



CIATEC

CONTRACCIÓN EN MUESTRAS DE POLIPROPILENO
CON FIBRAS DE CEBADA MEDIANTE LA APLICACIÓN
DE LAS TÉCNICAS DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS
TAGUCHI Y ALGORITMO R3

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

Maestro en Ciencia y
Tecnología
en la Especialidad de
Ingeniería Industrial y de
Manufactura

PRESENTA

Jaime Navarrete Damián

Comité tutorial

Dr. Roberto Zitzumbo Guzmán

Dr. Armando Javier Ríos Lira

Dr. José Francisco Louvier Hernández



CIENCIA Y TECNOLOGIA

León, Guanajuato, México Noviembre de 2012

AGRADECIMIENTOS.

Mi agradecimiento al CONACYT por el apoyo recibido como becario, al CIATEC, A. C. por las facilidades otorgadas y por la formación recibida.

Mi agradecimiento a los siguientes investigadores:

Al Dr. Roberto Zitzumbo Guzmán, por sus valiosos y sabios consejos y por la acertada dirección de mi investigación.

Al Dr. Armando Javier Ríos Lira por su disposición y valiosa asesoría técnica en experimentación secuencial.

Al Dr. José Francisco Louvier Hernández por sus consejos, asesoría y la invitación a colaborar en varias investigaciones aplicadas.

Al Dr. Francisco Javier Ornelas Rodríguez por las facilidades otorgadas y por su valioso apoyo en las técnicas aplicadas de medición láser.

Al Dr. Sergio Alonso Romero por el importante apoyo y asesoría técnica en la redacción de publicaciones.

Al Dr. Jorge Domínguez Domínguez por el gran interés y apoyo brindado en el desarrollo de diseño de experimentos.

A todos los investigadores, académicos y al personal administrativo del CIATEC, que me han compartido su sabiduría y por el impulso en mi desarrollo profesional.

Mi sincero agradecimiento

A Yadira, mi esposa por ser siempre mi cómplice y por su apoyo en momentos difíciles. A mis hijos, Elizabeth y Diego por ser mi alegría y por su comprensión del tiempo que dejé de pasar con ellos. A Moisés Navarrete Lomelí por que es el mejor padre que puede haber. A mis hermanos Moisés y Alejandro.

A la memoria de Irene Damián Zavala, mi madre, QEPD.

TÍTULO

Contracción en muestras de polipropileno con fibras de cebada mediante la aplicación de las técnicas de diseño de experimentos Taguchi y Algoritmo R3

RESUMEN

La contracción tridimensional de piezas de polipropileno reforzado con fibras naturales de cebada fue estudiada mediante los métodos de diseño de experimentos (DOE) Taguchi y la técnica de aumentación secuencial Algoritmo R3. Las unidades experimentales fueron preparadas bajo diferentes condiciones del proceso de moldeo por inyección variando los cuatro factores de control: velocidad de inyección, temperatura de plastificación, presión de sostenimiento, tiempo de sostenimiento así como los dos factores de ruido: contenido de fibras y temperatura ambiente. La contracción de las muestras fue medida con un nuevo método propuesto, utilizando un escáner laser 3D. La técnica de análisis de imágenes fue utilizada para determinar la contracción volumétrica de las muestras estudiadas. La mínima contracción de las piezas es el objetivo de calidad. Se encontró que al utilizar el método de medición propuesto se puede obtener precisión aceptable para estudiar la contracción en piezas con geometría compleja. Fueron determinadas las condiciones óptimas tanto para minimizar la contracción como para robustecer el proceso al ruido mediante la técnica de Taguchi y un análisis de varianza (ANOVA). Se generó un modelo del proceso en el que se desacoplaron las interacciones de Control por Ruido mediante la técnica de aumentación secuencial Algoritmo R3. Se encontró que los factores de proceso que son más significativos en la contracción de las muestras son Tiempo de Remanencia y Presión Remanente y que el contenido de fibras puede reducir la contracción de las piezas. La técnica de experimentación secuencial Algoritmo R3 requirió menos corridas experimentales que la de Taguchi.

TABLA DE CONTENIDO

TÍTULO	4
RESUMEN	4
TABLA DE CONTENIDO	5
INDICE DE TABLAS	7
INDICE DE FIGURAS	8
INDICE DE ANEXOS	10
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	11
Antecedentes	11
Definición del problema	12
Justificación	13
Objetivos	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
Hipótesis	15
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	16
Calidad en moldeo por inyección	16
El método Taguchi	17
Estudios sobre la contracción de piezas moldeadas por inyección.	18
Métodos utilizados para medir la contracción en piezas inyectadas de polipropileno.	20
Composites poliméricos	22
Composites de polipropileno en estudios de contracción	22
Métodos de DOE alternos a Taguchi que consideran efectos de interacción.	23
Diseño Robusto de Parámetros (RPD)	23
Experimentación secuencial	23
Algoritmo R3 y Diseño Paramétrico Robusto	24
CAPÍTULO 3 MÉTODO O PROCEDIMIENTO	26
Pruebas Preliminares	26
Pruebas preliminares para moler fibras	26
Prueba preliminar de manejo de la máquina inyectora de plásticos	29
Pruebas preliminares de Resistencia a la Tensión.	31

Prueba preliminar de medición dimensional con técnica de análisis láser de imágenes.	32
Análisis preliminar de fibras por el método análisis de termogravimetría (TGA).....	36
Análisis del tamaño de fibra por el método de microscopía óptica.	39
Experimentación principal.	42
Desarrollo del material polimérico compuesto: polipropileno reforzado con fibras naturales (composite).	43
Procesamiento en el molino giratorio de cuchillas.	46
Diseños de experimentos.	46
Medición de la contracción.	50
Experimentos aumentados utilizando el algoritmo R3	55
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	56
Resultados para la experimentación por el Método Taguchi	56
Resultados de la experimentación por el método Algoritmo R3	63
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
Bibliografía	80
ANEXOS	84
Anexo 1 Hoja técnica del material utilizado en la investigación.	84
Anexo 2 Imágenes escaneadas con sus mediciones	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Mediciones obtenidas en la prueba preliminar de escaneo y análisis de imágenes.....	35
Tabla 2 Perfil de temperaturas utilizado en el compondeo mediante extrusor de doble husillo	44
Tabla 3 Factores de control y ruido estudiados, con las unidades y los dos niveles de cada uno....	47
Tabla 4 Método de codificación de las muestras experimentales.....	49
Tabla 5 Resultados de las 32 mediciones obtenidas para el diseño del método Taguchi	56
Tabla 6 Resultados del análisis Taguchi, las dos columnas de la derecha presentan la razón S/N y la media.....	58
Tabla 7 Tabla de respuesta para medias obtenida del análisis en el método Taguchi	59
Tabla 8 ANOVA para el método Taguchi	61
Tabla 9 Coeficientes del modelo lineal para el método Taguchi	61
Tabla 10 Pronóstico del modelo obtenido con el método Taguchi	63
Tabla 11 ANOVA del diseño factorial fraccionado inicial para la experimentación de la técnica Algoritmo R3	64
Tabla 12 Factores, unidades y niveles considerados en el desarrollo experimental del método Algoritmo R3	66
Tabla 13 Fracción 2_{III}^{6-3} con cadenas significativas [A], [B] y [E] y su estructura alias	67
Tabla 14 Nombrando las columnas de los factores significativos E y B	67
Tabla 15 Adición de corridas para desacoplar 2, 3 y 4 columnas (Misra, 2006)	68
Tabla 16 Definición inicial de las dos primeras corridas de aumentación al aplicar la técnica Algoritmo R3	69
Tabla 17 Asignación de signos a la matriz de diseño	69
Tabla 18 Asignación completa de los signos para las dos primeras corridas.....	70
Tabla 19 Se muestran las dos primeras corridas de aumentación con los resultados de contracción obtenidos	70
Tabla 20 Matrices de correlación obtenidas con las dos aumentaciones iniciales.....	71
Tabla 21 Nombrando las columnas de los factores significativos B y E	71
Tabla 22 Resultados de asignación de signos y mediciones de contracción para las corridas de aumentación 3 y 4.....	72
Tabla 23 Matrices de correlación obtenidas con las aumentaciones 3 y 4.....	72
Tabla 24 Análisis de regresión del modelo con 4 corridas aumentadas que muestra correlaciones altas de CE y BD.....	73
Tabla 25 Resultados de asignación de signos y mediciones de contracción para las aumentaciones 5 y 6	74
Tabla 26 Análisis de regresión después de 6 corridas aumentadas que muestra que ya no hay altas correlaciones	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Paja de cebada	26
Figura 2 Molinos de cuchillas industrial (izquierda) y de laboratorio (derecha).	27
Figura 3 Fibras molidas, a la izquierda con el molino Pagani, a la derecha con ambos molinos.	27
Figura 4 Molino de martillos conectado al tractor y su mecanismo interno	28
Figura 5 Molino de bolas girando y las bolas	28
Figura 6 Vibrador con tamiz y fibras después de ser molidas y tamizadas	29
Figura 7 Montaje del molde en la inyectora (izq.) y torno CNC con la pieza para adaptación (der.)	30
Figura 8 Piezas de polietileno inyectadas en pruebas preliminares.	30
Figura 9 Pieza inyectada que presenta problemas de hundimientos.	31
Figura 10 Probeta de polipropileno en el ensayo de tensión	31
Figura 11 Curva de esfuerzo-deformación de la probeta de polipropileno.....	32
Figura 12 Dispositivo escáner láser.	33
Figura 13 Preparación de la superficie de las piezas con solución de sulfato de bario.	34
Figura 14 Escaneo láser del molde de inyección.....	34
Figura 15 Piezas procesadas con escáner laser y su volumen obtenido mediante análisis de imágenes; molde de inyección (a) y un polímero “γ” (b).....	35
Figura 16 Gráfica TGA de fibras de cebada, rampa de 10°C / min.....	37
Figura 17 Gráfica TGA de fibras de cebada, isoterma a 175° C por 30 minutos	37
Figura 18 Gráfica TGA de fibras de cebada, isoterma a 200° C por 30 minutos	38
Figura 19 Gráfica TGA de fibras de cebada, isoterma a 250° C por 40 minutos	38
Figura 20 Microscopio óptico (izq.) y resinas acrílicas usadas en la generación muestras para microscopía (der.)	39
Figura 21 Imágenes del proceso para el desarrollo de obleas de resina con fibras para observar al microscopio	40
Figura 22 Imágenes de fibras al microscopio. A y B muestran medidas de longitud y anchura, C y D muestran diámetro	41
Figura 23 Pieza utilizada para el desarrollo de pruebas experimentales.....	42
Figura 24 Ejemplo de dos mediciones lineales en sección transversal ‘a través del flujo’ con variación.....	42
Figura 25 Esquema del método de desarrollo de los experimentos, la medición y el análisis.....	43
Figura 26 Pesaje de componentes para el composite (izq.) y componentes mezclados físicamente (der.).....	44
Figura 27 Equipo de extrusión y proceso de desarrollo del composite	45
Figura 28 Molino de cuchillas giratorias para procesar los trozos extruidos de composite (izq.); material molido y cribado (der.)	46
Figura 29 Diseño Taguchi con arreglos cruzados utilizado en la experimentación.	48
Figura 30 Diseño factorial fraccionado inicial para la técnica Algoritmo R3; se muestra ya aleatorizado.....	48
Figura 31 Codificación de probetas durante las corridas experimentales. Sin fibras (izq.) y con fibras (der.).....	49

Figura 32 Muestras experimentales sometidas a shock térmico (izq.) y mantenidas en refrigeración (der.).....	50
Figura 33 Pieza de polipropileno con fibras sometida al estudio de su contracción	51
Figura 34 Escáner laser 3D marca ZScanner modelo 800 utilizado en la experimentación.....	52
Figura 35 Aplicación de sulfato de bario en las piezas que serán escaneadas	52
Figura 36 Proceso de escaneo laser de la pieza colocada sobre una superficie patrón con puntos de referencia.	53
Figura 37 Pieza escaneada con ruido (a), limpia de ruido (b) y el cálculo de su volumen (c).....	54
Figura 38 Introducción de datos en el software Minitab para su análisis	57
Figura 39 Efectos principales de los factores de control en la respuesta contracción media.	59
Figura 40 Efectos principales de los factores de control en la relación S/N.	60
Figura 41 Verificación de supuestos del modelo para normalidad, varianza constante e independencia.....	62
Figura 42 Introducción de datos en el software Design Expert para su análisis.....	63
Figura 43 Verificación de supuestos del modelo para normalidad, varianza constante e independencia.....	65
Figura 44 Determinación de los factores significativos mediante gráfica de Pareto.....	66

INDICE DE ANEXOS

Anexo I Hoja técnica del material utilizado en la investigación.....	84
Anexo II Imágenes escaneadas con sus mediciones.....	85

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Las propiedades de calidad y las de desempeño de un producto terminado son siempre una secuencia de eventos. Los procesos de manufactura de plásticos inician con la elección del material en las etapas iniciales del diseño de la pieza. El procesamiento es la etapa siguiente, en la cual el material no sólo es formado, sino que las propiedades que controlan el desempeño de uso final del producto son establecidas y quedan fijadas.

Durante el diseño y manufactura de cualquier producto plástico se debe tener especial atención en el material, el procesamiento y las propiedades de desempeño de la pieza. Este enfoque es frecuentemente referido como el de las cinco P's: polímero, procesamiento, producto, desempeño (la p proviene del inglés performance), y post consumo (el tiempo de vida post consumo del producto plástico). (Tim & Hernández-Ortiz, 2006). El presente estudio se enfoca en especial en la segunda P, en el procesamiento, se basa en la optimización de los parámetros de proceso que afectan la contracción dimensional de las piezas mediante la aplicación de técnicas de Diseño de Experimentos (DOE); el polímero utilizado fue polipropileno (PP) comercial, reforzado con fibras naturales y un agente de acoplamiento.

El moldeo por inyección es el más importante proceso usado para la manufactura de productos de plástico. En la actualidad más de una tercera parte de todos los termoplásticos son moldeados por inyección y más de la mitad de todos los equipos de procesamiento de polímeros son para el moldeo por inyección. El proceso de moldeo por inyección es ideal para la manufactura de piezas de producción en masa de formas complejas que requieren dimensiones precisas (Tim & Hernández-Ortiz, 2006).

En las industrias donde se trabaja el moldeo por inyección de plásticos es frecuente hacer pruebas con la intención de resolver problemas de calidad que se presentan en los productos, como hacer algunos cambios en las condiciones de operación del proceso en las máquinas inyectoras hasta encontrar las que den un resultado aceptable. Es común que estas pruebas se hagan sobre la marcha, con base en el ensayo y error, dependiendo de la experiencia e intuición, en lugar de seguir un plan experimental adecuado que garantice una buena respuesta al problema.

El diseño estadístico de experimentos es precisamente la forma más eficaz de hacer pruebas, y consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder a las interrogantes planteadas (Gutiérrez P & De la Vara S, 2008).

En el presente estudio se busca conocer el efecto que tienen diversos factores, tanto de control como de ruido, así como sus interacciones en la variable de respuesta contracción tridimensional de la pieza. Los cuatro factores bajo control que se estudiarán son velocidad de inyección, presión de sostenimiento, tiempo de sostenimiento y temperatura de plastificación, mientras que los dos factores de ruido a considerar en el estudio son el contenido de fibras y temperatura ambiente.

La revisión de literatura que se expone el marco teórico expone en extenso, muestra que las investigaciones realizadas en general han medido la contracción de forma lineal, es decir, en una dimensión. Durante el desarrollo de la presente investigación se genera la propuesta de realizar las mediciones de una forma alterna, utilizando un escáner laser 3D y la técnica de análisis de imágenes para obtener mediciones volumétricas de la pieza, lo cual no se había realizado hasta la fecha y presenta la ventaja de permitir estimaciones más adecuadas de la contracción en partes con geometrías complejas.

Se han realizado diversos estudios relacionados con diseño de experimentos aplicados al moldeo por inyección de plásticos, la mayoría usan la metodología de diseño robusto de Taguchi. En la sección de marco teórico se presentan análisis de algunos estudios previos.

Recientemente se han desarrollado técnicas avanzadas de diseño de experimentos en ambientes robustos de parámetros, como la aumentación secuencial de la técnica R3 (Ríos, 2009), que se desarrollaron como ciencia básica, sin haberse aplicado en procesos industriales hasta la realización de la presente investigación. Lo anterior abre la posibilidad de estudiar su aplicación en un proceso industrial, lo que constituye una técnica de vanguardia de la que se busca investigar su aplicabilidad en este estudio.

La empresa Reciclados Industriales es una microempresa ubicada en Valle de Santiago, Guanajuato en donde se producen trompos, juguetes elaborados con plástico, que son procesados mediante moldeo por inyección. En la actualidad, en su búsqueda de competitividad y mejoras tecnológicas, se hace presente la necesidad de mejorar sus procesos para elevar la calidad de sus productos; en los procesos de manufactura se les presenta el problema de contracción de piezas inyectadas, a partir de la necesidad de minimizarlo surge la idea del presente proyecto de investigación; sin embargo, su aplicación es extensible a procesos donde se obtienen piezas de plástico moldeadas por inyección en general, y en especial en partes que se utilizan para ensamblajes posteriores con otras piezas.

Definición del problema

En años recientes, los procesos de moldeo por inyección han enfrentado requerimientos de calidad cada vez mayores; en la búsqueda de competitividad las empresas se ven obligadas a producir piezas con más altos estándares de calidad y menores costos, sin

embargo persisten algunos problemas sin resolver que desconciertan con el éxito deseado de los procesos de moldeo por inyección.

Un problema común en el proceso de moldeo por inyección de plásticos es la contracción dimensional que sufre la pieza una vez desmoldada, conforme disminuye su temperatura hasta alcanzar la temperatura ambiental. Esta característica de calidad es de especial cuidado cuando se producen piezas que serán componentes para ensamblarse con otras partes, o bien cuando el producto requiere de la fabricación de piezas con alta precisión dimensional.

