graphic responses that shaped the effect of changing conditions on the behavior of the composite were obtained. The analysis result, it follows that the use of higher temperatures, times and amounts of carton length; accompanied by lower pressures, it may improve the tensile strength of the panels. Based on the contribution of this study just remains finding the optimal values of the variables of production for the commercial produc-*

tion of the panels.

**Key words:** Tectan®, composite materials, manufacturing, recycling, multifactorial analysis

## 1 Introducción

Los envases de corta y larga duración para bebidas como leche, jugos y vinos se encuentran dentro de los contaminantes más comunes del medio ambiente debido a su elevado consumo. La configuración de estos empaques es ideal para conservar y trasladar líquidos, tienen la ventaja de reducir el peso del producto total y ocupan una porción del volumen total mínima. Todo esto es posible gracias a componentes como el cartón, constituyente principal, se encuentra entre el 75-80% en peso, se encarga de proporcionarle rigidez al envase; por cada metro cúbico de madera de árbol se puede producir 13.300 envases con capacidad para un litro; el polietileno, proporciona estanqueidad al líquido y mantiene unidos los materiales del envase, representa de 15 a 20% del peso y se caracteriza por ser aplicado en capas muy delgadas (12 micras de espesor) y su temperatura de fusión varía entre 106 y 112 °C; en algunos casos el aluminio representa como valor máximo un 5% del peso del envase y su espesor no supera las 6.5 micras; esta lámina metálica cumple una excelente función para evitar el paso de oxígeno al líquido permitiendo de esta manera almacenar el contenido a temperatura ambiente, disminuyendo así el consumo de electricidad para refrigerar productos; por último, las tintas usadas son con base en agua con pigmentos orgánicos. En los envases de larga duración está presente una capa de barrera de aluminio en el material de envase; que le permite resistir el proceso de esterilización a alta temperatura y corta duración (tratamiento UAT). Esta combinación hace posible que la leche y otros alimentos líquidos perecederos extiendan su vida útil durante meses sin necesidad de refrigeración o de conservantes.

A continuación se muestra la distribución de los materiales usados para construir (por laminado) los envases de cartón para bebidas (larga duración).

Los envases de corta duración están compuestos por cuatro (4) capas y se caracterizan por no poseer capa de aluminio, sólo cartón y polietileno, las capas presentes son la A, B, E y F de la Figura 1.

Con la finalidad de mitigar el problema de la contaminación generada por el descarte de los envases de cartón una vez usados es necesario reciclar los mismos. Una forma es el repulpeado que consiste en la separación de las fibras celulósicas, del polietileno y del aluminio con la utilización de agua para luego proceder al reciclaje de cada componente por separado. Otra manera es mediante compresión térmica, la cual implica la utilización de todo el material del envase sin la separación de los materiales que lo componen, en la formación de un compuesto aglomerado resistente que resulta muy útil para la construcción de diferentes objetos.

Este nuevo material compuesto aglomerado existe ya

patentado y registrado con el nombre de TECTAN® y es fabricado a partir de la termocompresión de envases de cartón para bebidas. Entre las características más resaltantes se pueden citar 0% absorción de agua en superficie, 1% en cantos (es impermeable); es resistente a la expansión en condiciones climáticas; es también resistente a rotura, desgarrar y golpes; se muestra medianamente elástico; presenta buen agarre de tornillos en cara y canto; exhibe mediana propagación de llama. Otra propiedad relevante es su comportamiento como aislante térmico y acústico; no se desgrana, se puede mecanizar con fresa (es moldurable), perforar y

