

## **Determinación de variables que afectan el encogimiento de suelas de PVC mediante un diseño factorial 2<sup>5</sup>**

Guadalupe Verónica Muñoz-Hernández, María Verónica Hernández-Ruiz\*, Fernando Pérez-Villaseñor, Arturo Elías-Domínguez\*\* **iD**, Ángel Castro-Agüero, Arturo Ortiz-Arroyo **iD**

Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Calzada Apizaquito s/n, Apizaco, Tlaxcala, México.

Email de autores para correspondencia: \*[mvhernandez@uatx.mx](mailto:mvhernandez@uatx.mx); \*\*[arturo.elias.d@uatx.mx](mailto:arturo.elias.d@uatx.mx)

**Recibido:** 4 agosto 2023. **Aceptado:** 26 noviembre 2023

### **RESUMEN**

Se presentan los resultados de un estudio realizado en una empresa del sector de calzado<sup>1</sup>, en el estado de Tlaxcala. Durante la elaboración de un modelo específico de zapato, se presentan inconvenientes en la etapa de ensamble de la suela al zapato, una mala apariencia física y, consecuentemente una pérdida de materia prima y grandes tiempos muertos. El análisis del entorno permitió identificar el origen del problema en el proceso de inyección, se observa un alto porcentaje de encogimiento al desmoldear las suelas. Una vez identificadas las variables que intervienen en el proceso, se propone una fase experimental mediante el empleo de un diseño de experimentos (DoE) 2<sup>5</sup> con tres réplicas. Los resultados obtenidos muestran que, la media promedio del porcentaje de encogimiento pasó de 2.95% a un valor de 2.30%, indicando una reducción del 22%. La dispersión del porcentaje de encogimiento muestra una reducción del 71% en la desviación estándar, reduciendo su valor de 0.540% a 0.158%, este valor en términos de varianza representa una reducción de 91.4%. El experimento también permitió identificar una proporción adecuada entre el material virgen y el material reciclado, con la cual el producto también presenta una apariencia aceptable.

**Palabras clave:** ANOVA; Diseño de experimentos; efectos significativos; mejora de proceso.

<sup>1</sup>Por razones de confidencialidad se omite el nombre de la empresa. Due to confidentiality reasons, the name of the company is omitted.

### **ABSTRACT**

The results of a study carried out in a company in the footwear sector in state of Tlaxcala are presented<sup>1</sup>. During the elaboration of a specific shoe model, there are problems in the assembly stage of the sole

to the shoe, a bad physical appearance and, consequently, a loss of raw material and long downtime. The analysis of the environment made it possible to identify the origin of the problem in the injection process, a high percentage of shrinkage is observed when demolding the soles. Once the variables involved in the process have been identified an experimental phase is proposed using a design of experiments (DoE)  $2^5$  with three replicates. The results obtained show that the mean average of the shrinkage percentage went from 2.95% to a value of 2.30% indicating a reduction of 22%. The dispersion of the shrinkage percentage shows a reduction of 71% in the standard deviation, reducing its value from 0.540% to 0.158%; this value in terms of variance represents a reduction of 91.4%. The experiment also made it possible to identify a suitable proportion between virgin material and recycled material, with which the product also presents an acceptable appearance.

**Keywords:** ANOVA; Design of experiments; significant effects; process improvement.

## INTRODUCCIÓN

Un proceso de manufactura consiste en la transformación de materias primas en productos terminados, cuya finalidad es la de satisfacer una necesidad, además de cumplir los requerimientos de diseño, especificaciones y estándares de calidad [1]. Quienes gestionan este tipo de procesos, se enfrentan a relaciones complejas entre múltiples factores: materiales, maquinaria, medio ambiente, tecnología, procedimientos, mano de obra, etc.; No identificar como interaccionan entre sí, puede afectar la producción y la calidad del producto final; por tanto, se hace necesario un análisis del entorno en el cual se desarrolla el producto.

### Proceso de la fabricación del calzado

La elaboración del calzado, sigue la secuencia que se muestra en la Figura 1, se observan diversos procesos físicos: la selección de materiales debe cumplir con las

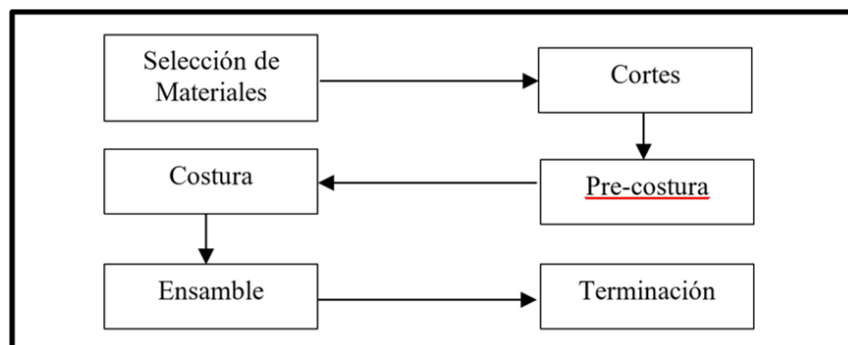
especificaciones de calidad establecidas en laboratorio, la sección de corte es donde se manipulan materiales naturales y sintéticos que conforman el zapato; aquí, se utilizan suajes que facilitan los trabajos y propician variaciones mínimas en la medida; la precostura y costura, también requiere un control de calidad; seguido del descarte, el perforado y/o decorado requerido y finalmente el proceso de los aparados que suelen ser complejos y realizados mediante cocido, pegado o sueldado.