Debido a la presencia de este problema en la industria del plástico y a la necesidad de minimizarlo es que se inicia esta investigación.

En el presente estudio se busca conocer el efecto que tienen en el proceso de inyección diversos factores, tanto de control como de ruido, así como sus interacciones en la variable de respuesta contracción dimensional de la pieza. Al conocer el efecto que producen, se generará un modelo que represente el comportamiento de la variable de respuesta en relación a los parámetros de proceso bajo estudio.

Justificación

Considerando que el objeto de estudio del presente proyecto es el proceso, se tiene la conveniencia principal de aplicar ciencia básica, en cuanto al algoritmo R3, para solucionar en la práctica un problema importante que afecta al proceso de manufactura de moldeo por inyección en la industria del plástico. El desarrollo de la aplicación podrá generalizarse a otras aplicaciones en procesos similares.

Se pueden lograr mejoras en la forma de resolver la problemática de manera más eficiente al reducir el número de corridas con el uso de la técnica secuencial R3 de DOE en ambiente robusto que se empleará, en comparación con el método Taguchi, que por lo general se emplea. Lo anterior implicaría ahorros de dinero y recursos en general, en caso de resultar certeras las suposiciones de mayor eficiencia del método R3.

Es notable, asimismo la relevancia social y ecológica de la formulación y uso en el estudio de material ambientalmente amigable, como lo son en general los polímeros compuestos reforzados con fibras naturales y en especial de la paja de cebada, por ser un residuo agrícola de abundante disponibilidad en la región del bajío que puede ser aprovechado.

Objetivos

Objetivo general

Optimizar el proceso de moldeo por inyección de una pieza de polipropileno reforzado con fibras en cuanto a la contracción dimensional mediante la aplicación de las técnicas Taguchi y Algoritmo R3 de diseño de experimentos (DOE) para mejorar la calidad del producto.

Objetivos específicos

- Aplicar investigación básica del Algoritmo R3 realizada sobre DOE en ambientes robustos para contrastar el número de corridas necesarias con las que se obtienen con el método de diseño robusto Taguchi.
- Formular PP reforzado con fibras naturales para determinar sus propiedades y generar las unidades experimentales.
- Correr los experimentos determinados mediante la aplicación de las metodologías Taguchi y Algoritmo R3 para comprobar la capacidad de ésta última técnica de separar interacciones de interés.
- Inyectar las piezas para medir el porcentaje de contracción que presentan.
- Determinar los niveles de los factores estudiados que minimizan la contracción para optimizar el proceso mediante la técnica Taguchi.

Hipótesis

Como ya se mencionó anteriormente, se estudiarán los factores que influyen en la contracción de piezas de plástico reforzado con fibras naturales que han sido moldeadas por el proceso de inyección. Para lo que se plantean las hipótesis de la investigación, que consisten en demostrar los supuestos siguientes:

- Es posible optimizar el proceso de moldeo por inyección de piezas de polipropileno mediante la aplicación de dos técnicas de diseño de experimentos: método de diseño robusto Taguchi y la experimentación secuencial de la técnica Algoritmo R3 de Ríos (2009).
- Los algoritmos secuenciales (Ríos, 2009), serán capaces de ser aplicados en un ambiente robusto.
- El número de corridas experimentales de la técnica R3 será bajo comparado con la técnica de diseño robusto Taguchi, lo cual permitirá ahorros en dinero y recursos.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Calidad en moldeo por inyección.

El proceso de moldeo por inyección es no lineal, con múltiples variables de proceso y en él se da forma al material plástico, transformándolo en piezas útiles o en componentes comúnmente encontrados en una multitud de bienes de consumo. (Wang, et al., 2008).

La optimización de las condiciones involucradas en los procesos de moldeo por inyección es muy importante para los productos fabricados por esta técnica, pues afecta directamente las características de calidad y apariencia de los productos moldeados. El control de la calidad del producto mediante la optimización de las condiciones de procesamiento, no solo reducirá defectos en la apariencia del producto, sino que además minimiza imperfecciones en la pieza tales como la contracción (shrinkage), hundimientos por el estrés residual (sinkmarks by residual stress), torcido (twisting) o combado (warping). Mediante el ajuste de los parámetros de procesamiento, los productos moldeados por inyección pueden generalmente ser de mejor calidad en las operaciones de producción actuales. (Jeffrey Kuo, et al., 2007).

Hay muchos parámetros en el moldeo por inyección que están relacionados con la calidad del producto moldeado, tales como el nivel de temperatura de plastificación, temperatura del molde, presión de inyección, velocidad de inyección, velocidad de rotación del husillo, presión de sostenimiento y tiempo de sostenimiento, entre otros. Si los parámetros de procesamiento no son apropiadamente ajustados, se presentarán problemas como contracción y combado en el producto moldeado por inyección.

Con la finalidad de determinar los parámetros óptimos de procesamiento, los fabricantes generalmente desarrollan largas y complicadas series de experimentos para adquirir datos. Los ingenieros entonces deciden la posición apropiada de los parámetros basándose en su experiencia. Este ajuste de parámetros de proceso frecuentemente no involucra un análisis basado en teorías y puede requerir muchos experimentos innecesarios. (Jeffrey Kuo, et al., 2007)

El moldeo por inyección es un proceso de manufactura importante para los polímeros; éste provee productos con bajos tiempos de ciclo de manufactura, así como bajos costos. Sin embargo, muchos estudios han encontrado que los parámetros de procesamiento del moldeo por inyección tienen efectos cruciales en la calidad de los productos. Una correcta posición de las condiciones del moldeo por inyección es, por lo tanto un asunto de interés principal en la industria de los plásticos. (Lin, et al., 2008).

En la revisión de literatura realizada, se identificaron varios estudios en los que han estudiado los efectos de parámetros de procesamiento en la contracción de piezas,

aplicando diversos métodos y combinaciones para su análisis. Entre ellos se encuentran el diseño de experimentos (DOE) con análisis de varianza (ANOVA) (Chang & Faison III, 2001), (Fen Lui, 2011), (Prashanta, et al., 2009), (Shen, et al., 2007) y (Wang, et al., 2008); redes neuronales artificiales (ANN) (Mamat, et al., 1995), (Chung-Feng, et al., 2007) y (Kung & Weng, 2008); algoritmos genéticos (Shen, et al., 2007); análisis por elemento finito (Kabanemi, et al., 1998); métodos de proceso Gaussiano (Zhou & Turng, 2007) y simple comparación (Chavez, et al., 2010) y (Speranza, et al., 2007), entre otros.

En cuanto al DOE se pueden utilizar varios métodos para encontrar los factores de proceso más significativos y determinar las mejores condiciones de proceso; el DOE Taguchi es ampliamente utilizado en la industria para el diseño robusto; la robustez en diseño de experimentos consiste en hacer un producto o proceso insensible o resistente a factores de ruido que no son controlables. El diseño robusto con arreglos interno y externo consiste en probar todas las combinaciones de los factores de ruido en cada combinación de los factores de control (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

El método Taguchi.

El método Taguchi simplifica el DOE tradicional y se utiliza para estudiar la influencia que tienen múltiples factores (tanto controlables como de ruido) en la respuesta promedio y en su variación. El método Taguchi es eficiente y rápido para obtener resultados mediante unos pocos experimentos en comparación con las pruebas que se realizan en la industria de prueba y error. Diversos estudios han aplicado la técnica de Taguchi exitosamente en optimización de procesos de manufactura de plásticos (Chang & Faison III, 2001), (Liao, et al., 2004), (Prashanta, et al., 2009), (Shen, et al., 2007), (Wang, et al., 2008), (Altan, 2009) y (Fu-Chen & Yung-Jin, 2008), entre otros.

El método DOE de Taguchi utiliza Arreglos Ortogonales (OA) para el diseño del experimento y la razón Señal/Ruido (S/N) para el análisis de los datos obtenidos. Taguchi define tres diferentes formas de desviación de las medias cuadráticas (MSD) con el estadístico razón S/N, dependiendo del objetivo: Valor-nominal-es-mejor, Mientras-más-grande-mejor y Mientras-más-pequeña-mejor.

La razón S/N es considerada como valor característico de desempeño de cada corrida experimental (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008). Se busca maximizar el valor de la razón S/N para obtener las condiciones de operación más robustas. Las ecuaciones de los tres tipos de razón S/R (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008) se presentan a continuación:

Valor-nominal-es-mejor

Ecuación 1

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right)$$

Mientras-mas-grande-mejor

Ecuación 2

$$S/N = - 10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

Mientras-mas-pequeña-mejor

Ecuación 3

$$S/N = - 10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

Donde y_i es el valor de respuesta de un tratamiento específico i , n es el número de réplicas, \bar{y} es el promedio de todas las y_i , y S es la desviación estándar de todas las y_i . (Deng, et al., 2008)

Estudios sobre la contracción de piezas moldeadas por inyección.

Investigadores de Malasia, (Mizamzul & Kamaruddin, 2011) aplicaron en su estudio el método de Taguchi para optimizar los parámetros del proceso de inyección de polipropileno reciclado post-industrial en dos etapas, en la primera usaron un arreglo ortogonal (OA) de Taguchi L18 para identificar los parámetros de proceso significativos. Una vez identificados los parámetros significativos (temperatura de fusión A, presión de sostenimiento B, tiempo de inyección C y tiempo de sostenimiento D), generaron un nuevo arreglo ortogonal Taguchi L9 para optimizar las propiedades mecánicas del material, estudiando en 3 niveles el esfuerzo de fluencia (SY) y el módulo de flexión (FM). Sus resultados de optimización fueron, para los parámetros en el orden mencionado, FM: A1 220°C, B1 70%, C2 0.6s, D3 30s y para SY: A3 260°C, B3 85%, C3 1.0s, D2 20s. Finalmente realizaron una prueba experimental final de comprobación de valores esperados contra valores de corrida experimental, obteniendo 2.6% de error para FM y 4.7% de error para SY.

En otro estudio, autores Chinos (Zhang & Jiang, 2007) investigaron las condiciones óptimas de proceso para una pieza inyectada de polipropileno comercial cristalino, buscando optimizar la contracción volumétrica y las marcas de hundimiento, con la innovación de que no aplicaron solamente un perfil de presión de sostenimiento constante, como se hace en la mayoría de los estudios revisados en la literatura, sino que

aplicaron tres perfiles de presión de sostenimiento distintos: uno constante, uno creciente y otro decreciente.

El experimento lo desarrollaron en dos etapas: en la primera aplicaron un diseño factorial fraccionado para identificar aquellos parámetros de proceso significativos, así como algunas de sus interacciones. En la segunda etapa aplicaron el método experimental de Taguchi con un OA L27 para optimizar los parámetros de control del proceso en tres niveles: temperatura del molde (A), temperatura de fusión (B), perfil de sostenimiento (C) y cambio velocidad-presión (E); se usó la característica de calidad “entre más pequeño mejor”, y con las razones señal-ruido (S/N ratios) obtuvieron como resultados de orden de influencia para contracción volumétrica (shrinkage) los siguientes: B1 250°C > C1 perfil constante > A1 30°C > E3 98% y para hundimientos B1 250°C > A1 30°C > C3 perfil creciente > E3 98%.

Por su parte autores franceses y belgas, (Prashantha, et al., 2009) estudiaron la contracción dimensional con dos parámetros lineales (longitudinal y transversalmente respecto al flujo del material en el molde) en una pieza moldeada por inyección, con dos materiales: polipropileno puro y polipropileno reforzado con 2% en peso de nanotubos de carbón (MWNT). Utilizaron un arreglo ortogonal (OA) L16 para cada material, al aplicar el diseño experimental con la técnica de Taguchi, con un diseño factorial fraccionado en dos niveles cada uno de los 4 factores: Velocidad de Inyección (Q), Presión de Sostenimiento (hP), Presión Posterior (bP), y velocidad de rotación del Husillo (Ω). El resto de los parámetros se mantuvieron constantes. Para la estabilización del material se realizaron las mediciones una semana después del moldeo bajo condiciones controladas de Humedad Relativa (50%) y de Temperatura (23°C). Adicionalmente se relajaron los esfuerzos residuales en el material de las piezas inyectadas con un tratamiento térmico de 120°C durante 5 horas.

La contracción dimensional se midió con la diferencia relativa entre las dimensiones de la pieza y las dimensiones del molde, expresada como porcentaje de cambio en la fórmula:

Ecuación 4

$$S = 100 \frac{L_m - L_p}{L_m},$$

Donde S es la contracción dimensional, Lm es la longitud del molde y Lp es la longitud de la pieza. Los resultados que obtuvieron les permiten afirmar que la contracción dimensional se ve reducida en piezas que son liberadas de los esfuerzos residuales en el material inyectado; encontraron que el refuerzo con nanotubos de carbón reduce notablemente la contracción dimensional; finalmente determinaron que la contracción dimensional es entre 2 y 4 veces mayor en dirección transversal al flujo en comparación con la dirección a lo largo del flujo.

Por su parte, un investigador de Turquía (Altan, 2009), determinó las condiciones óptimas de moldeo por inyección para la mínima contracción dimensional mediante los métodos de diseño experimental de Taguchi y el análisis de varianza ANOVA. Posteriormente

aplicó la técnica de Redes Neuronales para predicción. Utilizó como materiales polipropileno y poliestireno inyectado en especímenes con figura rectangular. No utilizó factores de ruido, solamente 4 factores de control: Temperatura de Fusión (A), Presión de Inyección (B), Presión de Sostenimiento (C), y Tiempo de Sostenimiento (D). Las mediciones realizadas fueron únicamente en la longitud de la pieza inyectada, marcando 6 puntos en la pieza y midiendo su diferencia mediante calipers digitales con una precisión de 0.001 mm. Aplicó un arreglo ortogonal L27 con 3 niveles para cada factor. Como resultado obtuvo la combinación de parámetros de proceso óptimos como: A3 260°C, B2 60MPa, C3 50MPa, D3 15s.

El factor más significativo fue la presión de sostenimiento. Aporta la idea de que para la aplicación de redes neuronales se hace necesario después de la técnica de Taguchi, el análisis de ANOVA, para evaluar la significancia de los factores mediante el valor-P, con el cual descartó el factor B en la técnica de red neuronal. Se determinó el error de la predicción de contracción dimensional contra la obtenida experimentalmente, que para el PP fue de 8.6 %.

En otra investigación, (Kung & Weng, 2008) obtuvieron la combinación de parámetros de procesamiento para producir piezas de polipropileno homopolímero optimizando dos características a la vez: contracción dimensional y resistencia a la tensión. Aplicaron el método de Taguchi, realizaron el análisis ANOVA y utilizaron el Análisis Relacional Gris (Gray Relational Analysis). Usaron un arreglo ortogonal (OA) L18, no determinaron factores de ruido, sólo de control. Uno de los factores lo manejaron en dos niveles y los restantes 7 los manejaron en tres niveles. Los factores evaluados fueron: Temperatura del Molde (A), Cantidad de Preplastificación (B), Presión de Inyección (C), Velocidad de Inyección (D), Velocidad de Husillo (E), Presión de Sostenimiento (F), Tiempo de Sostenimiento (G), Tiempo de Enfriamiento (H). Realizaron cinco repeticiones de cada corrida.

La medición dimensional la efectuaron midiendo (sólo longitudinalmente), el tamaño de la impresión del molde, aunque no especifican la forma de la pieza, por lo que sólo realizaron una medición dimensional longitudinal. Los resultados para contracción dimensional fueron: A2 215°C, B3 10cm, C3 500bar, D3 30cm/s, E3 30m/min, F2 300bar, G1 2s, H3 7s. Al verificar significancia con el ANOVA, encontraron con importancia o significativos sólo 4 factores: Presión de sostenimiento, Cantidad de preplastificación, Tiempo de sostenimiento y Temperatura del molde.

Métodos utilizados para medir la contracción en piezas inyectadas de polipropileno.

En la literatura se han realizado diversas investigaciones relacionadas con la contracción de piezas moldeadas mediante la técnica de inyección de plásticos. Sin embargo, los métodos empleados para medir la contracción de las piezas moldeadas arrojan datos en

una sola dimensión (en milímetros lineales), a diferencia del presente estudio donde se obtienen mediciones de contracción en milímetros cúbicos, es decir, volumétricas. En los estudios realizados se miden secciones lineales entre dos puntos, que pueden ser longitudinales o transversales en la pieza, y su diferencia permite obtener el grado de contracción en una o ambas direcciones.

Algunos estudios aplican técnicas de medición con la limitante que solo pueden ser utilizadas en piezas con geometría simple. En cuanto a métodos de medición, los grupos de Chang y Speranza (Chang & Faison III, 2001), (Speranza, et al., 2007), midieron la contracción y deformación del plástico en una dimensión longitudinal y transversalmente con relación al flujo, utilizando cálipers digitales para medir piezas con formas rectangulares; ambos determinaron los factores de proceso más significativos.

Más recientemente el grupo de Fen Lui, (Fen Lui, 2011) estudió la contracción en una pieza con forma de caja midiendo a lo largo y a lo ancho de la pieza utilizando cáliper digital; encontraron la Presión y Tiempo de Remanencia como los principales factores.

Por su parte, Mamat y colaboradores (Mamat, et al., 1995) realizaron mediciones de contracción en una dimensión a través de la distancia que hay entre puntos previamente establecidos en una pieza rectangular utilizando un proyector de perfiles; concluyen que la Presión Remanente y el Tiempo de Remanencia fueron los factores más significativos. Por otro lado, Chávez y colaboradores (Chavez, et al., 2010) realizaron evaluaciones cualitativas de deformación de plástico en piezas rectangulares, mediante inspección visual a través de una escala cualitativa que indica el nivel de intensidad del defecto; encontrando los parámetros de proceso que lo afectan.

Otros investigadores (Prashanta, et al., 2009), (Shen, et al., 2007), (Wang, et al., 2008), (Liu & Manzione, 1996) y (Chung-Feng, et al., 2007) estudiaron la contracción midiendo longitud en una dimensión entre dos puntos con una máquina de medición de coordenadas como instrumento de medición.