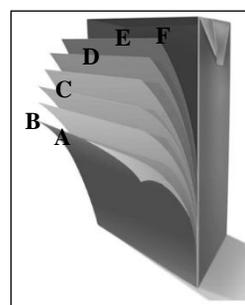


Fig. 1 Estructura de los envases de cartón para líquidos de larga duración. A Polietileno (proporciona impermeabilidad al producto) B cartón (aporta rigidez al envase). C y E películas de polietileno (permiten la adhesión entre las capas). D lámina de aluminio (actúa como barrera contra el oxígeno luz y olores). F lámina de polietileno (proporciona estanqueidad al producto)

aserrar con herramientas básicas. El TECTAN® es además termoformable, una vez calentado a más de 120°C, se puede moldear; también es compatible con todo tipo de recubrimientos (cerámicos, enchapes, papeles murales, pintura, laca, revestimientos texturados, alfombras y cubrepisos). Este tipo de aglomerado posee una larga vida útil, debido a que no se pudre, no se degrada ni es atacado por plagas; muestra también elevada resistencia a salinidad y químicos.

El campo de aplicación del TECTAN® es muy amplio por cuanto puede ser utilizado en la fabricación de objetos habitualmente construidos con compuestos de madera; se emplea en la construcción de todo tipo de muebles (escritorios, mesas cajoneras, mesas para electrodomésticos), es ampliamente recomendado en la fabricación de muebles para cocinas y baños debido a sus propiedades de impermeabilidad y condición de termoformable que le otorga mayor ventaja con respecto a la madera. Los acabados pueden ser a gusto del cliente pudiendo ser acabado natural o aplicando pintura. En la industria de la construcción, actualmente se realizan casas a partir de paneles de material aglomerado, aprovechando que dichos paneles son resistentes a la humedad se pueden ubicar como cubierta exterior sustituyendo las paredes de madera a las cuales se acostumbraba revestir con una capa de impermeabilizante (Marcano 2006).

Además, se construyen techos ondulados fijándolos de manera directa sin la necesidad de entablado ni aplicación de recubrimiento impermeabilizante.

Para interiores se pueden construir peldaños de escaleras, cielos rasos, accesorios para lugares húmedos como baños y cocinas. Entre otras aplicaciones, es utilizado en la fabricación de galpones, cámaras frigoríficas (gracias a su propiedad de aislamiento térmico), juguetes entre otros.

Debido a la importancia de los materiales compuestos aglomerados se pretende una vez producido uno de ellos a partir de cartón reciclable de corta y larga duración realizar un análisis multifactorial del tipo  $2^{4-1}$ . La formulación del problema consiste en determinar mediante el estudio la influencia de la temperatura, la presión, el tiempo y la composición en la variación de la resistencia a la tracción perpendicular. La aplicación de los diseños factoriales redundan en una mayor eficiencia en cuanto a reducción de tiempo y costos que los experimentos de un solo factor a la vez. Por otro lado es posible representar y analizar gráficamente los resultados de los efectos principales y de interacción lo cual conlleva a ubicar la dirección más apropiada para mejorar el experimento (Montgomery y col., 2002). Para terminar, mediante el uso de este recurso se genera conclusiones que aplican en la totalidad de las condiciones experimentales enfocadas a la optimización del proceso.

Se utilizará un diseño factorial de dos niveles fraccionado general  $(2^{k-p})$  para obtener información referente a la interacción de las variables elegidas e identificar de manera eficiente el grupo de factores que son activos. Este tiene la ventaja de poseer la propiedad de proyección, con la cual se puede observar con más detalle el efecto de un factor activo (Gutiérrez y col., 2003). Un diseño factorial fraccionario  $2^k$  que contiene  $2^{k-p}$  ensayos se conoce como fracción  $1/2^p$  del diseño factorial  $2^k$  o mejor dicho  $2^{k-p}$ . Para la ejecución de este diseño es necesario elegir  $p$  generadoras independientes, las cuales reducirán el número de corridas requeridas en un experimento. El principal motivo de la elección de este tipo de diseño es de proporcionar casi la misma información útil a una economía mayor. La relación que precisa los diseños está compuesta por las  $p$  generadoras seleccionadas originalmente y de sus  $2^p - 1$  interacciones generalizadas (Montgomery y col., 2002).