En la etapa de ensamble, los aparados se realizan en la mayoría de veces de materiales planos; por tanto, se deben obtener las medidas de espacio y las figuras correspondientes para hacer más fácil el montado de hormas; sin embargo, se presentan variantes que dependen del tipo de construcción de calzado (de cementado y/o stich down). En la etapa final, se debe verificar la estética y la coordinación de colores en el corte que forma el zapato y la suela. Para el caso en estudio, el ensamble del

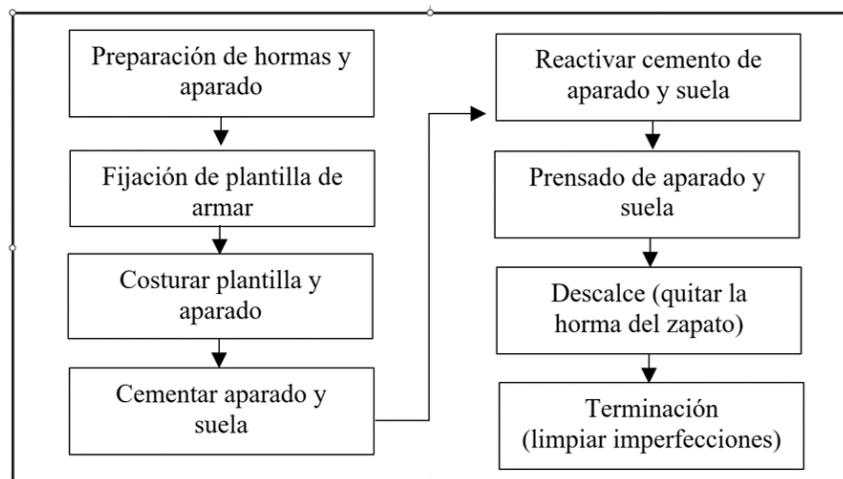


calzado se realiza mediante el stich down; proceso que consiste en las etapas que se muestran en la Figura 2, y donde es importante que la suela del zapato cumpla con las especificaciones adecuadas para evitar principalmente dos problemas: a) estructural: al afectar el proceso de ensamble, al no coincidir las medidas de suela y la estructura superior del zapato y b) de estética: al rechazar la suela con mayor porcentaje de encogimiento se consideraba material de reciclado; pero, el uso de material reciclado propicia una mala apariencia en el calzado (suelas opacas o no uniformes en el color).

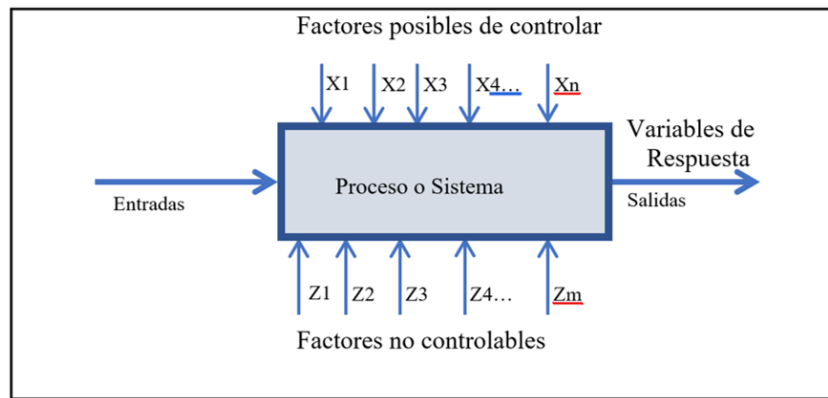
Por otro lado, una herramienta importante en la mejora de procesos, productos y trabajos científicos que requieren un análisis estadístico es el diseño de experimentos (DoE), al permitir un análisis completo de todas las variables que componen el sistema, evaluándolas de manera simultánea a partir de experimentos comparados. El DoE ha resultado eficaz en diversas áreas de estudio tales como: la agroindustria, la medicina, la química, la veterinaria, la biotecnología, la farmacéutica, entre otras [2,3,4].



**Figura 1.** Proceso general de elaboración de un zapato.



**Figura 2.** Proceso de ensamble (stich down) de un zapato.



**Figura 3.** Modelo general de un proceso o sistema; adaptado de Montgomery, 2011[5].

Como se observa en la Figura 3, la base para aplicar el DoE son las variables involucradas en el proceso ( $X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$ ), que pueden estar o no afectando la variabilidad de la variable de respuesta, deben ser medibles, manipulables y como consecuencias factibles de controlar. Además, existen variables intangibles y/o no fáciles de controlar ( $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, \dots, Z_m$ ); en este caso, se busca al interior del DoE minimizar su efecto sobre la variable de respuesta [5,6].

El uso de métodos estadísticos como el DoE, conduce al diseño óptimo del experimento, provee conocimiento que puede contribuir a mejorar la calidad, la productividad y la competitividad de las organizaciones. Asimismo, se considera que, la combinación del control estadístico junto con el DoE puede contribuir a minimizar la variabilidad del proceso, lo que redundará en una producción virtualmente libre de defectos, propiciará un entendimiento de las relaciones complejas que existen entre las variables involucradas, y permitirá alcanzar el valor objetivo y/o nominal de la variable de respuesta, ello a pesar de la

presencia del error experimental [7,8].