Recientemente Mustafa y colaboradores (Mustafa Kurt, 2010) estudiaron la contracción de piezas circulares con geometría compleja utilizando para las mediciones un escáner óptico 3D y aplicaron la técnica de análisis de imágenes para obtener mediciones lineales en los ejes X-Y, así como en la redondez de las piezas; determinaron la Presión Remanente como el factor más importante.

Por su parte, Kabanemi y colaboradores (Kabanemi, et al., 1998) investigaron la contracción y deformación en una pieza con forma de caja, mediante un escáner láser 3D y utilizando la técnica de análisis de imágenes obtuvieron imágenes tridimensionales. Sin embargo las mediciones fueron determinadas en una dimensión a lo largo y ancho de la pieza.

Por otro lado, Liao y colaboradores (Liao & Hsieh, 2004), (Liao, et al., 2004) utilizaron escáner láser 3D y software para realizar mediciones en una dimensión de la contracción y deformación de una cubierta de celular en las direcciones X, Y y Z, obteniendo las condiciones óptimas de proceso.

Del análisis bibliográfico anterior se observa que, independientemente del instrumento de medición, la contracción en piezas de plástico ha sido medida en una sola dimensión en los ejes X-Y principalmente y en el eje Z ocasionalmente. Sin embargo, la contracción es un fenómeno que ocurre en tres dimensiones.

Composites poliméricos.

En la revisión literaria realizada, se han encontrado diversas investigaciones en las que se formulan materiales poliméricos compuestos que se refuerzan con fibras naturales, como (Panthapulakkal & Sain, 2007) quienes usando polietileno de alta densidad (HDPE) lo reforzaron con paja de trigo, tallo de maíz y olote. En otro estudio (Thamae, et al., 2008) desarrollaron compuestos usando polietilenos de alta y baja densidad (HDPE, LDPE) reforzados con tallo de maíz, tallo de maíz sin relleno, semilla de lino y fibras de agave americana. Por su parte (Cinelli, et al., 2006) reforzaron polivinilo de alcohol (PVA) con fibra de maíz. En otro estudio (Yin, et al., 2008) usaron LDPE con almidón de maíz. Finalmente (Georgopoulos, et al., 2005) reforzaron LDPE y policloruro de vinilo (PVC) plastisol con madera de eucalipto.

En los cinco estudios mencionados previamente, se reforzó una matriz polimérica con fibras naturales en diversos tamaños y concentraciones, encontrando que las propiedades mecánicas de los materiales reforzados en la mayoría de los casos se mejoraron. En cuanto a la optimización de procesamiento no reportan resultados, ya que estos autores no consideraron características de calidad como la contracción de los plásticos en sus estudios, debiéndose quizás a que la contracción es importante en artículos finales y no en probetas de investigación.

Composites de polipropileno en estudios de contracción.

Algunos estudios (Prashanta, et al., 2009) y (Mamat, et al., 1995) relacionados con la medición de contracción en piezas de plástico han utilizado composites de polipropileno. Prashanta y colaboradores (Prashanta, et al., 2009) midieron la contracción unidimensional a lo largo y a través del flujo de material en composites de polipropileno/nanotubos de carbono multipared, encontrando que la adición del 2 % de nanotubos en el composite reduce significativamente la contracción. Por otro lado, Mamat y Colaboradores (Mamat, et al., 1995) estudiaron la contracción de composites de polipropileno/carbonato de calcio, encontrando que el CaCO_3 reduce la contracción anisotrópica y que la presión remanente y el tiempo de remanencia fueron los factores más significativos en su estudio.

Métodos de DOE alternos a Taguchi que consideran efectos de interacción.

Como lo menciona (Ríos, et al., 2009) en varios estudios se han encontrado problemas con la estrategia experimental de Taguchi, entre ellos Myers y Montgomery (2002), mencionaron que muchos de los diseños sugeridos por Taguchi son saturados o casi saturados, además no permiten al experimentador estimar los efectos de las interacciones de control \times control. Box (1988), sostiene que los métodos estadísticos de diseño y análisis recomendados por Taguchi son innecesariamente ineficientes y complicados, y por lo tanto, deberían ser remplazados por alternativas más simples y eficientes.

Diseño Robusto de Parámetros (RPD).

Un producto robusto es aquel que trabaja como se pretende sin importar la variación en el proceso de manufactura, variación resultado de la deterioración y variación en el uso del producto. El diseño robusto de parámetros o diseño paramétrico robusto (Robust Parameter Design, RPD) es un principio que enfatiza la apropiada selección de niveles de factores de control " x_i " en un sistema, para hacer al producto robusto a la variabilidad introducida por un segundo grupo de factores llamados factores de ruido " z_i ". El sistema puede ser un proceso o un producto. (Ríos, et al., 2009).

Experimentación secuencial.

Ríos, et. al., 2009 desarrollo un algoritmo de aumentación secuencial para diseños factoriales fraccionados de resolución III, el cual es capaz de desacoplar términos específicos y mantener altos niveles de ortogonalidad, y balance así como eficiencia, el método es comparado con las técnicas de aumentación generales foldover y semifold.

Los métodos de aumentación secuencial para diseños robustos son raros en la literatura. La mayoría de los trabajos en diseño robusto de parámetros (RPD) han sido enfocados en la construcción del diseño, pero no en la aumentación (Ríos, et al., 2009). En el estudio citado, Ríos (2009) provee una metodología para aumentación secuencial de diseños robustos de resolución mixta, con la cual da una guía para maximizar el desacoplamiento de interacciones de control \times ruido. En este trabajo se combina el enfoque de experimentación secuencial desarrollado inicialmente para diseños de resolución III con los diseños de resolución mixta en un intento de crear experimentos robustos más eficientes.

Las dos investigaciones arriba citadas se desarrollaron como ciencia básica, sin haberse aplicado en procesos industriales hasta el momento. Lo anterior abre la posibilidad de

estudiar su aplicación en un proceso industrial. En la presente investigación se investiga la aplicabilidad del algoritmo R3 en el diseño paramétrico robusto del proceso de moldeo por inyección como técnica adicional al método de Taguchi.

Las interacciones de control x ruido son importantes debido a que ellas determinan la naturaleza de la no homogeneidad de la varianza del proceso que caracteriza al problema de diseño paramétrico robusto. Un tipo importante de diseños de arreglos combinados es el diseño de resolución mixta. El diseño de resolución mixta es una fracción que es construida haciendo una apropiada selección de los generadores, de tal forma que la resolución mas alta sea asignada a las interacciones de control x ruido y a las de control x control, mientras que la resolución mas baja es asignada a las interacciones de ruido x ruido (Ríos, et al., 2009).

Misra (2006) desarrolló un enfoque de experimentación secuencial para fracciones de resolución IV que es más eficiente que un semifold. El estudio de Misra mostró que la adición pequeños grupos de corridas (2 cada vez) a un diseño de resolución IV tiene el potencial para desacoplar cadenas de alias específicas para interacciones de dos factores. Uno de los productos más importantes de esta investigación es el algoritmo R4, que es una manera estructurada de adicionar corridas a una fracción inicial basada en las cadenas de alias significantes de interés. Las cadenas son adicionadas secuencialmente y son diseñadas no solo para desacoplar términos alias, sino también para mantener tanto balance y ortogonalidad como sea posible.

Después de cada aumentación se realiza un análisis en el que las cadenas de alias son identificadas y priorizadas y el procedimiento es repetido hasta que el modelo verdadero es identificado. El algoritmo de Misra fue adaptado para satisfacer los requerimientos particulares de una fracción de resolución III, Ríos (2009) desarrolló una segunda versión del algoritmo R4 y lo llamó “algoritmo R3”; este algoritmo es capaz de desacoplar términos específicos en fracciones de resolución III usando un conjunto relativamente pequeño de corridas adicionales mientras se mantienen buenos niveles de balance y ortogonalidad en el diseño combinado.

Algoritmo R3 y Diseño Paramétrico Robusto.

Ríos, et, al., 2009, propuso un método de aumento para diseños de resolución mixta, la idea fundamental era crear un diseño de resolución mixta altamente fraccionado al que se le pudiera posteriormente aplicar el algoritmo R3 con el objeto de desacoplar las interacciones de control x ruido. El diseño de resolución mixta altamente fraccionado surge como una necesidad de tratar de reducir el tamaño de los diseños de resolución mista propuestos por Lucas y Borkowsky (1997).

El diseño de resolución mixta altamente fraccionado, tomando como ejemplo la fracción 2^{6-3} , involucró una búsqueda exhaustiva de generadores considerando cada posible número z de factores presentes en el diseño $1 \leq z \leq k - 1$. La construcción de diseños de resolución mixta para esa fracción implicó comparación visual y evaluación de diferentes

estructuras de alias creadas por elecciones diferentes de generadores y la selección del diseño que asigna mayor resolución a las interacciones de control x ruido y a las de control x control, así como menor resolución a las interacciones de ruido x ruido....la búsqueda se extendió a todas las combinaciones posibles de factores de control y de ruido para las fracciones del diseño 2^{6-3} . Un método de penalización fue diseñado por el Dr. Ríos para evaluar las estructuras alias: cuando una interacción de control x ruido es alias con efectos principales se le asigna un valor de 3; cuando una interacción de control x control es alias con efectos principales se le asigna un valor de 2 y si una interacción de ruido x ruido es alias con otras interacciones el valor de 1 se asigna. El método funciona de una manera tal que la estructura alias con el más bajo valor de penalización es aquella que tiende a asignar resolución III a las interacciones de ruido x ruido y resolución IV a otras interacciones. La investigación del Dr. Ríos demostró que de todas las combinaciones posibles de generadores, ninguna pudo crear diseños de resolución mixta, solo aproximaciones.

En vista de la dificultad para crear diseños de resolución mixta altamente fraccionados se pensó en simplemente correr una fracción de resolución III que incluyera tanto a los factores de control como a los de ruido y aplicar directamente el algoritmo R3 para desacoplar las interacciones de control x ruido y control x control. De esta manera se prescindirá de la resolución mixta con el objeto de reducir el número de corridas pero se lograr el desacoplamiento de las interacciones importante mediante el Algoritmo R3.

CAPÍTULO 3 MÉTODO O PROCEDIMIENTO

Pruebas Preliminares

Se realizaron algunas pruebas de pre-experimentación, con las que se buscó identificar, prever y resolver los problemas y dificultades que pudieran presentarse en la experimentación definitiva. Trabajando de esta manera, se tienen identificados con mayor claridad y de manera anticipada al experimento principal, la previsión de los recursos y la solución de problemas. A continuación se exponen las pruebas preliminares realizadas.

Pruebas preliminares para moler fibras.

En el presente estudio se busca aprovechar un desecho agrícola abundante y local de la región bajo, al cual se le pudiera dar un valor agregado al utilizarlo como refuerzo en una matriz polimérica. El residuo seleccionado para el desarrollo de la investigación fue la paja de cebada, cuyo nombre científico es *Hordeum distichon* L./ *Hordeum hexastichon* L (ver figura 1). Debido a la temporalidad de los cultivos de cebada maltera en la zona bajo, se consideró importante conseguir residuo agrícola de tallo de cebada maltera (paja) durante el ciclo de cosecha marzo-mayo 2011, pues de no ser así se corría el riesgo de retrasar en gran medida el desarrollo de la investigación, o bien, tener que usar un residuo diferente; se obtuvieron en donación tres pacas de paja de cebada para la investigación.

En total se realizaron tres pruebas pre-experimentales en diferentes tipos de molinos para moler las fibras, con la finalidad de resolver problemas que pudieran presentarse al efectuar la experimentación principal. El objetivo de hacer diversas pruebas es identificar el tipo de molino o el proceso que permita moler de una forma más uniforme las fibras y obtener el menor tamaño de fibra para su mejor inserción en la matriz polimérica.



Figura 1 Paja de cebada

Primera prueba: molinos de cuchillas giratorias en dos fases. La primera prueba se realizó en el CIATEC, con un proceso de molienda en dos etapas, primero se molieron las fibras en un molino de cuchillas Marca PAGANI, Modelo 1620 FA, Serie 1620 FA-10-3829, 5HP, 380 rpm, 220 V del laboratorio de polímeros; en la segunda etapa, las fibras fueron procesadas en un segundo molino de laboratorio Marca Thomas Wiley, laboratory Mill, Modelo 4, Serie 1507000511 del laboratorio de análisis químicos, el cual tiene una malla más cerrada. Ambos se muestran en la figura 2.



Figura 2 Molinos de cuchillas industrial (izquierda) y de laboratorio (derecha).



Figura 3 Fibras molidas, a la izquierda con el molino Pagani, a la derecha con ambos molinos.

Como resultado final de la primera prueba se obtuvieron fibras molidas de un tamaño entre 1 y 2 mm de longitud que se muestran en la figura 3. Al moler las fibras, se genera una mezcla de fibras cortas con poco polvo fino, posiblemente el polvo sea producto del centro del tallo, aunque es una cantidad despreciable. Con este método se tiene el inconveniente de que el molino de la segunda etapa es de baja capacidad, por lo que el volumen de fibras que puede procesar por unidad de tiempo es pequeño.

Segunda prueba: Molino agrícola de martillos. La segunda prueba para moler fibras se realizó en un molino agrícola de martillos. Se desconocen las especificaciones del molino, pues no detentaba ninguna información; tiene un sistema de conexión mecánica mediante flecha cardán para unirse a un tractor agrícola, de donde toma la energía del movimiento rotacional para procesar las fibras (figura 4). El sistema es muy potente y rápido al ser alimentado con el tractor, es capaz de moler una paca completa de fibras en 5 minutos, aproximadamente.



Figura 4 Molino de martillos conectado al tractor y su mecanismo interno

La molienda se efectuó en dos ciclos iguales de molienda (dos pasadas en el molino); del primer ciclo se obtienen fibras con mucha variación en su longitud, aproximadamente de 5 a 10 mm de longitud, al efectuarse el segundo ciclo en iguales circunstancias, se obtiene un tamaño de fibra de 3 a 6 mm de longitud. Se observa que si se muele al aire libre se genera gran pérdida de material, que se volatiliza por el bajo peso de las fibras pequeñas en combinación con la rapidez y potencia del molino.

Tercera prueba: Molino de bolas y tamizado. La tercera prueba preliminar para moler fibras se realizó en un molino de bolas del Departamento de Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Celaya; las especificaciones son Marca WEDAG BOCHUM, Modelo Baujahr 1968, Serie Auftrag Nr. 997/3004/3932 que se observa en la figura 5.



Figura 5 Molino de bolas girando y las bolas

Se procedió a moler las fibras durante un tiempo de 45 minutos con todas las bolas. A continuación se extrajeron las fibras y se tamizaron con un vibrador y tamiz con malla de

0.46 mm, con lo que se obtuvo un resultado que se considera aceptable, por su uniformidad con fibras en un tamaño menor a 0.5 milímetros, ver figura 6. Después de un análisis de los tres métodos, se decide que para la experimentación principal se utilizará este molino en combinación con la malla más cerrada disponible (la que se utilizará en la experimentación principal es de 0.32 mm). Adicionalmente se analizó la morfología de las fibras mediante microscopía.



Figura 6 Vibrador con tamiz y fibras después de ser molidas y tamizadas

Prueba preliminar de manejo de la máquina inyectora de plásticos.

Las pruebas preliminares para manejo e inyección de piezas se realizan con la finalidad de familiarizarse con la operación de la máquina inyectora, y de resolver anticipadamente problemas que podrían presentarse en la experimentación principal. La máquina se encuentra en el Laboratorio de Manufactura del Departamento de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Celaya (ITC).

La máquina inyectora tiene las principales especificaciones técnicas: Marca DEMAG (Alemania), Modelo Ergotech Viva 50-270, Número de Serie 7843-0351, Año de fabricación 2001, Fuerza de cierre 500 kN, Fuerza de enclavamiento 500 kN, Carrera máxima de apertura 400 mm, Altura mínima de molde 210 mm, Altura máxima de molde 610 mm, Platos portamoldes 540x540 mm, Distancia útil entre columnas 355x355 mm, Carrera del expulsor 125 mm, Fuerza del expulsor 41.2 kN, Fuerza de retroceso del expulsor 14.9 kN, Diámetro de husillo 35 mm, Presión de inyección 1890 bar, Volumen desplazado 144.3 ccm, Peso de pieza inyectada (PS) 128 g, Carrera máxima de dosificación 150 mm, Carrera máxima de boquilla 250 mm.

Con la realización de las pruebas, se manejan los parámetros de operación de la máquina con equipo periférico Schiller; por experiencia previa de inyección se conoce de manera empírica el efecto de los parámetros de proceso en la calidad de las piezas, se tiene capacidad de montar y desmontar moldes para cambios de modelo, y se ha trabajado con diversos materiales tanto para “commodities” como materiales de ingeniería, con y sin secado previo.

Las piezas inyectadas en la primera prueba preliminar, corresponden a una pieza de geometría complicada, el molde es propiedad del Departamento de Ingeniería Industrial

del ITC. Es una pieza interna de un electrodoméstico comercial discontinuado (Picalica Moulinex) que tuvo la función de una tapa interna de engranes bañados en grasa. Con esta pieza se realizó la medición dimensional preliminar mediante la técnica de análisis láser de imágenes.

Se realizó una segunda prueba preliminar para manejo de la inyectora. El molde utilizado es propiedad del CIATEC, y tiene dos cavidades para moldear probetas por inyección. Se realizó el cambio de herramienta, fueron necesarias diversas adaptaciones debido a que la altura del molde por montar es menor a la altura mínima de molde de especificación de la máquina de inyección. Se tuvieron que maquinar en torno unos aumentos estables y una guía para centrar la boquilla de la unidad de inyección con el bebedero del molde, como se muestra en la figura 7.



Figura 7 Montaje del molde en la inyectora (izq.) y torno CNC con la pieza para adaptación (der.)

Se obtuvo experiencia con el segundo molde, ya que al inyectar piezas sólidas de cierto espesor, se deben modificar los niveles en los parámetros de proceso de la máquina, para lograr piezas con calidad aceptable, como se muestran en la figura 8. El problema principal que se presentó fue la contracción dimensional en forma de hundimientos o rechupes, y se solucionó aumentando considerablemente la presión de sostenimiento (hasta 220 bar), así como el tiempo de sostenimiento.