El uso del patrón de confusión (Montgomery, 1991) se muestra a continuación en la Tabla 1 tomando en cuenta un diseño fraccionado  $2^{4-1}$ , al cual le corresponden 8 ensayos. Los signos de la cuarta columna son generados considerando el producto de los signos correspondientes a los elementos de las columnas anteriores, por lo tanto la expresión [4] = [123] se denomina patrón de confusión del diseño factorial fraccionado. En este caso, la medida de la variable [4] y el factor de interacción de los tres factores [123] es considerado como un generador de la nueva variable fraccionada (Yates 1970).

Tabla 1 Matriz de variables con patrón de confusión de un diseño multifactorial fraccionado  $2^{4-1}$ , en donde la columna de la variable 4 es generada por la multiplicación de las demás. Fuente propia

	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Variable 4=123
1	-	-	-	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	+	+	-	-
5	-	-	+	+
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	+

El cálculo del valor de los efectos principales de las variables es de gran importancia para determinar cuál de ellas influye significativamente en el producto. Para poder estimar cuándo un efecto es significativo o no, se debe determinar numéricamente para compararlo con los demás factores o variables influyentes en el proceso. Lo que se quiere lograr con esto es conseguir el valor de la incidencia de una variable, al equilibrar el efecto de la misma en un plano con relación a sus valores en otro plano, donde éstos son definidos por los niveles de experimentación (Peña 2004). El efecto puede ser determinado con la ecuación 1.

$$E(X) = 2 / \sum_{j=1}^N (\text{signos } \pm \text{ de la columna } x) \times (Y \text{ respuesta}) \quad (1)$$

Los signos usados en la ecuación son los valores de las variables o factores codificados (se toman en cuenta los signos que preceden a los valores para definir la situación) donde  $N$  representa el número de pruebas, es decir para un  $2^4$  el valor de  $N=16$ .

Las observaciones que se tengan serán de gran importancia para proveer información de cada uno de los efectos, de esta manera la precisión con la que se determina cada uno de los efectos es de alta validez desde el punto de vista estadístico, ya que dicha precisión es del  $2/N$  de las diferencias de las pruebas.

Para un cálculo rápido de los efectos de interacción es aplicado un método que consiste en utilizar la tabla de codificación de las variables, como la multiplicación de los signos de las variables presentes en la interacción, hallando el signo aplicando ecuación 2.

$$E(1 \times 2 \times 3) = \sum_{j=1}^N (\text{signos } \pm \text{ de la columna de interacción}) \times (Y \text{ respuesta}) \quad (2)$$

Con la finalidad de determinar la significancia de un efecto dentro de un sistema es necesario estimar la varianza de la experimentación para luego calcular el error estándar de los efectos. En esta parte del estudio multifactorial se comprueba la significancia del efecto en el proceso.

Para que un experimento posea validez se deben reali-

Tabla 2 Combinación de valores de variables para la fabricación de las probetas. De acuerdo al algoritmo de Yates. Fuente propia.

	Temp. (°C)	Presión en caliente (PSI)	Porcentaje de cartón de larga duración (%)	Tiempo en caliente (min.)
1	140	1600	0	25
2	160	1600	0	30
3	140	2000	0	30
4	160	2000	0	25
5	140	1600	50	30
6	160	1600	50	25
7	140	2000	50	25
8	160	2000	50	30

zar al menos dos corridas. El error se calcula empleando las diferencias de las mediciones elevadas al cuadrado, mediante la ecuación 3.

$$S^2 = \sum \frac{di^2}{2 \times g} \quad (3)$$

Dónde  $S^2$  es la varianza;  $\sum di^2$  es la suma de las diferencias de las mediciones elevadas al cuadrado y  $g$  los grados de libertad que corresponden al número de ensayos en el diseño factorial.