El DoE orienta hacia la realización del experimento bajo la premisa de considerar el contexto y entorno del problema a analizar, permite estimar de manera estadística los efectos que sobre la variable de respuesta (característica crítica del proceso) pueden producir la presencia de variaciones en materias primas, métodos de diseño, maquinaria, medio ambiente y los procedimientos de medición. En particular, el diseño factorial es considerado eficiente debido a que implica el estudio simultáneo de factores, la evaluación sencilla de la significación de sus efectos y sus posibles interacciones, lo que conduce a una mejora del proceso y como consecuencia garantiza la calidad en la variable de interés o de salida [5,9].

En este trabajo se presenta la aplicación de un DoE  $2^5$  (5 factores con 2 niveles o valores cada uno) para tratar de resolver el problema identificado en la etapa de ensamble de la suela al zapato. La suela se produce en una máquina de inyección, y presenta un porcentaje de encogimiento de hasta un 180% mayor a la

especificación que es de  $2\% \pm 0.1$ , ocasionando tiempos muertos y pérdidas económicas en la producción. Es importante tomar en cuenta que el proceso de moldeo por inyección en la elaboración de suelas, requiere la coordinación de un número importante de elementos: el tipo de máquina, el molde, la temperatura, la presión de inyección, intervalos de tiempo, el diseño de la parte moldeada, el material a moldear, incluyendo el elemento humano [10].

## METODOLOGÍA

El grupo de trabajo se encontró motivado por la posible solución del problema, el tiempo de dedicación al estudio fue avalado y justificado ante la alta dirección, por lo que el supervisor

del proceso y el personal operativo trabajaron de manera conjunta. Se describieron las etapas involucradas y se determinaron las características de calidad (porcentaje de encogimiento y la apariencia de la suela de policloruro de vinilo, PVC).

Una vez establecido el propósito y el equipo de trabajo, se realizó una sesión de lluvia de ideas para asegurarse de incluir todo lo necesario en la experimentación y así solucionar el problema detectado, se construyó un diagrama de Ishikawa para establecer claramente el proceso y delimitar los posibles factores a considerar; el resultado de esta actividad, ver Figura 4, incluyen: el método, el material, la maquinaria utilizada y la mano de obra.

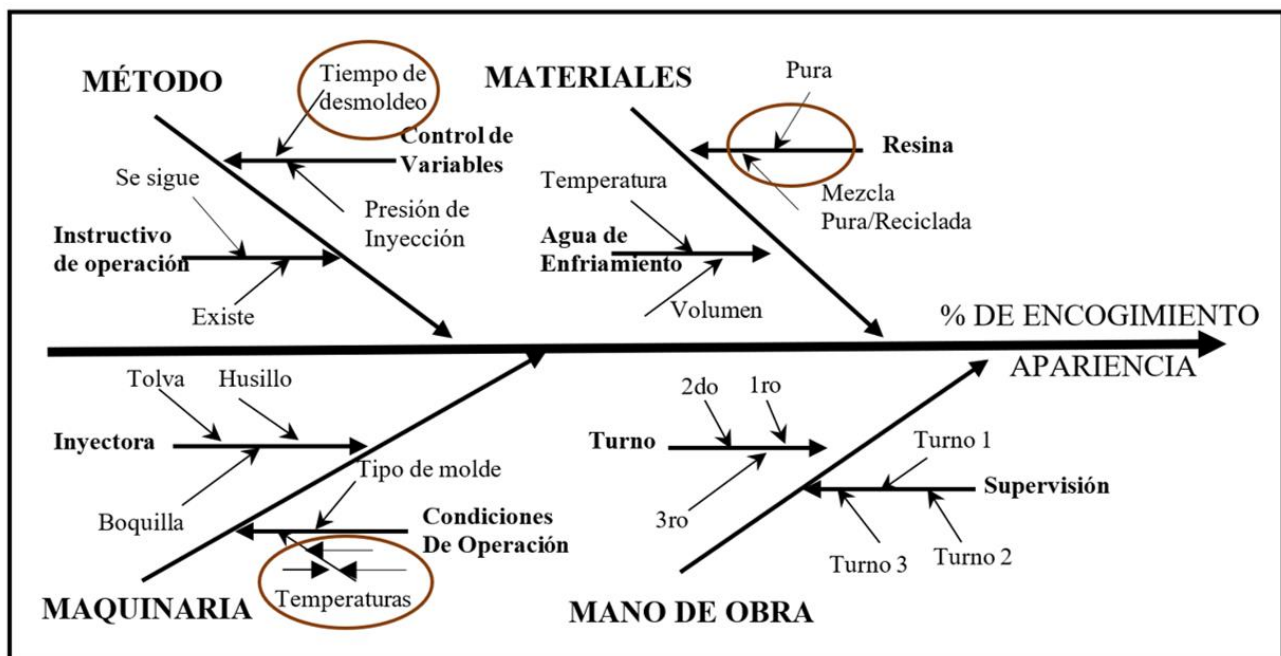


Figura 4. Diagrama de Ishikawa. Análisis del entorno del problema en el sistema.

Una vez analizada cada rama en el diagrama de la Figura 4, se llegó a considerar que los posibles factores que causan la variabilidad del porcentaje de encogimiento en la suela del calzado estaban en el método (tiempo de espera para el desmolde), en la máquina de inyección (3 temperaturas de operación) y en los materiales (proporción de material virgen y material reciclado en la alimentación de resina). Otros factores importantes son la presión de inyección, las condiciones del molde y las condiciones de las operaciones auxiliares, las cuales se mantuvieron sin cambio durante el análisis. A los operarios se les capacitó e indicó que deberían seguir en todo momento y en cada operación efectuada, los mismos procedimientos de operación y control, ello con la finalidad de poder minimizar los posibles efectos sobre las características de interés.