Figura 8 Piezas de polietileno inyectadas en pruebas preliminares.

En la figura 9 que se observa una probeta de sección transversal circular con hundimientos ocasionados por haber sido procesada con falta de presión de sostenimiento y tiempo de sostenimiento.



Figura 9 Pieza inyectada que presenta problemas de hundimientos.

Se realizó la inyección de varios materiales, para adquirir experiencia en el manejo de los parámetros de procesamiento con el cambio de materiales: PP, PP reciclado, HDPE, HDPE reciclado, PS, PMMA, SAN y ABS. Algunos de ellos fueron secados previamente.

Pruebas preliminares de Resistencia a la Tensión.

Se realizaron pruebas preliminares de medición de resistencia a la tensión en la máquina universal marca INSTRON, modelo 1011 del Laboratorio de Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya, que se puede observar en la figura 10.



Figura 10 Probeta de polipropileno en el ensayo de tensión

La prueba se realizó con las especificaciones de la norma ASTM-D 638-03 (equivalente a ISO 527-1), a una velocidad de 5 mm/min. Se presenta a continuación la figura 11 que muestra la curva de esfuerzo-deformación obtenida. Se determinó el esfuerzo máximo de fluencia en 1276 N (tensile strength at yield).

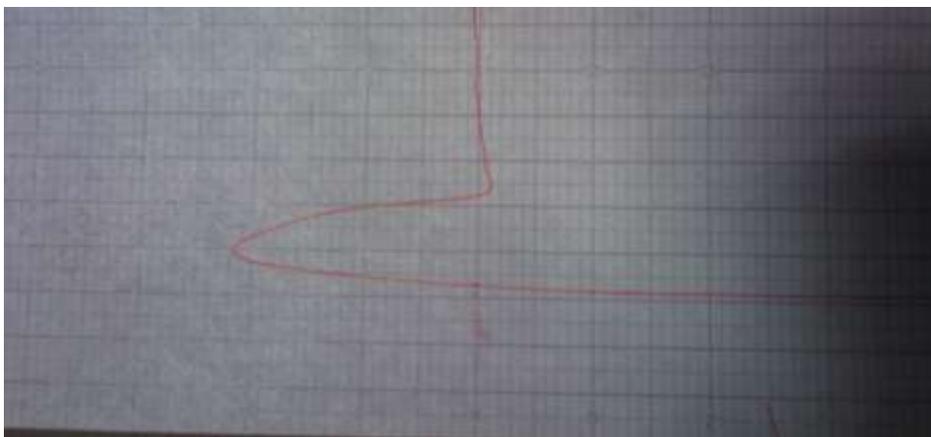


Figura 11 Curva de esfuerzo-deformación de la probeta de polipropileno

Prueba preliminar de medición dimensional con técnica de análisis láser de imágenes.

La prueba preliminar de medición dimensional, es importante en el presente estudio debido a que en todas las investigaciones de la literatura revisada, se realizan mediciones dimensionales en ejes longitudinales de las piezas, utilizando principalmente micrómetro, calíper y vernier de buena precisión, pero en muy pocas se han utilizado técnicas de óptica como el análisis de imágenes obtenidas con escáner láser; en ningún estudio de la literatura revisada se han obtenido mediciones volumétricas, los investigadores han realizado sólo mediciones lineales.

La contracción dimensional ocurre en todos los sentidos direccionales de la pieza, no sólo a lo largo de un eje, razón por la cual la medición volumétrica se considera más apropiada; al medir la contracción en milímetros cúbicos, la medición es análoga al fenómeno de contracción. El escaneo láser de imágenes permite dimensionar volumétricamente piezas con una alta precisión (40 micrones).

Los sistemas de escaneo laser están abriendo nuevas posibilidades de estudio para áreas y objetos difíciles (Axelsson, 1999). El desarrollo de tecnologías 3D está en excepcional crecimiento, y la investigación de su utilidad ofrece diferentes oportunidades; el escáner laser de manejo manual 3D Zscanner 800 trabaja con el software Zscan el cual genera superficies poligonizadas en archivos con formato STL (Stereolithography / Standard Triangulation Lenguaje) (Kaja & Vladimir, 2010). La medición de la contracción en este estudio se llevó a cabo utilizando un escáner 3D, que es un dispositivo que analiza un objeto para obtener datos de su forma. El dispositivo emite un rayo laser y mediante 3 cámaras analiza su reflexión bajo el principio de triangulación para determinar la forma del objeto.

El escáner mide el tiempo transcurrido desde que se envía el haz laser hasta que es captado de regreso, al ser reflejado desde la superficie del objeto escaneado. Con base en el conocimiento de la velocidad del laser es posible calcular la distancia del escáner al

objeto (Janda & Kuchyhkova, 2010). La información obtenida por el empleo de ésta técnica de medición puede ser utilizada para generar modelos digitales tridimensionales.



Figura 12 Dispositivo escáner láser.

El equipo y laboratorio donde se efectuó la prueba se encuentran en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) de la ciudad de Querétaro. Las especificaciones del equipo son:

Características del equipo ZScanner 800. El equipo se muestra en la figura 12, tiene aplicaciones en ingeniería inversa, diseño, manufactura, maquetas digitales, simulaciones e Inspección 3D. Velocidad de muestreo de 25,000 mediciones por segundo. Láser clase II (seguro para los ojos). Número de cámaras: 3. Precisión Volumétrica: 20 micras + 0,1 L / 1000. Precisión en XY hasta 40 micras (más de 0,0015 pulgadas). Resolución: 0.050 mm en XYZ (0,0019 plg. en XYZ). Profundidad de campo: 30 cm (12 pulgadas). (Janda & Kuchyhkova, 2010)

La prueba preliminar consistió en realizar el escaneo de la cavidad del molde de geometría compleja y de tres piezas inyectadas de diferentes materiales y mediante la técnica de análisis de imágenes, obtener sus volúmenes con la finalidad de contrastar las dimensiones de las piezas con la de la cavidad del molde. Con las diferencias de las mediciones se determina el porcentaje de contracción. El molde utilizado, como se mencionó previamente, es una cubierta interna de engranajes del electrodoméstico procesadora de alimentos de la marca comercial 'Picalica Moulinex' ya discontinuada.

Preparación de las piezas. En algunas superficies es necesaria una preparación previa, que consiste en esparcir en la superficie de la cavidad sulfato de bario disuelto en agua. La aplicación se realiza con un pincel común, como se muestra en la figura 13. Una vez seco el sulfato de bario, se colocan los puntos de referencia para el dispositivo, que son unos adhesivos circulares especiales de material reflejante con el contorno color negro mate. Se considera despreciable el espesor de la capa de sulfato de bario.



Figura 13 Preparación de la superficie de las piezas con solución de sulfato de bario.

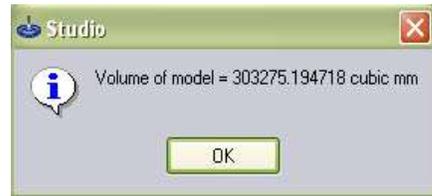
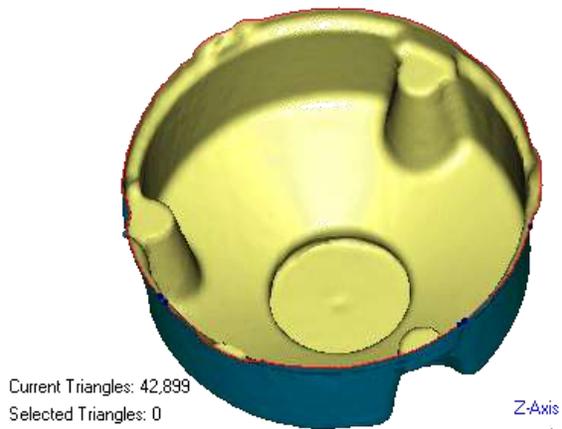
La prueba se realizó mediante un barrido de la cavidad o pieza a escanear con el rayo láser mediante el dispositivo de escaneo ZScanner 800, al tiempo que se genera el láser, se van realizando las lecturas con las tres cámaras del dispositivo y conectado con su interface, se alimentan los datos a la computadora, la cual, mediante el software del equipo genera el modelo tridimensional de la pieza (ver figura 14). El archivo generado es compatible con cualquier software de diseño asistido por computadora (CAD), por lo que pueden calcularse distancias entre puntos, superficies o volúmenes de la pieza.



Figura 14 Escaneo láser del molde de inyección.

En esta prueba preliminar se optó por generar datos de volumen sólido de la pieza (que en realidad es cóncava) mediante análisis de imágenes con la finalidad de aumentar la resolución de la técnica y apreciar más adecuadamente la contracción dimensional; en la experimentación principal la contracción se expresará como porcentaje de cambio de las dimensiones del molde con respecto a las dimensiones de la pieza. La simulación con análisis de imágenes permite obtener el volumen de la pieza en milímetros cúbicos. La figura 15 muestra 2 de las imágenes obtenidas del escaneo y sus mediciones. Los resultados de 4 mediciones preliminares se presentan en la tabla 1.

A) Modelo Metálico



B) Polímero 'y'

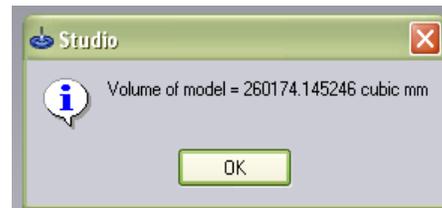
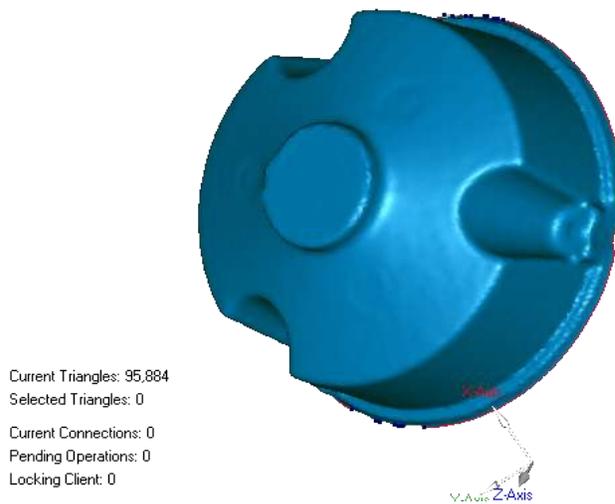


Figura 15 Piezas procesadas con escáner laser y su volumen obtenido mediante análisis de imágenes; molde de inyección (a) y un polímero "y" (b)

Pieza medida en prueba preliminar	Dimensión volumétrica (milímetros cúbicos)	Porcentaje de cambio respecto a la cavidad
Cavidad del molde metálico	303,275.194718	0.0 %
Polímero x	271,385.738843	10.515 %
Polímero y	260,174.145246	14.212 %
Polímero z	251,749.696022	16.989 %

Tabla 1 Mediciones obtenidas en la prueba preliminar de escaneo y análisis de imágenes

En la información de la tabla anterior, se puede apreciar claramente que debido a las propiedades (de contracción) de los distintos materiales que fueron inyectados y a las diferentes condiciones de procesamiento, se presentaron contracciones notablemente diferentes para cada pieza.

Análisis preliminar de fibras por el método análisis de termogravimetría (TGA).

Se consideró importante esta prueba preliminar para identificar la temperatura a la que se degradan las fibras de paja de cebada que se utilizarán como refuerzos en la matriz polimérica de polipropileno; la temperatura máxima constituye una limitante máxima para procesar el material compuesto que debe identificarse previamente a la realización de los experimentos principales.

Las pruebas preliminares realizadas con el equipo TGA fueron 4; en la primera se realizó una rampa desde la temperatura ambiente con incrementos de 10°C / min y se presenta en la figura 16; las pruebas dos a cuatro fueron isotermas a las siguientes temperaturas y tiempos: a 175°C durante 30 minutos; a 200°C durante 30 minutos y a 250°C durante 40 minutos.

Los resultados obtenidos en esta prueba preliminar arrojan información valiosa, con un análisis cuidadoso, podemos observar en la rampa, que la degradación importante (el inicio de la caída vertical de la curva) se encuentra un poco arriba de los 200°C. La primera caída que se observa hasta los 90°C aproximadamente, puede ser debida a la evaporación de la humedad presente en las fibras. La caída suave hasta antes de los 200°C, según se reporta en otros estudios citados en la sección de marco teórico, es debida a los componentes de la fibra que se degradan a baja temperatura, principalmente la lignina. Algunos de los componentes de interés para que la fibra tenga un desempeño positivo como refuerzo en una matriz polimérica y como mejorador de sus propiedades mecánicas es la celulosa y la hemicelulosa; se observa en la figura 16 que estos componentes inician su degradación importante aproximadamente a los 200 °C.

Las conclusiones anteriores condujeron a la realización de las isotermas para investigar los porcentajes de pérdida de peso debidos a la degradación térmica de las fibras (al mantenerlas a cierta temperatura cercana a la región que se asume como la temperatura de degradación), el interés es indagar qué tanto se degradan las fibras al mantenerse cierto tiempo a la temperatura de la isoterma. En la figura 17 se presenta la gráfica resultante de TGA isoterma a 175°C se observa que la fibra sufre poca degradación, pues en los 30 minutos que se mantuvo en el equipo TGA sólo se tuvo una pérdida total de aproximadamente un 5% en peso.

En la isoterma a 200°C que se muestra en la figura 18, se tuvo una pérdida total de peso que está entre 6 y 7 %, lo que nos permite corroborar el supuesto de que las fibras de

paja de cebada pueden procesarse, sin tener un porcentaje de degradación importante a 200 °C, generado cuando se analizó la rampa TGA; suponiendo que durante los procesamientos de extrusión e inyección la permanencia del material dentro del cilindro es de aproximadamente unos 10 minutos, y no los 30 minutos de la prueba realizada, (aunque puede variar dependiendo de la velocidad de procesamiento), se considera adecuada una temperatura que no rebase los 200 °C. En cuanto a la isoterma a 250 °C mostrada en la figura 19, se observa que a esa temperatura la degradación de las fibras si es importante, pues la pérdida en peso es de aproximadamente el 20%. Las anteriores observaciones pueden apreciarse en las gráficas que se muestran a continuación.

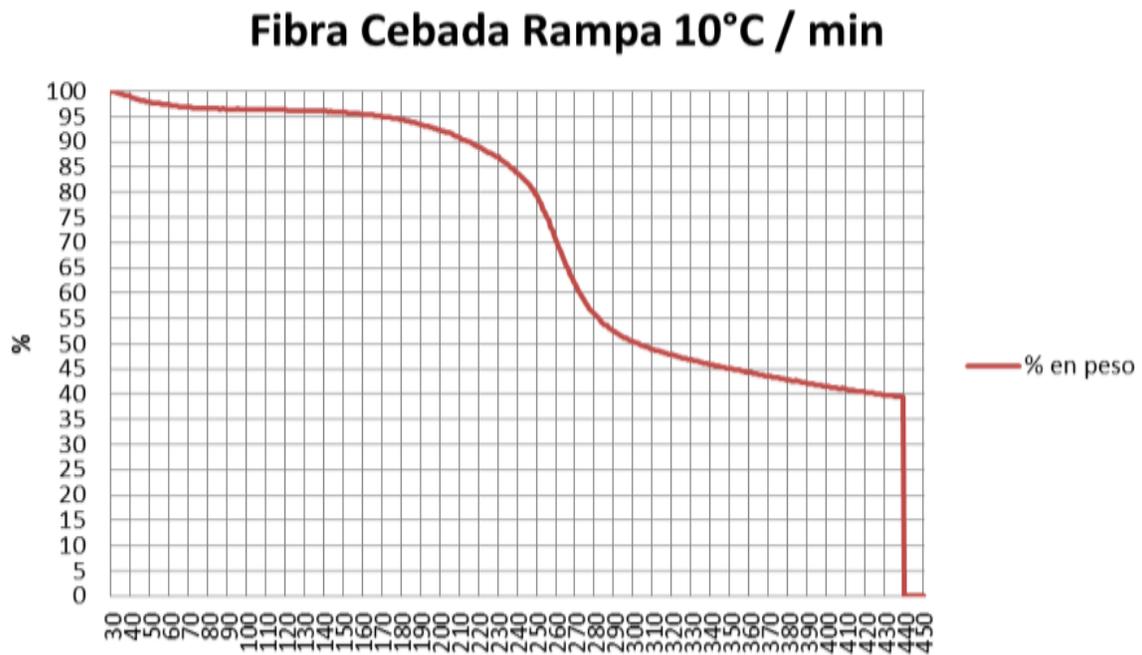


Figura 16 Gráfica TGA de fibras de cebada, rampa de 10°C / min.