El error normal de la experimentación se calcula empleando la ecuación 4.

$$S' = \sqrt{S^2} \quad (4)$$

Para calcular el error para los efectos principales y de interacción se aplica la ecuación 5:

$$V(\text{varianza}(y_{\bar{n}} - y_{-})) = \frac{1}{4} S^2 \quad (5)$$

$$\text{Error} \left( \text{efecto de cada variable} \right) = \sqrt{V} \quad (6)$$

## 2 Diseño del experimento.



Fig. 2 Máquina termocompactora del Laboratorio de Tecnología Mecánica. Fuente propia.

Siguiendo las directrices para el diseño de experimentos mencionadas anteriormente se planteó el problema principal de la investigación que consistió en como determinar el efecto sobre la resistencia a la tracción perpendicular de las posibles combinaciones de presión, temperatura, tiempo y composición en la fabricación de paneles de cartón reciclado.

Con respecto a la elección de factores y niveles se definieron cuatro variables que influyen en la respuesta (resistencia a la tracción perpendicular) estas variables fueron temperatura, presión, composición y tiempo de calentamiento. El rango de valores considerado para cada una de las variables comprende una temperatura de  $145 \pm 15^\circ\text{C}$ , una presión de  $2000 \pm 200$  psi, un tiempo de calentamiento de 30 minutos y composiciones variadas de 100% corta duración, 50% corta duración – 50% larga duración y 80% larga duración – 20% corta duración (Marcano, 2006). Con base en estos valores de referencia se prosiguió a establecer los intervalos de variación de cada factor quedando la temperatura en  $^\circ\text{C}$  entre 140 y 160 ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ), la presión en psi entre 1800 y 2000 ( $\pm 200$  psi), el tiempo de calentamiento de 25 a 30 minutos, y por último la composición considerando 100% corta duración y 50% corta duración – 50% larga duración.

La variable de respuesta o variable dependiente es la resistencia a la tracción perpendicular y se realizaron ensayos para cada combinación de variables independientes.

La elección del diseño experimental se basó en las capacidades del laboratorio donde iba a ser efectuado el experimento, el tiempo disponible y la capacidad de obtención de materia prima para la elaboración de los prototipos. Luego del proceso de análisis de recursos disponibles se eligió un diseño factorial de dos niveles fraccionario  $2^{k-P}_{4-1}$ , específicamente  $2^{4-1}$ . Esto con la finalidad de obtener información concisa y a la vez evitar la realización de 16 muestras extra, lo que disminuye notablemente la utilización de recursos para la ejecución del experimento sin afectar parte del resultado deseado.

### 2.1 Fabricación de prototipos de paneles de cartón reciclado.

Con el rango de valores de las variables establecidos se procedió a la fabricación de los prototipos cortando la materia prima (envases de cartón de líquidos de corta y larga du-



Fig 3 Prensa hidráulica en frío. Fuente propia.

ración) en cuadros con un área aproximada de 25 mm<sup>2</sup> para luego ser compactados con la termocompactora (Gil y col., 2007) mostrada en la Figura 2 cuya capacidad de compresión llega hasta 10.000 psi.

La prensa hidráulica fue precalentada y se agregó teflón líquido para evitar la adherencia de cartón a las planchas metálicas de la máquina. Se usó madera de baja densidad para dar el contorno al cartón para el momento de la compresión. Una vez calibrados los instrumentos de medición (termopar, manómetro y cronómetro), se procedió a la fabricación de las 16 probetas de manera aleatoria, tomando en cuenta el diseño factorial descrito en la Tabla 2.



Fig. 4 Máquina universal de ensayos de la sección de conglomerados del laboratorio de ciencias forestales LABONAC. Fuente propia.

Una vez concluido el tiempo de compresión en caliente los prototipos fueron retirados de la termocompactora y colocados en una prensa hidráulica en frío presentada en la Figura 3 a una presión que no varió para ninguna probeta (1600±200 psi) durante 30 minutos.