Los factores a dos niveles en el estudio fueron: a) cada una de las tres zonas de temperatura en la máquina de inyección, temperatura delantera [A] (150 °C y 155 °C), temperatura central [B] (150 °C y 160 °C) y temperatura trasera [C] (160 °C y 170 °C); el tiempo de espera para desmoldear la suela [D] (30 s y 60 s) y la proporción de resina a utilizar [E] (100% virgen o una mezcla de 75% virgen y 25% de resina reciclada).

La identificación de factores y niveles permitió organizar el desarrollo del experimento, con la disposición de recursos materiales, humanos y financieros, se planteó realizar tres réplicas del experimento, el diseño  $2^5$  se planificó con apoyo del Software Minitab versión 18 [11], las

dos primeras columnas de la Tabla 1 muestran el número de experimentos en cada réplica, las combinaciones codificadas de cada tratamiento, seguidas de las columnas que contienen los valores o niveles que toman cada factor considerado. Es importante resaltar que, la secuencia de la experimentación estaba garantizada, la aleatorización en el orden de obtención de resultados se reporta en la parte superior derecha de cada uno de ellos. En los tratamientos, la ausencia de la letra minúscula representa que el factor correspondiente a tal letra se encuentra en su menor valor; así, por ejemplo, el tratamiento *acd* implica que la T1 tiene un valor de 155 °C, T2 corresponde a un valor de 150 °C, T3 tiene un valor de 170 °C, el tiempo es de 60 s y la proporción de material es de 75% de material virgen y 25% de material reciclado.

Los resultados experimentales obtenidos en un periodo de tres meses, inicialmente se analizaron para determinar el efecto que cada factor provee al porcentaje de encogimiento, que es la variable de respuesta. El cálculo de efectos se realizó a partir de la ecuación 1, que estima la diferencia observada en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel en el factor [5,6].

$$\text{Efecto de } i = \bar{Y}_{i+} - \bar{Y}_{i-} \quad (1)$$

donde:

*i* significa Factor A, B, C, etc.

$\bar{Y}_{i+}$  significa el promedio de la respuesta cuando el factor *i* se encuentra en su nivel alto o mayor.

$\bar{Y}_{i-}$  significa el promedio de la respuesta cuando el factor *i* se encuentra en su nivel bajo o menor.

**Tabla 1.** Matriz de Tratamientos, Diseño y Resultados

No.	Tratamiento	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	Tiempo(s)	P(%)	Porcentaje de encogimiento (%)		
		[A]	[B]	[C]			[D]	[E]	Réplica I
1	1	150	150	160	30	75	4.22 <sup>13</sup>	2.88 <sup>54</sup>	3.26 <sup>94</sup>
2	a	155	150	160	30	75	4.00 <sup>29</sup>	3.25 <sup>68</sup>	3.33 <sup>34</sup>
3	b	150	160	160	30	75	3.55 <sup>15</sup>	3.33 <sup>45</sup>	2.88 <sup>84</sup>
4	ab	155	160	160	30	75	4.22 <sup>42</sup>	4.18 <sup>16</sup>	3.91 <sup>82</sup>
5	c	150	150	170	30	75	4.44 <sup>74</sup>	4.18 <sup>38</sup>	4.00 <sup>31</sup>
6	ac	155	150	170	30	75	2.66 <sup>81</sup>	3.25 <sup>02</sup>	3.11 <sup>58</sup>
7	bc	150	160	170	30	75	3.11 <sup>04</sup>	2.88 <sup>64</sup>	2.88 <sup>92</sup>
8	abc	155	160	170	30	75	4.18 <sup>01</sup>	2.32 <sup>46</sup>	2.66 <sup>73</sup>
9	d	150	150	160	60	75	3.33 <sup>75</sup>	2.22 <sup>49</sup>	3.11 <sup>05</sup>
10	ad	155	150	160	60	75	2.66 <sup>03</sup>	3.02 <sup>61</sup>	2.32 <sup>88</sup>
11	bd	150	160	160	60	75	3.11 <sup>25</sup>	2.88 <sup>50</sup>	3.32 <sup>90</sup>
12	abd	155	160	160	60	75	3.33 <sup>27</sup>	2.88 <sup>51</sup>	3.11 <sup>80</sup>
13	cd	150	150	170	60	75	2.88 <sup>85</sup>	2.66 <sup>55</sup>	2.88 <sup>08</sup>
14	acd	155	150	170	60	75	2.44 <sup>30</sup>	2.55 <sup>87</sup>	2.79 <sup>40</sup>
15	bcd	150	160	170	60	75	3.11 <sup>14</sup>	3.11 <sup>43</sup>	2.95 <sup>93</sup>
16	abcd	155	160	170	60	75	2.44 <sup>21</sup>	2.30 <sup>33</sup>	2.50 <sup>71</sup>
17	e	150	150	160	30	100	2.55 <sup>48</sup>	2.55 <sup>12</sup>	3.15 <sup>96</sup>
18	ae	155	150	160	30	100	4.18 <sup>06</sup>	4.03 <sup>52</sup>	3.33 <sup>83</sup>
19	be	150	160	160	30	100	3.25 <sup>18</sup>	2.78 <sup>36</sup>	3.06 <sup>79</sup>
20	abe	155	160	160	30	100	3.11 <sup>59</sup>	3.11 <sup>20</sup>	3.68 <sup>76</sup>
21	ce	150	150	170	30	100	3.25 <sup>65</sup>	3.11 <sup>60</sup>	3.72 <sup>17</sup>
22	ace	155	150	170	30	100	3.26 <sup>07</sup>	2.88 <sup>63</sup>	3.11 <sup>86</sup>
23	bce	150	160	170	30	100	2.55 <sup>66</sup>	2.32 <sup>37</sup>	2.72 <sup>24</sup>
24	abce	155	160	170	30	100	2.79 <sup>89</sup>	2.79 <sup>22</sup>	2.82 <sup>56</sup>
25	de	150	150	160	60	100	3.25 <sup>19</sup>	2.32 <sup>57</sup>	2.55 <sup>70</sup>
26	ade	155	150	160	60	100	3.25 <sup>10</sup>	3.11 <sup>41</sup>	3.30 <sup>95</sup>
27	bde	150	160	160	60	100	2.79 <sup>32</sup>	2.32 <sup>35</sup>	2.88 <sup>78</sup>
28	abde	155	160	160	60	100	2.32 <sup>69</sup>	2.32 <sup>44</sup>	2.65 <sup>11</sup>
29	cde	150	150	170	60	100	2.32 <sup>09</sup>	2.55 <sup>62</sup>	2.66 <sup>67</sup>
30	acde	155	150	170	60	100	2.32 <sup>28</sup>	2.40 <sup>47</sup>	2.32 <sup>72</sup>
31	bcde	150	160	170	60	100	2.79 <sup>39</sup>	2.79 <sup>23</sup>	2.11 <sup>77</sup>
32	abcde	155	160	170	60	100	2.32 <sup>26</sup>	2.11 <sup>53</sup>	2.50 <sup>91</sup>