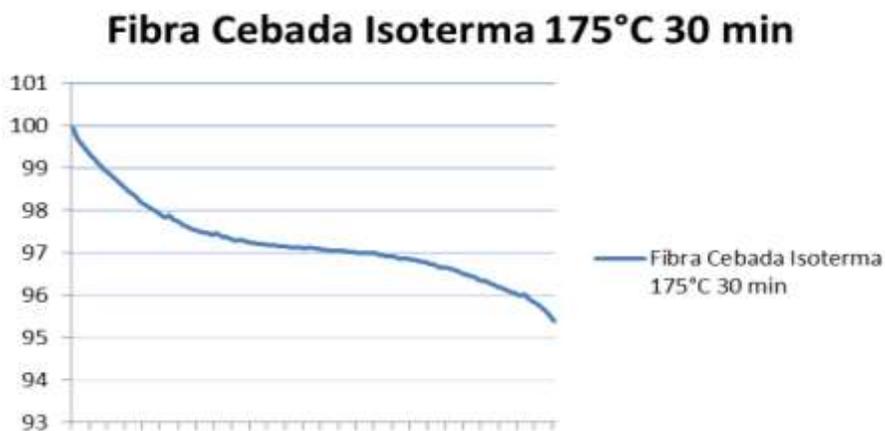


Figura 17 Gráfica TGA de fibras de cebada, isoterma a 175° C por 30 minutos

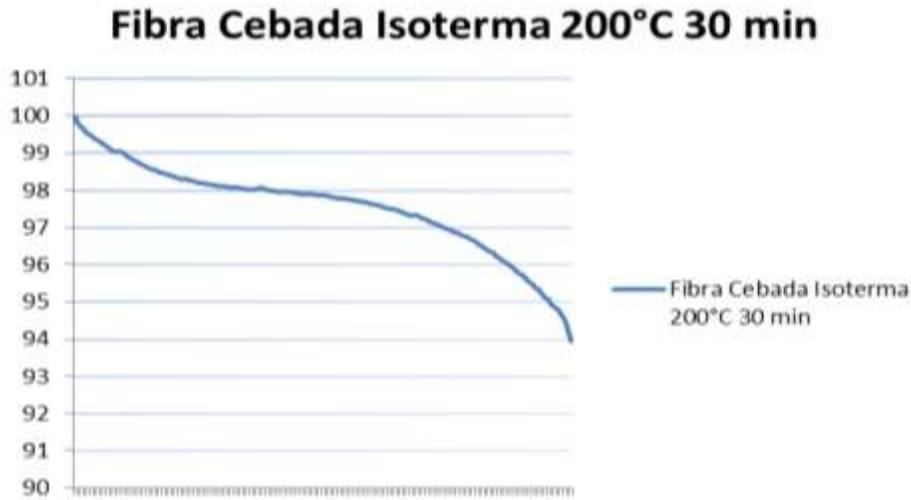


Figura 18 Gráfica TGA de fibras de cebada, isoterma a 200° C por 30 minutos

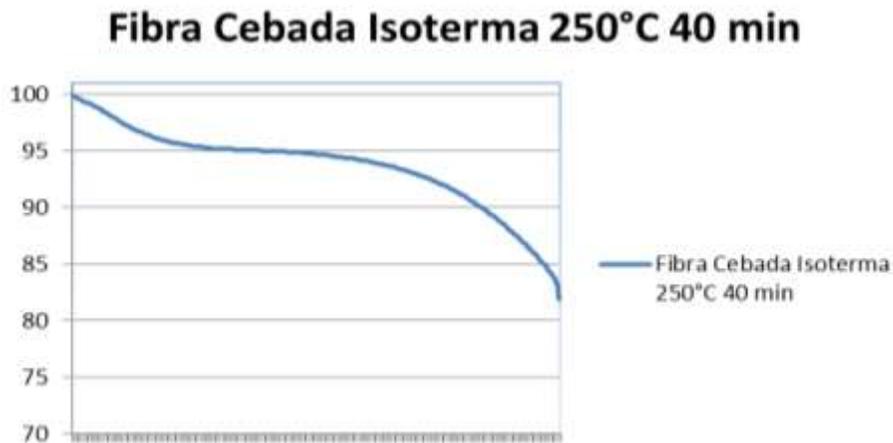


Figura 19 Gráfica TGA de fibras de cebada, isoterma a 250° C por 40 minutos

La importancia de los resultados de estas pruebas preliminares radica en que se identificó la temperatura máxima a la que debe procesarse el material en los procesos posteriores de la experimentación principal (extrusión y moldeo por inyección) a los que será sometido el polímero compuesto; se concluye de esta prueba preliminar que se puede procesar hasta 200°C el material reforzado con las fibras de paja de cebada. Con la finalidad manejar cierta holgura para evitar la degradación de la fibra, se determina la temperatura de procesamiento máxima de 195°C como adecuada.

La prueba se desarrolló en el CIATEC de León Guanajuato, con el equipo de TGA del área de Materiales.

Análisis del tamaño de fibra por el método de microscopía óptica.

La prueba preliminar de microscopía óptica es importante para identificar el diámetro promedio y la longitud promedio de las fibras de paja de cebada utilizadas como refuerzo en la matriz polimérica de polipropileno. Después de ser molidas y cribadas las fibras el material a simple vista es polvo, pero se desea saber el tamaño de fibra, para lo que es necesario utilizar la técnica de microscopía.

La prueba se desarrolló en el laboratorio de Metalurgia de CIATEQ Bernardo Quintana con un equipo de microscopía óptica y software Axion Vision Rel. 4.6 perteneciente al mismo centro de investigación ubicado en la ciudad de Querétaro, facilitado por el área de Metalurgia y que se muestra en la figura 20.



Figura 20 Microscopio óptico (izq.) y resinas acrílicas usadas en la generación muestras para microscopía (der.)

Se procedió a realizar dos pruebas diferentes. En la primera prueba, se colocaron muestras de la fibra de paja de cebada entre dos portaobjetos, con los aumentos necesarios (100X) se tomaron medidas de longitud y ancho de 30 fibras apoyados con el software citado. Se obtuvieron promedios y desviación estándar para la longitud.

En la segunda prueba, realizada con la finalidad de tener mejor perspectiva al medir el diámetro de las fibras, se mezclaron los reactivos para desarrollar una resina acrílica especial para el estudio en microscopía de fibras, en la que se embebieron las fibras, generando probetas con forma cilíndrica. A continuación se cortaron los cilindros en forma de obleas con un espesor de 2 a 3 milímetros. Posteriormente se pulieron con un equipo de discos abrasivos (ver figura 21). Las obleas conteniendo fibras cortadas se observaron al microscopio con 150X y con apoyo del software se realizaron los cálculos de diámetro de las fibras que se observaron en la superficie de la oblea.

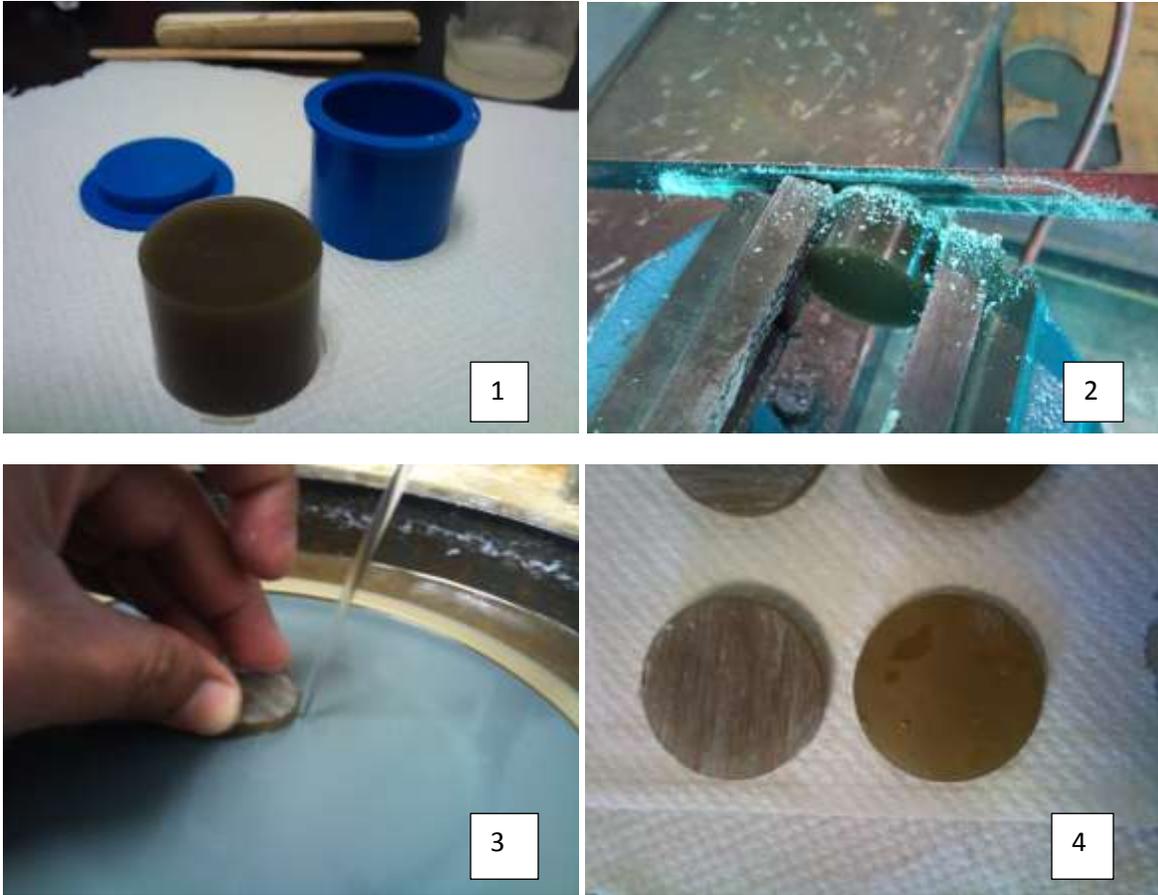
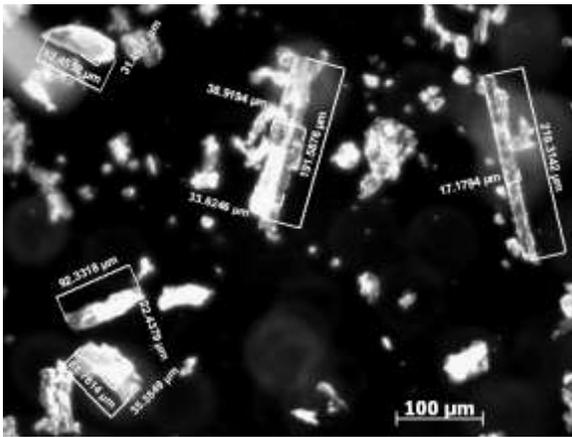


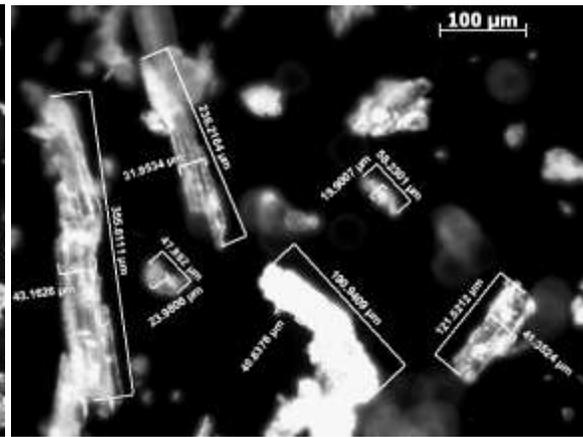
Figura 21 Imágenes del proceso para el desarrollo de obleas de resina con fibras para observar al microscopio

Los resultados obtenidos fueron diámetro promedio de las fibras de 23.79 micras, desviación estándar de 3.87 y longitud promedio de 176.14 micras desviación estándar de 65.69. Algunas imágenes de las obtenidas en el microscopio se muestran a continuación en la figura 22, las imágenes a y b corresponden a mediciones de longitud y anchura, mientras que las imágenes c y d corresponden a mediciones de diámetro (en obleas).

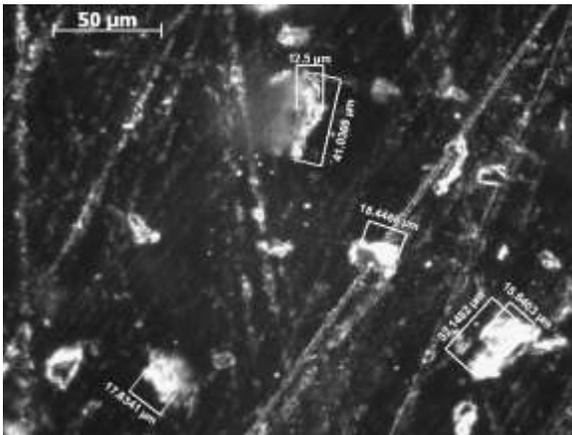
A



B



C



D

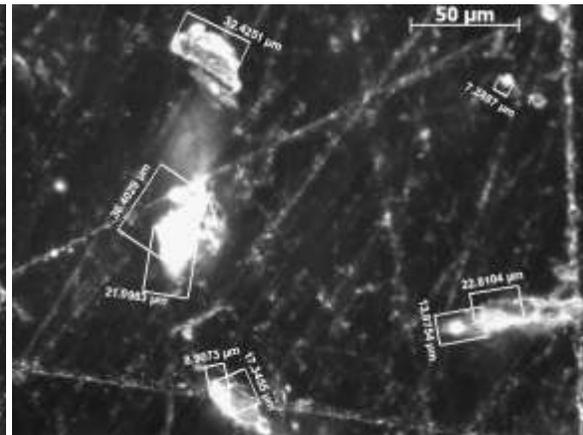


Figura 22 Imágenes de fibras al microscopio. A y B muestran medidas de longitud y anchura, C y D muestran diámetro

Experimentación principal.

Para la fabricación de muestras de plástico se utilizó una máquina de inyección marca DEMAG, modelo Ergotech Viva 50-270, con las características citadas en la sección previa y equipada con un molde metálico para moldear las piezas a las cuales se les midió su contracción.

La forma de las muestras estudiadas se observa en la figura 23, tienen una geometría con sección transversal circular. Las probetas para estudios de propiedades mecánicas de los polímeros pueden tener formas y dimensiones variadas. Esta pieza fue elegida en particular por su geometría. Múltiples estudios citados en la sección de marco teórico han investigado la contracción en piezas con geometrías simplificadas, por ejemplo rectangulares, y realizan mediciones lineales a lo largo y a través del flujo del material en la pieza.

La pieza con la sección transversal circular generaría problemas de variación si se utilizaran métodos de medición como los que tradicionalmente se aplican, por que al contraerse la pieza su sección transversal dejaría de ser circular, aproximándose mas a una sección ovalada, además al medir a través del flujo (en la sección transversal) se obtendrían lecturas con altas variaciones. Un ejemplo de 2 lecturas con variación se observa a simple vista en la figura 24.



Figura 23 Pieza utilizada para el desarrollo de pruebas experimentales

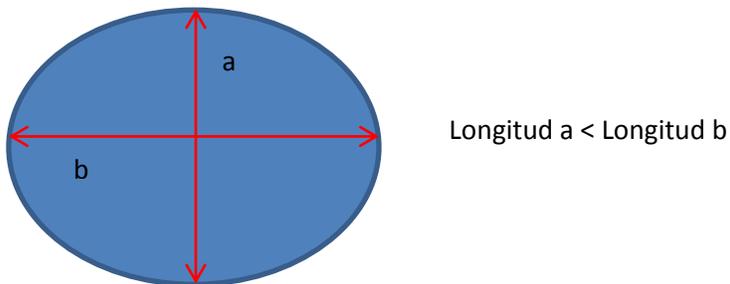


Figura 24 Ejemplo de dos mediciones lineales en sección transversal 'a través del flujo' con variación

El método seguido para el desarrollo de los experimentos se muestra en el esquema de la figura 25 a continuación.

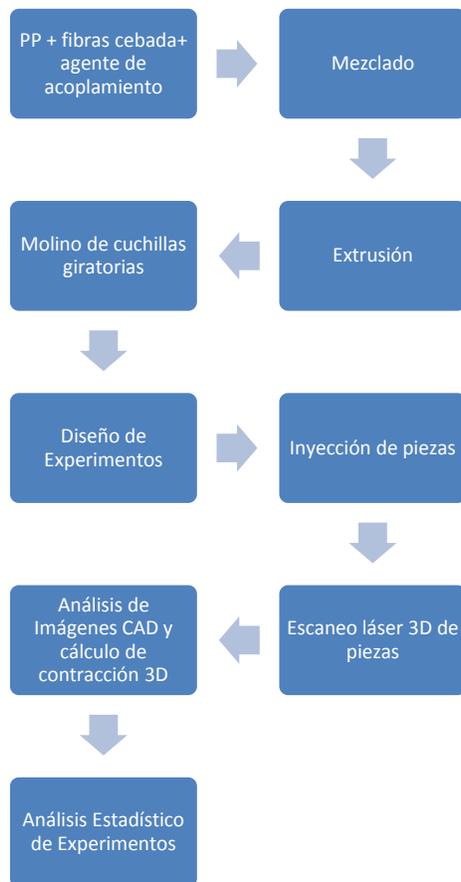


Figura 25 Esquema del método de desarrollo de los experimentos, la medición y el análisis

Los experimentos se desarrollaron con polipropileno homopolímero de la compañía INDELPRO PROFAX 6331 con un índice de fluidez (MFR), dg/min 12 (la hoja técnica del material se presenta en el anexo 1), el cual se consideró adecuado, después de realizar un análisis en el que se contempló que será reforzado con fibras y deberá procesarse tanto en extrusión de doble husillo (para el reforzamiento con fibras) como en moldeo por inyección (para la inyección de las probetas).

Para los experimentos se utilizaron dos materiales, polipropileno (PP) puro y polipropileno con fibras naturales de tallo de cebada pulverizada.

Desarrollo del material polimérico compuesto: polipropileno reforzado con fibras naturales (composite).

Para el desarrollo del composite se revisó literatura para determinar el agente de acoplamiento adecuado para utilizar y su porcentaje o concentración apropiada (Sombatsompop, et al., 2005). Es importante la utilización de agente de acoplamiento para lograr una buena interacción matriz-fibra, pues los agentes de acoplamiento son moléculas bipolares en las que uno de los polos es compatible con la matriz, en el caso particular de este estudio con el polipropileno homopolímero utilizado, mientras que el otro

polo del agente de acoplamiento es compatible con el refuerzo, en este caso con la fibra natural de cebada; si no se hubiera usado un compatibilizador como agente de acoplamiento se tendría una baja interacción superficial entre la matriz polimérica y la fibra, en parte ocasionado por que la fibra es hidrofílica y el polímero hidrofóbico. Se utilizó anhídrido maleico injertado con polipropileno (PP-MA) producido por Dupont como agente de acoplamiento.

El presente estudio no tiene como enfoque principal el desarrollo de materiales, por lo que no se experimentó, al menos en esta etapa, con diferentes concentraciones de fibra como refuerzo de la matriz polimérica para la evaluación de desempeño del composite con diferentes concentraciones, sino que sólo se desarrolló una sola concentración de composite para compararlo con material virgen sin refuerzo de fibras naturales.