Luego de concluida la elaboración de las probetas se procedió a identificarlas y a cortarlas con sierra caladora para llevarlas a sus dimensiones finales (5 cm x 5 cm) con espesor variable entre 1,3 cm y 1,6 cm.

Las probetas fueron adheridas a platinas metálicas con silicón caliente para lograr de esta manera colocarlas en las mordazas de la máquina universal de ensayos.



A

B



C



D

Fig. 5 Secuencia de la fabricación de las probetas. A. Prototipo en el marco de madera luego de la Compresión en caliente. B. Adhesión de platina metálica a las probetas. C. Probeta terminada. D. Probetas identificadas.

Se colocó la identificación a cada una de las probetas a ensayar numerando del 1 al 8 para las diferentes combinaciones de temperatura presión composición y tiempo; y para identificar las corridas se señaló con las letras A y B. En la Figura 5 se observa claramente la evolución de la fabricación de las probetas.

### 2.2 Realización de ensayos de tracción perpendicular a las probetas

La realización de ensayos a tracción perpendicular a los prototipos se llevó a cabo según la norma COVENIN



Fig. 6 Prototipos luego de ensayo de tracción perpendicular. Fuente propia.

847-91 en el laboratorio de ciencias forestales LABONAC de la Universidad de Los Andes, en la máquina universal de

ensayos (mostrada en la Figura 4) con capacidad de 12.000 kg y apreciación de 1 kg para la menor escala de medición. La máquina universal de ensayos hace el registro de la fuerza de ruptura de la probeta en kilogramos, para llevarlo a términos de esfuerzo se utiliza la ecuación 7.

$$\sigma_{tp} = \frac{P}{a \times L} \left[ \frac{Kg}{cm^2} \right] \quad (7)$$

Dónde  $\sigma_{tp}$  es la adhesión interna o tracción perpendicular

en  $\left[ \frac{Kg}{cm^2} \right]$  P representa la carga máxima

Los resultados de los ensayos de tracción perpendicular realizados a las probetas según la norma COVENIN 847-91 se muestran en la tabla 3:

En promedio se obtuvo una resistencia a la tracción perpendicular de 2,165 Kg/cm<sup>2</sup>, donde se puede observar que los valores del ensayo no muestran gran dispersión.

	Efecto	+/- 2*Emor
<b>Efectos principales</b>		
V1	2,20E-01	0,2000
V2	-1,20E-01	0,2000
V3	4,00E-02	0,2000
V4	3,70E-01	0,2000
<b>Efectos de Interacción</b>		
V1V2	3,70E-01	0,2000
V1V3	-1,10E-01	0,2000
V1V4	-1,20E-01	0,2000
V2V3	-5,00E-02	0,2000
V2V4	2,20E-01	0,2000
V3V4	2,40E-01	0,2000
V1V2V3	2,40E-01	0,2000
V1V2V4	4,35E-01	0,2000
V1V3V4	5,00E-02	0,2000
V2V3V4	-1,10E-01	0,2000

Fig. 7 Cálculo de los efectos principales y de interacción. Fuente propia.

Tabla 3 Resultados de los ensayos de tracción perpendicular de las ocho (8) combinaciones de temperatura, presión, porcentaje de cartón de larga duración

Temp. (°C)	Presión en caliente (PSI)	Porcentaje de cartón de larga duración (%)	Tiempo en caliente (min.)	Corrida 1		Corrida 2			
				Masa (gr)	Carga (kg)	R.T (Kg/cm <sup>2</sup> )	Masa (g)	Carga (kg)	R.T (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	140	1600	0	27,2	50	2	26,7	54	2,16
2	160	1600	0	27,0	62	2,48	27,3	52	2,08
3	140	2000	0	27,3	43	1,72	27,0	51	2,04
4	160	2000	0	27,1	52	2,08	26,9	65	2,6
5	140	1600	50	26,7	61	2,44	26,4	65	2,6
6	160	1600	50	26,7	50	2,00	26,1	51	2,04
7	140	2000	50	28,9	46	1,84	26,2	41	1,64
8	160	2000	50	27,1	63	2,52	27,6	60	2,4

y tiempo de calentamiento. Fuente propia.

aplicada en [Kg], a es el ancho de la probeta en [cm] y L el largo de la probeta en [cm].