En el caso de estudio existen 31 efectos: 5 principales, 10 de interacción binaria, 10 de interacción entre tres factores, 5 de interacción entre cuatro factores, y 1 interacción entre cinco factores, sin olvidar el promedio global de los datos.

Los valores encontrados de los efectos se estandarizaron para obtener un gráfico de probabilidad normal e identificar cuales resultan significativos [9]; la estandarización

del *Efecto de i* requiere del cálculo del error estándar de efecto  $se(Efecto)$ , que está relacionado con la estimación de la varianza dada por el cuadrado medio del error en el análisis de varianza (*MCE*) y el total de observaciones obtenidas, mediante la ecuación 2. Para obtener la estandarización de cada efecto o valor  $T_i$ , simplemente se divide cada efecto presente en el modelo entre el valor  $se(Efecto)$ , ecuación 3 [5].



$$se(Efecto) = \frac{2\sqrt{MCE}}{\sqrt{r2^k}} = \frac{2S}{\sqrt{r2^k}} \quad (2)$$

Donde r representa la cantidad de réplicas y k el número de factores en el diseño.

$$T_i = \frac{Efecto\ i}{se(Efecto)} \quad (3)$$

Conociendo los efectos estandarizados se realizó una gráfica de probabilidad normal para identificar la significación de cada efecto. Se efectuó un análisis de varianza en el Software Minitab versión 18, considerando solo los factores con efecto significativo. A través de un análisis de residuos se verificó el cumplimiento de los supuestos que se requieren para validar los resultados y las conclusiones. Finalmente se compararon datos de antes y después del estudio para verificar los logros obtenidos.

## ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En las últimas tres columnas de la Tabla 1, se encuentran las observaciones obtenidas, con estos valores se calculó un análisis de varianza

para todos los términos del modelo, donde la **MCE** proporcionó un valor de 0.11978 y por tanto un valor de 0.3461% para **S**, el cálculo de efectos estandarizados y su respectiva gráfica de probabilidad normal en la Figura 5, propiciaron la identificación de 10 términos significativos sobre la variable de respuesta (porcentaje de encogimiento). Se puede visualizar que: de 10 efectos estadísticamente significativos (aquellos que son menores a -2 y mayores a 2), ocho presentan efectos negativos y dos positivos, información que preliminarmente induce a considerar con un 95% de confianza que el proceso debe operarse en los niveles altos de los factores T2, T3, tiempo y proporción. El resto de los efectos se sitúan alrededor de la línea roja continua, que representa la línea de distribución normal ajustada que indica los límites que deberían tener los valores de los efectos estandarizados para considerarse significativos. En la Tabla 2 se reporta la lista de los 10 términos con efecto significativo sobre el porcentaje de encogimiento.