La mezcla se desarrolló con el siguiente contenido:

- Matriz Polipropileno homopolímero 88 % en peso.
- Reforzante Fibra natural pulverizada de paja de cebada 10 % en peso.
- Agente de acoplamiento anhídrido maleico injertado con polipropileno (PP-MA) 2 % en peso.



Figura 26 Pesaje de componentes para el composite (izq.) y componentes mezclados físicamente (der.)

Una vez pesados los ingredientes se mezclaron físicamente en un contenedor que se agitó durante 10 minutos.

La mezcla de componentes para el compuesto se procesó en un extrusor de doble husillo con el perfil de temperaturas que se muestra en la tabla 2 (cuidando no rebasar la temperatura de degradación de 195 °C obtenida del análisis por termogravimetría):

Zona 8 de boquilla	Zona 7	Zona 6	Zona 5	Zona 4	Zona 3	Zona 2	Zona 1 de alimentación
175	174	175	171	169	168	165	162

Tabla 2 Perfil de temperaturas utilizado en el compondeo mediante extrusor de doble husillo



Figura 27 Equipo de extrusión y proceso de desarrollo del composite

La máquina de extrusión utilizada es un extrusor de husillos gemelos del laboratorio de polímeros del CIATEC A. C. con las características siguientes: marca: Leistritz, modelo/tipo: Micro-27 sistema extrusor de husillos gemelos y equipo auxiliar, rango de torque: 200 NM, Volumen libre: 10.3 cc/diam., rotación de husillos: co-rotacionales y contra-rotantes con modo de engranes, apto para proyectos de: compondeo/devolatilización de amplio rango de polímeros, reforzantes y aditivos tales como compondeo para compuestos de fibras de madera, capacidad de procesamiento: de 3 a 30+ kg/hr, dependiendo de la formulación y los objetivos de procesamiento. En la figura 27 se muestran imágenes del equipo y el desarrollo del composite.

Procesamiento en el molino giratorio de cuchillas.



Figura 28 Molino de cuchillas giratorias para procesar los trozos extruidos de composite (izq.); material molido y cribado (der.)

El material compuesto y extruido de polipropileno reforzado con fibras naturales de paja de cebada, se procesó a continuación en un molino giratorio de cuchillas con una criba de 3.5 mm para obtener el material listo para ser procesado en moldeo por inyección a fin de utilizarlo en la experimentación definitiva, ver figura 28. El molino utilizado es el citado previamente en la sección de experimentos preliminares.

Fue importante estimar previamente a la experimentación definitiva la cantidad del material compuesto, el cual se formula ex profeso para las pruebas; porque en caso de no contar con el suficiente material en la experimentación, tendrían que posponerse las corridas para volver a moler fibras, mezclar componentes, extrudir el composite, moler y cribar, lo que podría constituir un problema, en especial si se consideran las posibles fluctuaciones de lote a lote. El composite que se desarrolló fue inyectado y transformado en muestras para su medición.

Diseños de experimentos.

Se desarrollaron extensivas pruebas preliminares de inyección con material virgen para determinar los factores y niveles adecuados para la experimentación; además se tomaron en cuenta para definir los factores dos aspectos más: los estudios relacionados que fueron citados en la sección marco de referencia y la experiencia previa que se tiene en el proceso de inyección. Como resultado se determinaron para ambos métodos los cuatro factores de control estudiados: (A) Presión Remanente, (B) Tiempo de Remanencia, (C) Velocidad de Inyección, (D) Temperatura de Plastificación; los dos factores de ruido elegidos fueron (E) Contenido de Fibras y (F) Temperatura Ambiente. Para todos los factores se definieron dos niveles, que se muestran en la tabla 3. El resto de los parámetros de procesamiento se mantuvieron fijos.

FACTORES (unidades)	Nivel alto 1	Nivel bajo 2
A Presión remanente (BAR)	20	80
B Tiempo de remanencia (seg)	2	10
C Velocidad de Inyección (cm/seg)	40	60
D Temperatura de plastificación (°C)	180	195
E Contenido de fibras (% en peso)	0	10
F Temperatura ambiente (°C)	-2	25

Tabla 3 Factores de control y ruido estudiados, con las unidades y los dos niveles de cada uno

Es pertinente aclarar que los factores de presión remanente y tiempo de remanencia también son referidos en la literatura como presión y tiempo de post-presión, o de sostenimiento, y se refieren a la fase estática del proceso de inyección, en la que el volumen de material ya se introdujo en la cavidad del molde y la máquina le ejerce cierta cantidad de presión durante cierto tiempo.

Los primeros cuatro factores de la tabla 3 se consideraron como factores de control, mientras que los últimos dos factores se consideraron como factores de ruido, debido a que quedarían fuera del control en el proceso industrial, aunque para fines experimentales estas condiciones de ruido se controlaron; para el primer factor la temperatura ambiente en la que se trabaja es importante debido a que se desea estudiar o considerar los efectos del choque térmico que sufre la pieza al ser desmoldada y entrar repentinamente en contacto con temperatura fría; al considerarse que esta condición ambiental podría influir en el fenómeno de la contracción, se desea estudiar su efecto en condiciones extremas de frío, simulando en laboratorio una temperatura de -2 °C.

En cuanto al segundo factor de ruido, suponiendo que en un proceso industrial se utilizara material reciclado, no es controlable el hecho de que contenga o no contenga carga de fibras el material, puesto que no se tiene certeza plena de los refuerzos que tenía; un plástico reciclado no es un material virgen con hoja técnica de especificaciones, sino que su origen, en la mayoría de los casos de reciclaje, es desconocido.

Para generar el diseño experimental para la técnica de diseño robusto de Taguchi se utilizó el software MINITAB 16, aplicando un arreglo ortogonal (OA) L8 para los factores de control, y un arreglo ortogonal (OA) L4 para los factores de ruido, obteniendo el diseño cruzado que se muestra en la figura 29 con 32 experimentos en total; planeando 4 experimentos para cada combinación horizontal de los factores de control; el nivel bajo de los factores está representado por 1 y el nivel alto se representa con 2.

		Arreglo externo								Razón S/N	Media
		Factores de ruido	E	1	2	1	2				
			E	1	1	2	2				
		Factores de control									
		A	B	C	D						
Arreglo interno	1	1	1	1						S/N ₁	Y ₁
	1	1	2	2						S/N ₂	Y ₂
	1	2	1	2						S/N ₃	Y ₃
	1	2	2	1						S/N ₄	Y ₄
	2	1	1	2						S/N ₅	Y ₅
	2	1	2	1						S/N ₆	Y ₆
	2	2	1	1						S/N ₇	Y ₇
	2	2	2	2						S/N ₈	Y ₈

Figura 29 Diseño Taguchi con arreglos cruzados utilizado en la experimentación.

En cuanto al plan inicial de experimentación para la técnica de aumentación algoritmo R3, se comenzó con un diseño factorial fraccionado 2^{6-3} que se muestra a continuación en la figura 30 y que implica 8 experimentos; en este diseño el nivel alto está codificado como 1 y el nivel bajo se codifica como -1. No se consideraron repeticiones para ninguna de las dos técnicas, debido a que se desea estudiar la máxima eficiencia posible en cuanto al número de experimentos.

Select	Std	Run	Factor 1 A: Pres Reman	Factor 2 B: Tiempo Rema	Factor 3 C: Veloc de Iny	Factor 4 D: Temp de Iny	Factor 5 E: Conten Fibr	Factor 6 F: Temp Ambien	Response 1 Contracción 3D
	8	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
	6	2	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	
	3	3	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	
	4	4	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	
	7	5	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	
	1	6	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	
	5	7	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	
	2	8	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	

Figura 30 Diseño factorial fraccionado inicial para la técnica Algoritmo R3; se muestra ya aleatorizado.

Para el desarrollo de las pruebas de moldeo por inyección se realizaron las corridas para el método de Taguchi primeramente; las corridas iniciales para el método del algoritmo de aumentación R3 se desarrollaron posteriormente, cuidando que las condiciones climáticas

y de horario de realización de las pruebas fueran similares. La codificación de las probetas se realizó inmediatamente después de ser desmoldadas (ver figura 31), para lo cual fueron rotuladas con marcador indeleble en una sección de la colada. La codificación utilizada se muestra a continuación en la tabla 4.

Núm Corrida	Método DOE	Cont Fibra	Temp Ambiente	Presión Remanente	Tiempo Remanencia	Vel Inyección	Temp de Inyecc	Núm de probeta
1,2,3...	T/R	+ ó -	+ ó -	+ ó -	+ ó -	+ ó -	+ ó -	1,2,3...

Tabla 4 Método de codificación de las muestras experimentales

Ejemplo para codificación:

La codificación “3 T - - + + - + 6” se interpreta como que es la tercera corrida experimental (orden asignado una vez aleatorizadas las corridas), es del método de Taguchi, nivel bajo de fibra (sin fibras), a una temperatura ambiental en nivel bajo de -2°C, con una presión remanente en nivel alto de 80 bar, tiempo de remanencia nivel alto de 10 segundos, una velocidad de inyección en nivel bajo de 60 cm/seg, con temperatura de inyección en nivel alto de 195 °C y representa la sexta probeta inyectada con los mismos parámetros de procesamiento.



Figura 31 Codificación de probetas durante las corridas experimentales. Sin fibras (izq.) y con fibras (der.)

Para permitir que el proceso de cada corrida llegara a un nivel estable, y que cada probeta alcanzara su estabilidad dimensional, se tomaron las siguientes consideraciones:

- Se purgó el cilindro de la máquina inyectora cada vez que hubo cambio de nivel en las condiciones del experimento para los factores contenido de fibras y en temperatura de inyección (considerando afectación por la degradación térmica ocasionada por los tiempos de espera del material dentro del cilindro).
- Después de cada cambio de condiciones, se descartaron las primeras ocho probetas siguientes al cambio y se utilizó para mediciones sólo la novena probeta, para permitir que el proceso estuviera en estado estacionario después de los cambios hasta la novena inyección; en su investigación (Prashantha, et al., 2009) descartaron las cinco primeras piezas para permitir estabilidad del proceso.

- Para las mediciones sólo se utilizó una probeta en cada experimento, es decir, no hubo réplicas, debido a que se busca la máxima eficiencia de los diseños de experimentos (lograr resultados con la menor cantidad de pruebas).
- La temperatura ambiente de desmolde a 25 °C no tuvo mayores problemas, pues esa es la temperatura promedio del laboratorio de manufactura del Departamento de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Celaya, donde se desarrollaron las pruebas, por lo que una vez desmoldadas las probetas se codificaron y se mantuvieron a esa temperatura durante 48 horas.
- Para el nivel de temperatura -2°C se provocó un choque térmico súbito al sumergir la probeta, una vez desmoldada, en un recipiente con hielos y agua, donde se mantuvo por dos horas para pasarla a refrigeración, donde se mantuvo por 46 horas más, como se observa en la figura 32.
- Transcurrido ese tiempo todas las probetas se dejaron a temperatura ambiente por siete días más antes de realizar las mediciones con la finalidad de permitir la relajación total de los esfuerzos en el material antes de la medición y evitar que esos esfuerzos afectaran las mediciones, tal como lo hizo (Prashanta, et al., 2009) en su estudio.



Figura 32 Muestras experimentales sometidas a shock térmico (izq.) y mantenidas en refrigeración (der.)

Medición de la contracción.

Las piezas de polímeros moldeadas por inyección sufren una contracción volumétrica después de ser desmoldadas, lo que constituye un fenómeno que afecta de manera importante la calidad y la estabilidad dimensional de la pieza, en especial cuando se utiliza posteriormente para ensambles con otras piezas; al no presentar precisión en las dimensiones, el ensamble puede ser defectuoso.

Existen numerosas investigaciones previas donde se ha estudiado la contracción de piezas moldeadas por inyección, como se mencionó en la sección correspondiente a revisión de literatura de este documento, pero en la mayoría se utilizan métodos para

medir la contracción que realizan mediciones lineales en las piezas, se miden las piezas longitudinalmente, transversalmente o con las diferencias entre dos puntos y se utilizan piezas que tienen geometrías simplificadas. Estos métodos estiman la contracción con mediciones lineales, pero la contracción es un fenómeno volumétrico, por lo que consideramos que la medición volumétrica podría estimar mejor la contracción.

La medición de la contracción en este estudio se llevó a cabo utilizando un escáner laser 3D, que es un dispositivo que analiza un objeto para obtener datos de su forma. El dispositivo emite un rayo laser y mediante cámaras analiza su retorno bajo el principio de triangulación para determinar la forma del objeto. La información obtenida por el empleo de ésta técnica de medición puede ser utilizada para generar modelos digitales tridimensionales.

Como se mencionó anteriormente se aplicó la técnica de Diseño de Experimentos de Taguchi con un arreglo L8, además de la técnica de aumentación Algoritmo R3, para estudiar los efectos en la variable de respuesta Contracción Volumétrica que se midió aplicando el método de análisis de imágenes obtenidas con un escáner láser 3D.

Las piezas utilizadas tienen una forma cilíndrica con el diámetro reducido en la parte central. En algunos estudios se utilizan piezas con forma de barra rectangular con la finalidad de simplificar las mediciones, pero una pieza con sección circular presenta deformaciones por contracción más complicadas de medir. Una pieza inyectada con fibras se muestra en la imagen de la figura 33.



Figura 33 Pieza de polipropileno con fibras sometida al estudio de su contracción

Todas las piezas de plástico sometidas a medición de contracción fueron previamente recubiertas con sulfato de bario para su correcto escaneado (el sulfato de bario propicia condiciones ópticas adecuadas para el escaneo). La medición de las piezas se llevo a cabo empleando un escáner laser 3D ZScanner 800, con las características que se presentaron en el capítulo anterior. La figura 34 muestra el escáner laser 3D.



Figura 34 Escáner laser 3D marca ZScanner modelo 800 utilizado en la experimentación

Además de las probetas inyectadas, las cavidades del molde fueron preparadas previamente al escaneo láser. La preparación consiste en hacerle un tratamiento de recubrimiento con sulfato de bario disuelto en agua, para otorgarle condiciones ópticas de reflexión apropiadas para ser escaneadas con el equipo escáner láser 3D. La imagen siguiente (figura 35) muestra piezas con el sulfato de bario aplicado. La aplicación es manual y se realiza con un pincel para esparcir la sustancia sobre la superficie que será escaneada, se deja secar antes de escanear.



Figura 35 Aplicación de sulfato de bario en las piezas que serán escaneadas

El sistema de escaneo láser 3D necesita unos puntos de referencia, para lo que se utilizó una superficie patrón que tiene puntos de referencia (son de material especial en forma de círculos que provee el fabricante del equipo de medición escáner óptico 3D). La pieza se coloca en la superficie patrón y se escanea con un haz de rayos láser que emite el equipo portátil (que es a la vez un proyector y tres cámaras). Las cámaras son sensibles a la reflexión del láser y mediante una técnica de triangulación detecta ubicación de puntos en el plano y profundidad (tres dimensiones) de las superficies de la pieza escaneada.

El escaneo se realizó proyectando manualmente el haz laser en la superficie de la pieza con el dispositivo portátil, como se muestra en la figura 36.

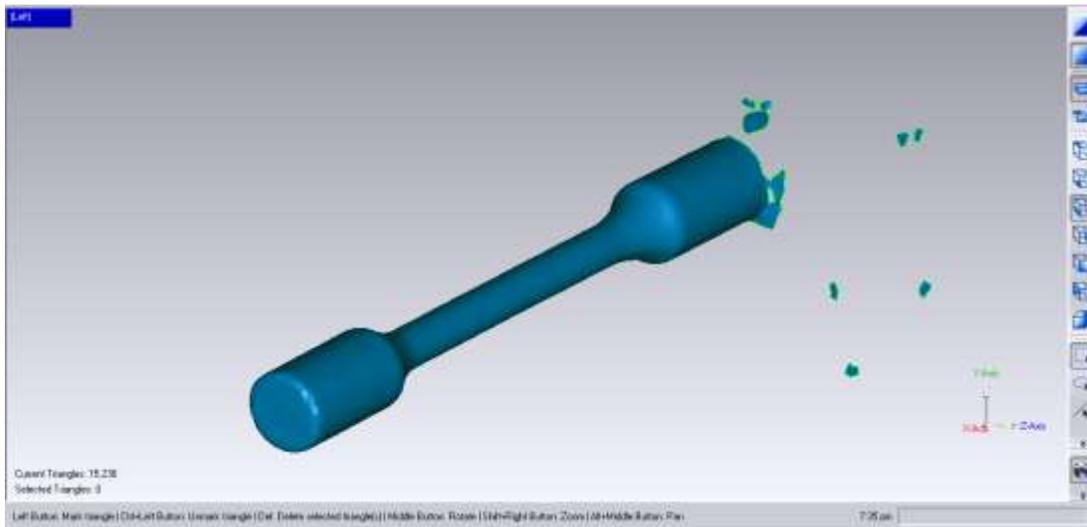


Figura 36 Proceso de escaneo laser de la pieza colocada sobre una superficie patrón con puntos de referencia.