### 2. 3 Realización de análisis multifactorial

Para realizar el estudio del experimento factorial se usó el programa SEMPRO II (Peña 2004). Este software emplea métodos estadísticos que fueron usados para la obtención de las tendencias de fabricación de los paneles. Para la introducción de datos en el software primeramente se seleccionó el tipo de diseño factorial, en este caso se seleccionó 2<sup>k</sup>(k-p) donde (k-p) → (4-1), que fue el diseño factorial seleccionado para el análisis.

Las variables fueron introducidas al programa de la si-

guiente manera:

Variable 1: temperatura.

Variable 2: presión.

Variable 3: porcentaje de cartón de larga duración.

Variable 4: tiempo de calentamiento.

Seguidamente se introdujeron los valores correspondientes a los intervalos seleccionados para cada variable según el diseño del experimento, para luego completar la tabla inferior y colocar los valores de las variables para cada experimento, así como la respuesta (variable dependiente) para ambas corridas.

### 3 Resultados

Luego de suministrados todos los datos al software, este arrojó los resultados de manera inmediata.

#### 3.1 Ensayos de tracción Perpendicular.

Los resultados de los ensayos de tracción perpendicular realizados a las probetas según la norma COVENIN 847-91 se muestran en la tabla 3:

En promedio se obtuvo una resistencia a la tracción perpendicular de  $2,165 \text{ Kg/cm}^2$ , donde se puede observar que los valores del ensayo no muestran gran dispersión.

#### 3.2 Efectos estimados del diseño factorial.

En la pestaña Efectos Estimados del Diseño Factorial se muestran las diferentes tendencias obtenidas por el análisis multifactorial. Estas tendencias corresponden al estudio del efecto de una sola variable con respecto a la resistencia a la tracción perpendicular. Además, también son mostradas las tendencias de fabricación cuando se combinan dos variables.

#### 3.3 Estudio del efecto de una variable con respecto a la resistencia a la tracción perpendicular de los paneles.

Se refiere la tendencia estimada por el software para comprender el efecto que tiene el aumento o disminución de cada variable con respecto a la respuesta del sistema (Resistencia a la tracción perpendicular). Los efectos principales son resaltados por el software en la columna Efecto en negrita debido al alto valor calculado. (Ver figura 7).

#### 3.4 Influencia de la temperatura (V1) en la resistencia a la tracción perpendicular.

Con el aumento de la temperatura se puede obtener un aumento en la resistencia a la tracción, tomando en cuenta que la temperatura no puede ser muy elevada para quemar el conglomerado y alterar las propiedades mecánicas. Esta tendencia se aprecia gráficamente en la siguiente figura:

#### 3.5 Influencia de la presión en caliente (V2) en la resistencia a la tracción perpendicular.

En la figura 7 se puede apreciar claramente que la relación entre la presión y la resistencia a la tracción perpendicular es inversamente proporcional. Con la disminución de la presión en caliente (Variable 2), se puede obtener una mayor resistencia a la tracción perpendicular, sin embargo esta presión no puede ser tan baja como para evitar la compactación del conglomerado.

Del mismo modo se puede visualizar (en la columna de efectos) que no es un efecto principal, es decir, el efecto que tiene la presión en la resistencia a la tracción perpendicular es poco influyente.

#### 3.6 Porcentaje de cartón de larga duración (V3) presente en los prototipos y su influencia en la resistencia a la tracción perpendicular.

Al aumentar la cantidad cartón de larga duración que conforma el conglomerado, se observa una tendencia al aumento de la tracción perpendicular.