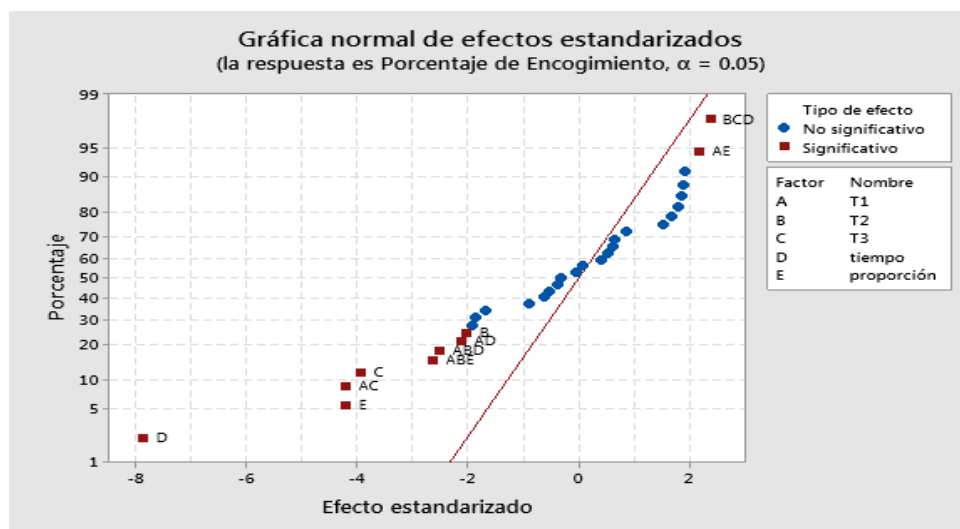


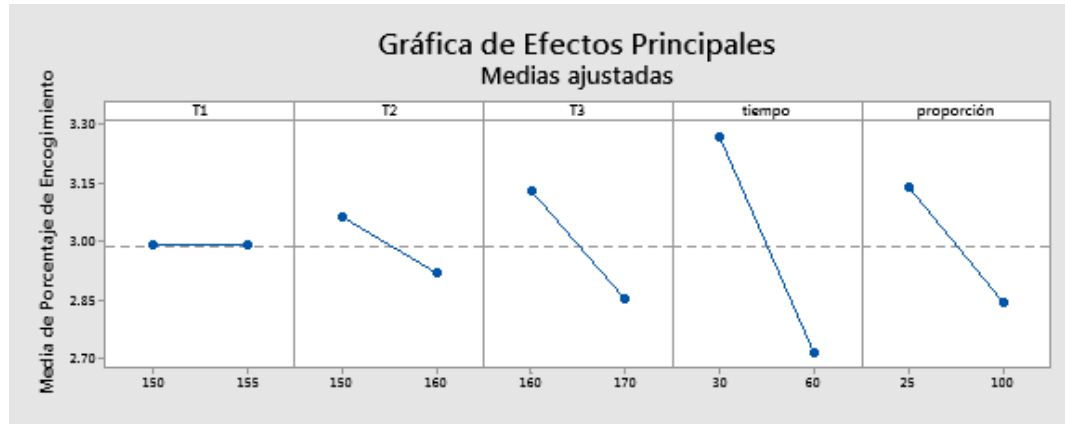
Figura 5. Gráfica de probabilidad para los efectos estandarizados. Obtenida en Minitab versión 18.





**Tabla 2.** Efectos significativos para el porcentaje de encogimiento. Calculados con  $S=0.3461$

Factor o Términos en el Modelo	Efecto	Efecto estand. (Valor T)	Factor o Términos en el Modelo	Efecto	Efecto estand. (Valor T)
T2	-0.1435	-2.0318	T1*tiempo	-0.1494	-2.1143
T3	-0.2781	-3.9367	T1*proporción	0.1548	2.1910
tiempo	-0.5548	-7.8528	T1*T2* tiempo	-0.1773	-2.5095
proporción	-0.2965	-4.1962	T1*T2* proporción	-0.1865	-2.6392
T1*T3	-0.2960	-4.1903	T2*T3* tiempo	0.1681	2.3797



**Figura 6.** Representación gráfica de los efectos principales. Resultados obtenidos en Minitab versión 18.

De la gráfica de los efectos principales mostrada en la Figura 6, si los factores se trabajan en sus niveles altos, el porcentaje de encogimiento tiende a disminuir. Sin embargo, es necesario verificar el comportamiento de las interacciones significativas. Para ello y a partir de los efectos listados anteriormente, se realiza el análisis de varianza (ANOVA) para reafirmar estadísticamente la significancia de los efectos, verificar posible falta de ajuste por eliminación de términos; se incluye en el análisis, al factor T1 una vez que en la Tabla 2 aparece en la mayoría de las interacciones significativas, también los términos necesarios para obtener un modelo estadístico jerárquico [5].

En la Figura 6, se observa que a temperaturas

altas en T2 y T3 y tiempos mayores, el porcentaje de encogimiento disminuye, esto haría pensar que, al seguir aumentando la temperatura y el tiempo, la característica de calidad continuaría mejorando; sin embargo, al incrementar estas variables se notó que la apariencia de la suela se ve afectada, presentando defectos muy notorios como: exceso de brillo, ralladuras o presencia de burbujas. El análisis de las interacciones indica que es mejor trabajar el nivel alto de T1. Con los resultados reportados en la Tablas 2 y Tabla 3, se determina que a niveles altos de los factores se obtiene el menor porcentaje de encogimiento de las suelas, y ello se confirma al revisar los resultados de la experimentación, un menor porcentaje de encogimiento promedio

se encuentra en la combinación *abcde*, en donde el total de factores se encuentra en su nivel alto y un porcentaje de encogimiento promedio de 2.31.

Además, es importante mencionar que los resultados muestran que: es posible utilizar material virgen con material reciclado (que siempre existe), con buenos resultados; la combinación *abcd* corresponde a la combinación donde todos los factores están en niveles altos, excepto la concentración que está en su nivel bajo que corresponde al valor de 75% de resina virgen y 25% de resina reciclada, con un valor promedio en el porcentaje de

encogimiento de 2.41.

La Tabla 3 también muestra que al eliminar 14 términos de efectos no significativos ni necesarios, no se propicia una falta de ajuste del modelo ( $P=0.1332$ ), con un valor de  $R^2=64.76\%$ , valor que refleja el porcentaje de explicación de la variabilidad producida por los factores considerados sobre el porcentaje de encogimiento.