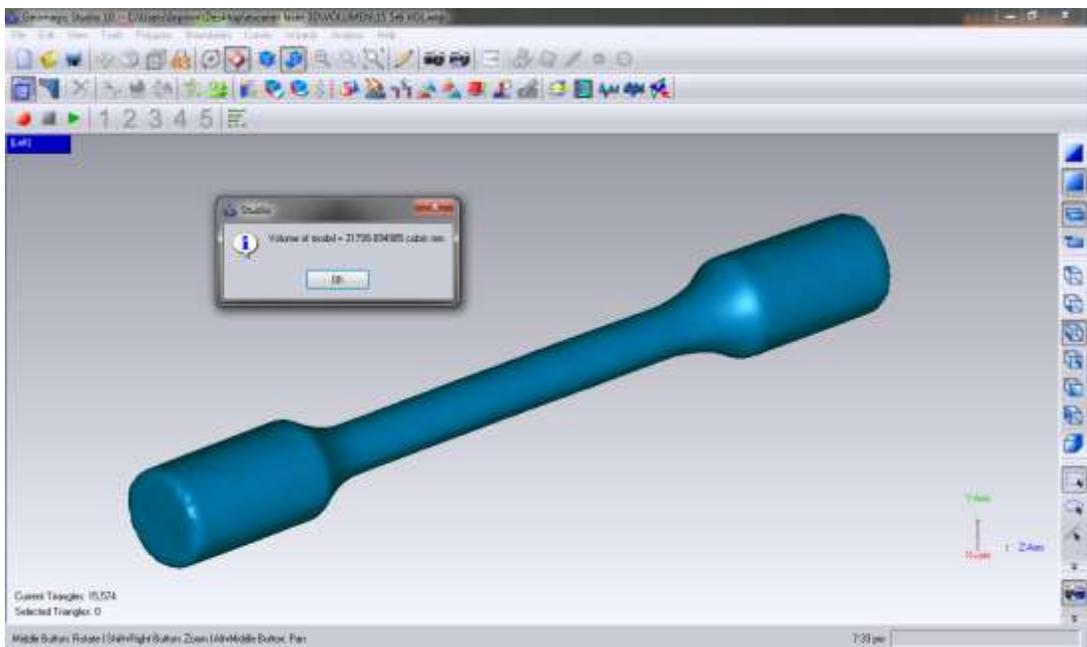
Al momento de escanear, el equipo fue generando en tiempo real la nube de puntos que constituyen la superficie de la pieza escaneada en una computadora. El archivo generado de la imagen tridimensional es compatible con cualquier software de diseño asistido por computadora (CAD).

Tanto el molde como las muestras para cada corrida experimental fueron escaneadas. Se obtuvo un archivo en formato .STL con la información digitalizada de la superficie externa de la pieza mediante el software Zscan. El archivo digital .STL de la pieza fue procesado con la técnica de análisis de imágenes mediante el software Geomagic Studio 10 con el objetivo de eliminar el ruido y de calcular el volumen de la pieza. La figura 37 muestra una pieza escaneada con ruido, libre de ruido y con el cálculo de su volumen expresado en milímetros cúbicos. El volumen del molde se obtuvo aplicando el mismo procedimiento.

A



B



C

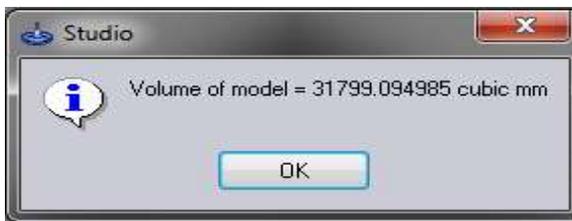


Figura 37 Pieza escaneada con ruido (a), limpia de ruido (b) y el cálculo de su volumen (c)

Se calculó el volumen de cada probeta obtenida con las corridas experimentales, así como el volumen de la cavidad del molde en milímetros cúbicos. Los volúmenes obtenidos se presentan en el capítulo de resultados. Algunas imágenes escaneadas y su cálculo de volumen se presentan en el Anexo 2. El laboratorio donde se efectuó la prueba fue en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) de la ciudad de Querétaro.

Experimentos aumentados utilizando el algoritmo R3

El interés de esta sección de la experimentación es detectar efectos significativos y generar un modelo del proceso. La utilización del enfoque de aumentación secuencial tiene el objeto de minimizar el número de corridas tanto como sea posible.

La técnica del Algoritmo R3, se desarrolló en los siguientes pasos: se inició con un diseño clásico 2_{III}^{6-3} , se corrieron los 8 experimentos y se efectuaron las mediciones. Posteriormente se realizó un análisis de varianza ANOVA para identificar los factores significativos; en seguida se verificaron los supuestos.

Posteriormente se identificó la cadena más larga, más importante o más significativa y la siguiente en orden de importancia (no es necesario considerar todas las cadenas porque los signos para la matriz de diseño se determinan solo por una o dos cadenas en el algoritmo R3). Para nuestro estudio se identificaron las interacciones de control que se encuentran confundidas con los factores de ruido (llamadas interacciones de control x ruido o CxR).

Las interacciones CxR se utilizaron posteriormente cuando se desarrollaron las aumentaciones de la técnica de experimentación secuencial Algoritmo R3.

Se definieron dos corridas experimentales adicionales necesarias para iniciar con el proceso para desacoplar interacciones, se corrieron los experimentos adicionales definidos y se efectuaron las mediciones para iniciar nuevamente el ciclo y repetirlo para cada grupo de términos correlacionados hasta lograr el objetivo de la técnica, que es obtener un modelo de regresión adecuado libre de alias en el que los coeficientes de regresión de todos los términos pueden ser estimados en forma separada.

Finalmente se efectuó un comparativo de la cantidad de experimentos necesarios entre los dos métodos.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

La variable de respuesta que se estudió es el porcentaje de contracción en volumen que presenta la pieza en relación con el volumen de la cavidad del molde. La ecuación 5 muestra la forma en que se calculó el porcentaje de contracción.

Ecuación 5

$$\% C = \frac{V_c - V_p}{V_c} \times 100$$

Donde % C representa el porcentaje de contracción 3D de la pieza; V_c representa el volumen de la cavidad del molde y V_p representa el volumen de la pieza.

Resultados para la experimentación por el Método Taguchi

En la tabla 5 que se muestra a continuación, se presentan los resultados de las mediciones expresados en porcentajes de la contracción volumétrica para cada muestra. Esta es la información que fue utilizada para realizar el análisis por el método Taguchi.

		Arreglo externo										
		Factores de ruido				F	1	2	1	2		
						E	1	1	2	2		
		Factores de control								Razón S/N	Media	
		A	B	C	D							
Arreglo interno	1	1	1	1	6.68200	7.15362	2.97698	2.25387	S/N ₁	Y ₁		
	1	1	2	2	5.97124	6.89924	4.06189	1.27318	S/N ₂	Y ₂		
	1	2	1	2	5.58740	4.76348	2.39012	0.34404	S/N ₃	Y ₃		
	1	2	2	1	5.62346	4.17948	3.47366	1.78169	S/N ₄	Y ₄		
	2	1	1	2	6.04278	6.57429	2.25473	1.04432	S/N ₅	Y ₅		
	2	1	2	1	4.36525	5.55919	1.23088	2.19459	S/N ₆	Y ₆		
	2	2	1	1	3.74503	1.53517	1.54187	0.41236	S/N ₇	Y ₇		
	2	2	2	2	3.55718	2.72627	0.80312	0.14982	S/N ₈	Y ₈		

Tabla 5 Resultados de las 32 mediciones obtenidas para el diseño del método Taguchi

La figura 38 se muestra una sección de la pantalla donde aparece la hoja de datos introducida al software Minitab. Las imágenes escaneadas de algunas corridas experimentales se muestran en el anexo 2.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	A Hold Pressure	B Hold Time	C Inject Speed	D Melt Temp				
1	1	1	1	1	6.68200	7.15362	2.97698	2.25387
2	1	1	2	2	5.97124	6.89924	4.06189	1.27318
3	1	2	1	2	5.58740	4.76348	2.39012	0.34404
4	1	2	2	1	5.62346	4.17948	3.47366	1.78169
5	2	1	1	2	6.04278	6.57429	2.25473	1.04432
6	2	1	2	1	4.36525	5.55919	1.23088	2.19459
7	2	2	1	1	3.74503	1.53517	1.54187	0.41236
8	2	2	2	2	3.55718	2.72627	0.80312	0.14982
9								
10								

Figura 38 Introducción de datos en el software Minitab para su análisis

Se puede observar en la tabla anterior que el arreglo ortogonal (OA) L8 para los factores de control se presenta en las primeras cuatro columnas (C1 –C4), correspondientes a cada uno de los factores de control. Se observa que hay 8 filas (1 - 8) que corresponden a cada una de las combinaciones de factores de control estudiadas; en cada una de las filas se presentan las cuatro mediciones de contracción correspondientes a las combinaciones de los factores de ruido (en la intersección de cada fila con las columnas C5 – C8).

En la tabla 6, que se muestra a continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis para la Razón S/N y la media de la contracción para cada combinación de los factores de control.

El análisis de los resultados se llevó al cabo en el software Minitab. Para el estudio de la contracción de piezas se utilizó la función de desempeño del tipo Mientras-más-pequeña-mejor.

		Arreglo externo									
		Factores de ruido	F	1	2	1	2				
			E	1	1	2	2				
		Factores de control								Razón S/N	Media
		A	B	C	D						
Arreglo interno	1	1	1	1	6.68200	7.15362	2.97698	2.25387	-14.3841	4.76661	
	1	1	2	2	5.97124	6.89924	4.06189	1.27318	-14.0387	4.55139	
	1	2	1	2	5.58740	4.76348	2.39012	0.34404	-11.7421	3.27126	
	1	2	2	1	5.62346	4.17948	3.47366	1.78169	-12.0637	3.76458	
	2	1	1	2	6.04278	6.57429	2.25473	1.04432	-13.3199	3.97903	
	2	1	2	1	4.36525	5.55919	1.23088	2.19459	-11.4838	3.33748	
	2	2	1	1	3.74503	1.53517	1.54187	0.41236	-6.7508	1.80861	
	2	2	2	2	3.55718	2.72627	0.80312	0.14982	-7.1503	1.80910	

Tabla 6 Resultados del análisis Taguchi, las dos columnas de la derecha presentan la razón S/N y la media.

Las medias de contracción volumétrica de las 32 corridas fueron calculadas y son mostradas en la tabla 6. Como puede observarse en las últimas 2 filas de la tabla 2 (cada fila es una combinación de los factores de control), la contracción media mínima se obtiene cuando los factores Presión Remanente A y Tiempo de Remanencia B están ambos en nivel alto (2), con muy poca influencia de los niveles de Velocidad de Inyección C y Temperatura de Plastificación D, presentando ambas filas valores de contracción media similares, de 1.81 %. Las primeras dos filas muestran los valores más altos para la contracción media en el rango de 4.55 a 4.77 % con los factores A y B en nivel bajo ambos, mientras que los niveles de C y D aparentemente tienen poco efecto.

La tabla 6 muestra la columna Razón S/N donde se pueden observar en las últimas dos filas los valores más altos (menos negativos), lo cual significa que las condiciones más robustas (para hacer que la contracción se vea afectada lo menos posible por el efecto de los factores de ruido) se obtienen con los factores Presión Remanente A y Tiempo de Remanencia B en nivel alto.

La figura 39 presentada en seguida, ilustra los efectos de los cuatro factores de control estudiados en la respuesta Contracción Media. El gráfico muestra cómo la Contracción Media cambia con cada factor, la diferencia de altura entre los dos puntos que une la línea representa la influencia del factor en la contracción media; se puede observar que el orden de mayor a menor influencia de los factores en la media es B>A>C>D, lo cual está de acuerdo con las observaciones realizadas previamente en la tablas 6 y se corrobora con la información presentada en la tabla 7, donde el análisis en Minitab clasifica el orden de influencia de los factores en la respuesta media (ver la última la fila de la tabla).

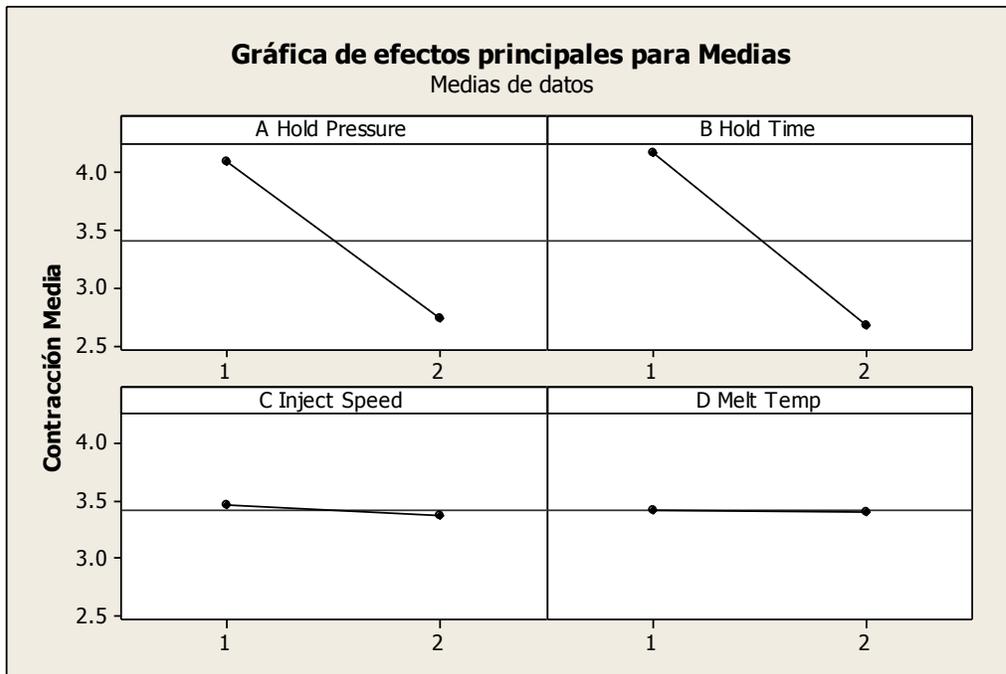


Figura 39 Efectos principales de los factores de control en la respuesta contracción media.

Tabla de respuesta para medias				
Nivel	A Hold Pressure	B Hold Time	C Inject Speed	D Melt Temp
1	4.088	4.159	3.456	3.419
2	2.734	2.663	3.366	3.403
Delta	1.355	1.495	0.091	0.017
Clasificar	2	1	3	4

Tabla 7 Tabla de respuesta para medias obtenida del análisis en el método Taguchi

La figura 39 muestra que las condiciones que minimizan la Contracción Media se dan con los cuatro factores de control en nivel alto; se observa además que el factor C tiene muy poca influencia (diferencia de altura entre los dos puntos unidos por la línea) y que el factor D tiene una influencia casi nula en comparación con los factores A y B.

El análisis de la Razón S/N se presenta en la figura 41, que muestra el efecto de los cuatro factores de control en la variabilidad de la contracción de las piezas ocasionada por los factores de ruido. La mejor combinación de los factores de control es aquella donde los ruidos tienen el menor efecto (causan la mínima variación). Se observa en la figura 5 que la combinación más robusta de los factores controlables (aquella que maximiza el estadístico Razón S/N) es la siguiente: factores A, B y C en nivel 2, y el factor D en nivel 1; destaca la baja influencia que tienen los factores C y D en comparación con la que tienen los factores A y B.

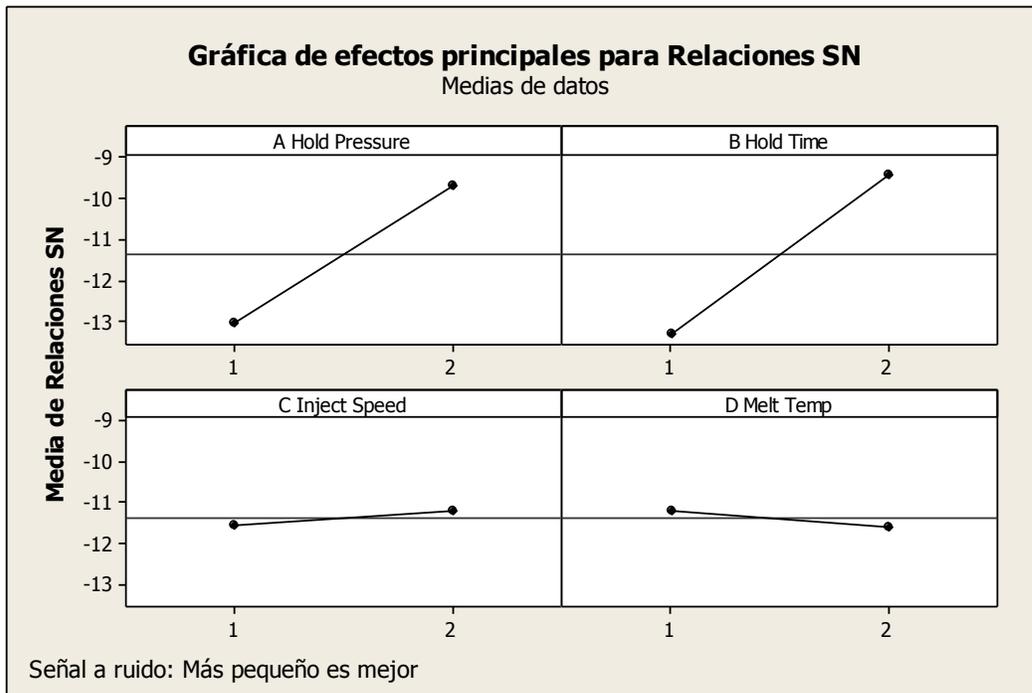


Figura 40 Efectos principales de los factores de control en la relación S/N.

Como puede observarse comparando las figuras 39 y 40, el factor D (Temperatura de Plastificación) presenta conflicto, se observa que para robustecer al proceso de los factores de ruido es deseable que el factor D se encuentre en nivel 1, pero para el objetivo de alcanzar la media deseada (mínima contracción) es deseable que se encuentre en el nivel 2, en la práctica será necesario encontrar una solución compromiso sin dejar de observar que es un parámetro de proceso con muy poca influencia, por lo que su nivel de operación podría establecerse con criterios de economía o de facilidad del proceso.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para identificar la significancia estadística relativa en la contracción media de cada uno de los 4 factores de control estudiados. Los resultados del análisis son mostrados en las tablas 7, 8 y 9. Como se puede observar la significancia de los factores en orden decreciente para la contracción media de las piezas es: B>A>C>D, pero sólo los dos primeros Presión Remanente A y Tiempo de Remanencia B tienen valor-P menor a 0.05, lo cual indica que son estadísticamente significativos en un nivel de confianza del 95 %. El ANOVA confirma que los parámetros A y B son los que estadísticamente ejercen más influencia en la contracción.