#### 3.7 Influencia del tiempo de compresión (V4) en la resistencia a la tracción perpendicular.

En la figura 7 d se puede apreciar que al aumentar el tiempo de compactación en caliente (variable 4) se puede obtener mejores resultados con respecto a la resistencia a la tracción perpendicular. De igual manera que para la temperatura, el tiempo no puede ser muy prolongado para evitar alteraciones en las propiedades mecánicas producidas por calentamiento excesivo.

#### 3.8 Interacción entre dos variables

SEMPRO II arrojó como resultado de efectos más influyentes con respecto a la resistencia a la tracción perpendicular la combinación de las variables V1 con V2 (temperatura con presión de compactación en caliente), V2 con V4 (presión con tiempo de compresión en caliente) y V3 con V4 (porcentaje de cartón de larga duración con tiempo de compresión en caliente). Esta manera del software indicar estos efectos se basa en el alto valor obtenido en la columna de efecto, siendo estos valores  $3,70\text{E-}01$  y  $2,20\text{E-}01$  y  $2,40\text{E-}01$  respectivamente de primordial importancia para el estudio y los cuales fueron obtenidos por el software SEMPRO II.

#### 3.9 Interacción entre V1 y V2 (Temperatura y Presión).

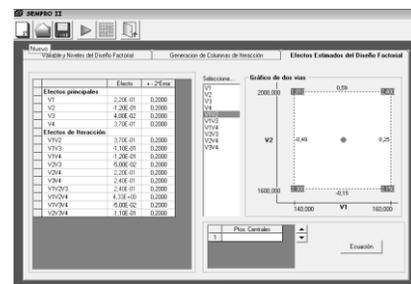


Fig. 8 Interacción entre las variables V1 y V2 (Temperatura y presión).  
Fuente propia.

La figura 8 muestra un valor de resistencia a la tracción superior en la esquina superior derecha donde se indica un valor de 2,400, el cual se obtiene al combinar el valor más alto de temperatura con el valor más alto de presión, mostrando así una tendencia de fabricación que aumenta la resistencia a la tracción perpendicular.



Estadística Aplicada a la Ingeniería, Limusa, México.

Peña M, 2004, Software para análisis multifactorial y superficies de respuesta de procesos industriales, Trabajo de grado para optar al título de Msc en Ingeniería de Mantenimiento, Universidad de Los Andes Venezuela pp.220.

Yates F, 1970, Experimental Design Selected Papers of Frank Yates, Griffin, London.

**Recibido:** 24 de septiembre de 2015

**Aceptado:** 11 de marzo de 2016

**Mariano Peña Sosa**, es Profesor Asociado a dedicación exclusiva, adscrito al Departamento de Tecnología y Diseño de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, desde 1999, venezolano, egreso de la Universidad de Los Andes, Venezuela., con el título de Ingeniero Mecánico en 1994 y Magister Scientiarum en Ingeniería de Mantenimiento en 2004.

**María Eliana Méndez García** es Profesora en el escalafón de Asociado de la Facultad de Ingeniería ULA del Departamento de Química Industrial y Aplicada desde el año 1999. La Profesora Méndez tiene nacionalidad venezolana, egresó de la Universidad de Los Andes (Venezuela) con el Título de Ingeniero Químico en 1998 y con el grado de Magister Scientiarum en Electroquímica Fundamental y Aplicada en 2003. Correo electrónico: mendezme@ula.ve

**Rubén Darío Chacón Morón**, es Profesor Asociado adscrito al Departamento de Tecnología y Diseño de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, desde 1999, venezolano, egreso de la Universidad de Los Andes, Venezuela., con el título de Ingeniero Mecánico en 1990, Magister Scientiarum en Gerencia empresarial en 1998 y Doctor en Gerencia avanzada en 2012. Correo electrónico: rdchacon@ula.ve