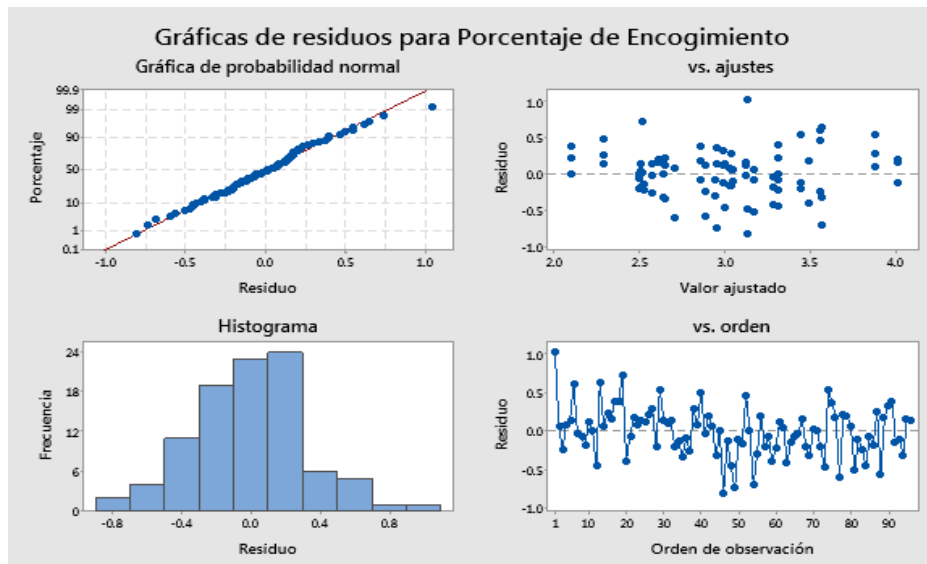
En la Figura 7 se muestra el comportamiento de los residuales. Los puntos de la gráfica superior izquierda se localizan razonablemente próximos a una línea recta lo que permite concluir que siguen una distribución normal;

**Tabla 3.** Análisis ANOVA del porcentaje de encogimiento. \*Términos Significativos. (Minitab versión 18). Se utiliza un nivel de confianza de 0.95 para el análisis de los datos.

Fuente de Variabilidad	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Valor F	p-Valor
<b>Modelo</b>	18.7422	17	1.10248	8.4316	0.0000
Lineal	11.8474	5	2.36948	18.1215	0.000
T1	0.0001	1	0.00008	0.0006	0.9798
T2	0.4945	1	0.49450	3.7819	0.0554
T3	1.8565	1	1.85648	14.1981	0.0003*
tiempo	7.3871	1	7.38705	56.4951	0.0000*
Proporción	2.1093	1	2.1093	16.1316	0.0001*
Interacciones de 2 términos	4.6277	9	0.51418	3.9324	0.0004
T1*T2	0.0527	1	0.05273	0.4033	0.5272
T1*T3	2.1034	1	2.10338	16.0863	0.0001*
T1*tiempo	0.5355	1	0.53551	4.0955	0.0464*
T1*proporción	0.5751	1	0.57505	4.3979	0.0392*
T2*T3	0.4388	1	0.43875	3.3555	0.0708
T2*tiempo	0.4200	1	0.42003	3.2123	0.0770
T2*proporción	0.4121	1	0.41213	3.1519	0.0797
T3*tiempo	0.0007	1	0.00065	0.0050	0.9439
tiempo*proporción	0.0894	1	0.08943	0.6839	0.4108
Interacciones de 3 términos	2.2672	3	0.75572	5.7796	0.0013
T1*T2*tiempo	0.7544	1	0.75438	5.7694	0.0187*
T1*T2*proporción	0.8344	1	0.83440	6.3814	0.0136*
T2*T3*tiempo	0.6784	1	0.67838	5.1882	0.0255*
Error	10.1989	78	0.13076		
Falta de ajuste	2.5323	14	0.18088	1.5099	0.1332
Error Puro	7.6667	64	0.11979		
<b>Total</b>	28.9412	95			

Resumen del modelo      \*Fuente de variabilidad significativa       $S=0.3616$        $R^2= 64.76\%$





**Figura 7.** Comportamiento de los residuales. Comprobación de supuestos del ANOVA. Obtenidos en Minitab versión 18.

aunque existe un punto que se aleja de todos, se pudo verificar que el punto corresponde a la primera corrida que se realizó durante la experimentación y puede atribuirse a la falta de experiencia en la medición de la variable del proceso.

Las dos graficas a la derecha de la Figura 7, muestran los residuales contra el orden temporal y el valor promedio de cada tratamiento, no se observa ningún patrón o tendencia, lo que indica que se cumplen los supuestos de independencia y homoscedasticidad, por tanto, los resultados pueden ser considerados confiables.

Finalmente, los resultados de 24 pruebas realizadas con las condiciones encontradas como óptimas, se comparan con un igual número de registros previos a la

experimentación (tomados al azar), a través de una gráfica de control [12], y se reportan en la Figura 8. Se puede notar que el porcentaje de encogimiento después de la experimentación presenta un comportamiento distinto, el promedio del porcentaje de encogimiento en estas 24 mediciones muestra una reducción del 22.03% al pasar de un valor de 2.95% a un 2.30%; en cambio, la dispersión del porcentaje de encogimiento es mucho menor después del estudio con un valor en la desviación estándar de 0.1508% contra un valor de 0.5403% antes de la experimentación, lo que representa una reducción del 72.1%. Este último resultado da lugar a una reducción del 39% en el límite superior y un 37% de aumento con relación al límite inferior. Por tanto, la varianza pasa de un valor inicial de 0.2920 a un valor de 0.0249, lo que indica una reducción de 91.4%.

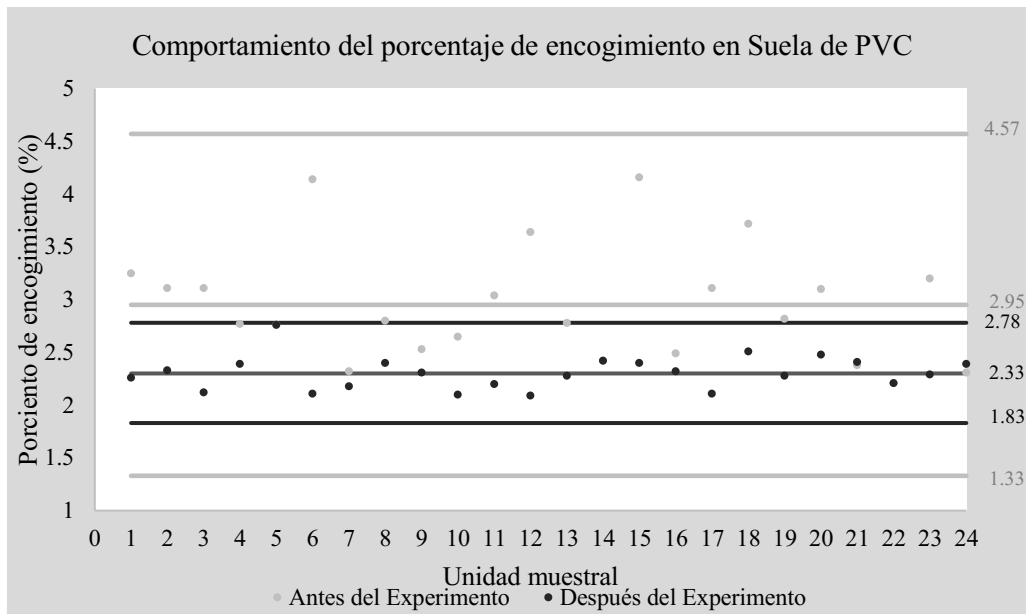


Figura 8. Comparativo de porcentaje de encogimiento, antes y después del Estudio.

## CONCLUSIONES

Después de la experimentación, los resultados mostraron la utilidad del diseño de experimentos en la mejora del proceso, dado que se logró una disminución considerable en la variabilidad del porcentaje de encogimiento, así como una mayor precisión y acercamiento al valor de especificación. Por otro lado, al operar a las condiciones encontradas, se eliminan tiempos muertos, no sólo en el proceso de inyección, sino durante el proceso de ensamble del zapato. Finalmente, también se disminuyen los costos de producción al no tener que repetir operaciones de proceso y lograr una reducción significativa de material a reciclar.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la empresa y personal involucrado la fabricación de calzado, por las facilidades, apoyo y disposición para llevar a cabo el presente estudio.

## REFERENCIAS

- [1]. Mares-Castro A. Optimización en manufactura mediante la experimentación y modelos de regresión logística. IDT [Internet]. 31jul.2020 [citado 20 enero.2023];16(2):109-1. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/2839>
- [2]. De Oliveira M, Lima VM, Yamashita SM, Santos AP, Portella AC. Experimental Planning Factorial: A brief Review. International Journal of Advanced, 2018; 166-177. Disponible en:

<https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.5.6.28>

[3]. Hicks CR, Kenneth V, Turner JrK. Fundamental Concepts in the Design of Experiments. 5ta. Ed. Oxford University Press, Inc: New York 1999.

[4]. Tanco M, Ilzarbe L, Viles E, Álvarez MJ. Aplicación de Diseño de Experimentos (DoE) para la mejora de procesos. Memorias Universidad de Montevideo. España Año 6, 85-94. 2008. Disponible en: <http://www.revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/265>

[5]. Montgomery CD. Diseño y análisis de experimentos. 2da ed. Limusa Wiley: Arizona 2011.

[6]. Box GE, Stuart HJ, Hunter WG. Estadística para investigadores, diseño, innovación y descubrimiento. 2da. Edición. Reverte: Barcelona 2008.

[7]. Deming WE. Calidad, Productividad y Competitividad. La salida de la Crisis. Diaz de Santos: Madrid 1989. Disponible en: [Calidad, productividad y competitividad: la salida de la](#)

[crisis - William Edwards Deming, Jesús Nicolau Medina - Google Libros](#)

[8]. Cuthbert D. Applications of statistics to industrial experimentation. John Wiley & Sons: New York 1976. Disponible en: [Applications of Statistics to Industrial Experimentation - Cuthbert Daniel - Google Libros](#)

[9]. Escalante-Vazquez EJ. Diseño y Análisis de Experimentos. Limusa: México 2014. Disponible en: <https://libreria-limusa.com/producto/disenyo-y-analisis-de-experimentos/>

[10]. Agranoff J. Modern Plastic Encyclopedia. Vol 53. Mc. Graw Hill: New York 1994.

[11]. Minitab statistical software. Pennsylvanian, United Estate of American: Minitab; versión 18.

[12]. Montgomery CD. Control estadístico de calidad. Limusa: México 2003. Disponible en: <https://doku.pub/documents/control-estadistico-de-la-calidad-douglas-c-montgomery-3ra-edicionpdf-z06ojymm7x0x>