Análisis de varianza de Medias						
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
A Hold Pressure	1	3.67154	3.67154	3.67154	18.85	0.023
B Hold Time	1	4.47150	4.47150	4.47150	22.95	0.017
C Inject Speed	1	0.01647	0.01647	0.01647	0.08	0.790
D Melt Temp	1	0.00055	0.00055	0.00055	0.00	0.961
Error residual	3	0.58447	0.58447	0.19482		
Total	7	8.74453				

Tabla 8 ANOVA para el método Taguchi

A partir del análisis anterior, encontramos como resultado que al incrementar el nivel de los factores Presión Remanente y Tiempo de Remanencia se puede reducir la contracción de las piezas. Esto podría ser debido a que cuando se incrementa la presión remanente, las cadenas poliméricas que se encuentran en el interior de la pieza fundida reducen su movilidad, además de que con mayor tiempo de remanencia el material que está en contacto con las paredes del molde se enfría más formando una coraza de mayor espesor, reduciendo en cierta medida la contracción. Los resultados obtenidos coinciden con varias investigaciones previas (citadas en la sección de marco teórico) donde se ha encontrado que los parámetros de procesamiento de Presión Remanente y Tiempo de Remanencia tienen importante influencia en la contracción.

Coeficientes de modelos estimados para Medias				
	Coef	EE del coef.	T	P
Término Constante	3.41101	0.1561	21.858	0.000
A Hold Pre 1	0.67745	0.1561	4.341	0.023
B Hold Tim 1	0.74762	0.1561	4.791	0.017
C Inject S 1	0.04537	0.1561	0.291	0.790
D Melt Tem 1	0.00831	0.1561	0.053	0.961
S = 0.4414 R-cuad. = 93.3%				
R-cuad.(ajustado) = 84.4%				

Tabla 9 Coeficientes del modelo lineal para el método Taguchi

La tabla 9 muestra el modelo lineal con los coeficientes de los factores de control estudiados. El estadístico R cuadrada indica que el ajuste del modelo explica el 93.3 % de la variabilidad en la contracción. El estadístico R cuadrada ajustada, se considera más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes y se considera aceptable con valor de 84.4 %.

Por el ajuste del modelo, puede decirse que es aceptable la medición de la contracción volumétrica, utilizando el método descrito. El método para obtener mediciones en tres dimensiones es propuesto como alternativo a la realización de mediciones en una dimensión con la finalidad de estimar de una mejor manera la contracción en piezas moldeadas por inyección de plástico.

Importante de mencionar es que el factor que mas afecta en la reducción de la contracción dimensional volumétrica es el contenido de fibras, aunque en el desarrollo de este estudio se consideró como factor de ruido, es destacable el hallazgo de que si el

polipropileno es reforzado con fibra natural de paja de cebada presenta contracción considerablemente menor que el mismo material sin fibras.

Para la comprobación de los supuestos se presentan las gráficas correspondientes para verificar el cumplimiento de los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia en la figura 41, donde no se observan patrones fuera de lo esperado.

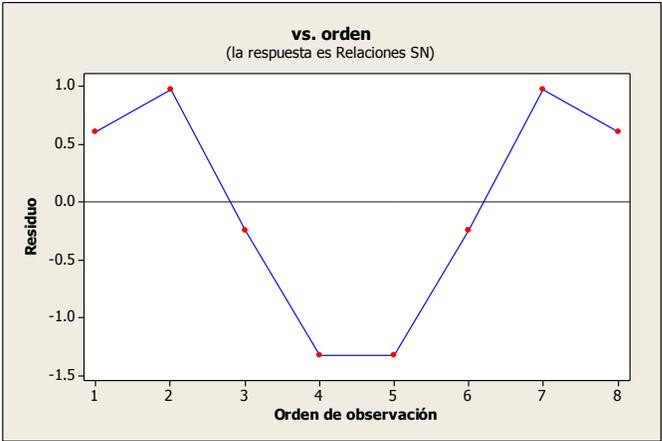
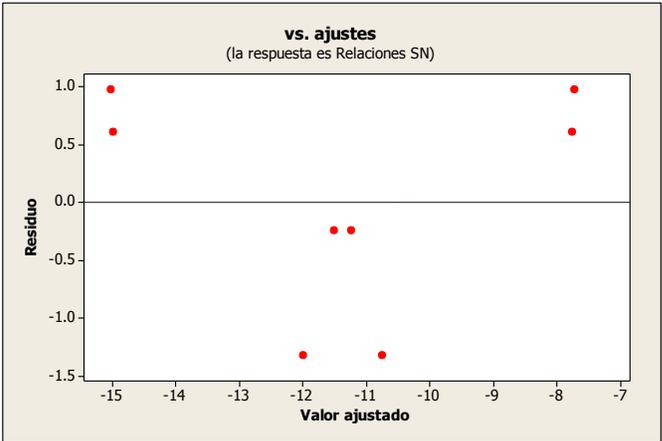
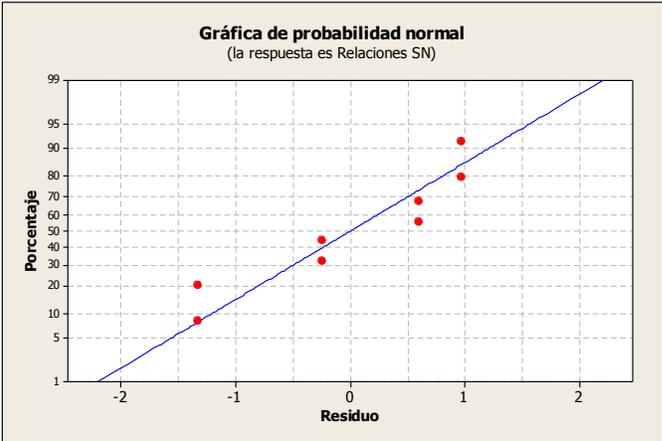


Figura 41 Verificación de supuestos del modelo para normalidad, varianza constante e independencia

Finalmente, en cuanto al método Taguchi, se presenta en seguida un pronóstico para la contracción obtenido con Minitab donde se determinan los niveles de operación para los 4 factores de control estudiados. La contracción media pronosticada por el modelo es de 1.93 % con todos los factores de control en nivel alto.

Análisis de Taguchi: C5, C6, ... vs. A Hold Press, B Hold Time, ...

Valores pronosticados

Relación S/R	Media	Desv.Est.	Ln(Desv.Est.)
-7.74980	1.93225	1.62974	0.481569

Niveles de factores para predicciones

A Hold Pressure	B Hold Time	C Inject Speed	D Melt Temp
2	2	2	2

Tabla 10 Pronóstico del modelo obtenido con el método Taguchi

Resultados de la experimentación por el método Algoritmo R3

La aplicación y desarrollo de la técnica Algoritmo R3 constituye en sí misma un resultado de este estudio, debido a que la metodología fue desarrollada por el Dr. Ríos (2009) y la experimentación que realizó en su investigación fue desarrollada en ambientes virtuales de simulación con software. La técnica no se había aplicado previamente en procesos industriales reales, por lo cual no se tenía la certeza en un principio de que la metodología fuera aplicable ni del grado en que los resultados coincidirían con la simulación.

Para el desarrollo de la técnica y su análisis, primeramente se introdujeron los datos de contracción generados en la etapa de experimentación al diseño previamente generado en el software Design Expert para realizar un ANOVA y verificar supuestos (figura 42).

Select	Std	Run	Factor 1 A:Pres Reman	Factor 2 B:Tiempo Rema	Factor 3 C:Veloc de lny	Factor 4 D:Temp de lny	Factor 5 E:Conten Fibr	Factor 6 F:Temp Ambien	Response 1 Contracción 3D
1	6		-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	2.2806
2	8		1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	5.21502
3	3		-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	2.05902
4	4		1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	2.51734
5	7		-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	5.97124
6	2		1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.23088
7	5		-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	4.17948
8	1		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.149819

Figura 42 Introducción de datos en el software Design Expert para su análisis

A continuación en la tabla 11 se presenta el análisis ANOVA realizado al diseño factorial fraccionado inicial, en el que se consideraron los factores significativos A, B y E. Se observa que los tres factores tienen valor-P inferior a 0.05; el modelo tiene un valor-P de 0.067, lo que significa que sólo hay un 0.67 % de probabilidad de que los valores que arroja el modelo ocurran debido al ruido de las mediciones; esto se podría considerar un buen ajuste (en parte, debido a que se quitaron del modelo algunos factores no significativos).

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	26.30	3	8.77	20.68	0.0067	significant
<i>A-Pres Reman</i>	3.61	1	3.61	8.53	0.0433	
<i>B-Tiempo Reman</i>	4.19	1	4.19	9.89	0.0347	
<i>E-Conten Fibra</i>	18.49	1	18.49	43.62	0.0027	
Residual	1.70	4	0.42			
Cor Total	28.00	7				

The Model F-value of 20.68 implies the model is significant. There is only a 0.67% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case A, B, E are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant. If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	0.65	R-Squared	0.9394
Mean	2.95	Adj R-Squared	0.8940
C.V. %	22.07	Pred R-Squared	0.7577
PRESS	6.78	Adeq Precision	12.669

The "Pred R-Squared" of 0.7577 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.8940.

Tabla 11 ANOVA del diseño factorial fraccionado inicial para la experimentación de la técnica Algoritmo R3

Posteriormente se verificaron los supuestos del modelo (normalidad, varianza constante e independencia) como se muestra en las gráficas que se observan en la figura 43, de probabilidad normal contra residuos, predichos contra residuos y residuos contra orden de corrida, respectivamente, en las que no se observaron tendencias o patrones anormales.

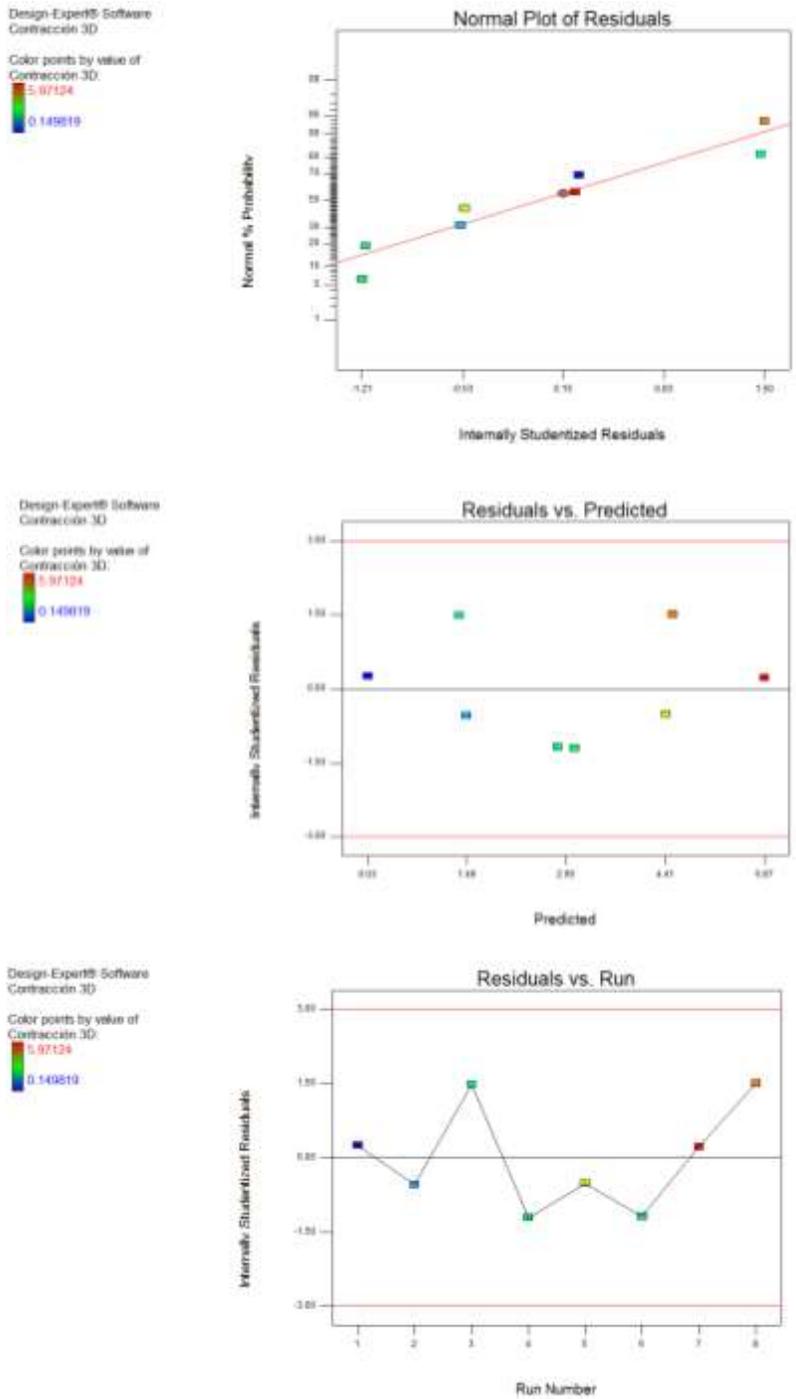


Figura 43 Verificación de supuestos del modelo para normalidad, varianza constante e independencia

A continuación, fueron identificados los principales factores estadísticamente significativos, resultando similares que en la técnica de Taguchi presentada anteriormente: Contenido de Fibra, Presión Remanente y Tiempo de Remanencia; también el factor Temperatura de Inyección fue significativo aunque para tener mejor

ajuste del modelo con fines de análisis no se consideró, ya que está muy cerca del límite del valor P (ver figura 44). Con esta medida se logra tener un buen ajuste del modelo con valor de R cuadrada de 0.9394 y de R cuadrada ajustada de 0.8940, lo que será de mucha utilidad para el desarrollo de la aumentación.

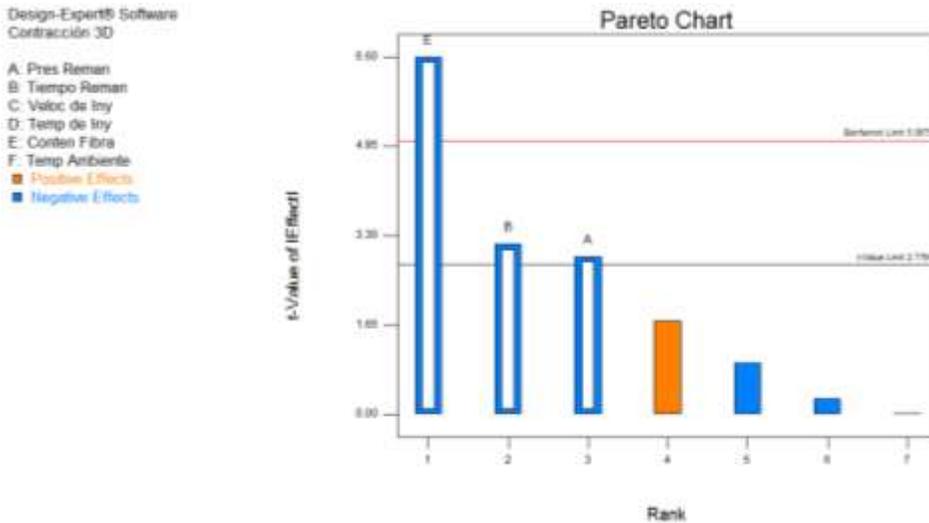


Figura 44 Determinación de los factores significativos mediante gráfica de Pareto

Los resultados que se obtuvieron al ir desarrollando de la técnica del Algoritmo R3, se expondrán a continuación; con la finalidad de realizar una redacción clara y simple de los resultados del método, en la sección siguiente se nombrarán los factores como A, B, C, D etc., entendiéndose que se trata de los mismos factores y niveles estudiados con el método Taguchi y que se muestran en la tabla 12 a continuación.

FACTORES (unidades)	Nivel alto -1	Nivel bajo 1
A Presión remanente (BAR)	20	80
B Tiempo de remanencia (seg)	2	10
C Velocidad de Inyección (cm/seg)	40	60
D Temperatura de plastificación (°C)	180	195
E Contenido de fibras (% en peso)	0	10
F Temperatura ambiente (°C)	-2	25

Tabla 12 Factores, unidades y niveles considerados en el desarrollo experimental del método Algoritmo R3

Tal como se mostró en la sección de experimentación, se inició con un diseño clásico 2^{6-3} , se corrieron los 8 experimentos y se efectuaron las mediciones (se muestran en la Tabla 13 los resultados de medición en la columna 'contracción')

Los principales factores estadísticamente significativos encontrados fueron [A], [B] y [E] lo que se ilustra en la tabla 13 siguiente; ahí mismo se observa su estructura alias.

A	b	c	D	E	f	contracción	Estructura Alias
-1	-1	-1	1	1	1	2.2806	[Intercept] = Intercept
1	-1	-1	-1	-1	1	5.21502	[A] = A + BD + CE
-1	1	-1	-1	1	-1	2.05902	[B] = B + AD + CF
1	1	-1	1	-1	-1	2.51734	[C] = C + AE + BF
-1	-1	1	1	-1	-1	5.97124	[D] = D + AB + EF
1	-1	1	-1	1	-1	1.23088	[E] = E + AC + DF
-1	1	1	-1	-1	1	4.17948	[F] = F + BC + DE
1	1	1	1	1	1	0.149819	[AF] = AF + BE + CD

Tabla 13 Fracción 2^{6-3}_{III} con cadenas significativas [A], [B] y [E] y su estructura alias

Los factores significativos y su interacción se identificaron a partir del diseño con la columna de respuestas para contracción, del análisis ANOVA obtenido con Desing Expert.

Se asume que los factores de ruido x ruido no son significativos. Una vez que se identificaron los factores [A], [B] y [E] con sus alias, como se muestra en la tabla 13 de arriba, se desea separar sus efectos, por lo que será necesario adicionar corridas extras para desacoplar esos términos; ya que, en especial, las interacciones de control x ruido son importantes y es necesario estimar sus efectos en forma separada.

El algoritmo R3 trabaja de forma tal que la cadena de alias más importante o más significativa es identificada, así como la siguiente en significancia (no es necesario identificar todas las cadenas por que los signos de la matriz de diseño serán determinados por sólo una o dos cadenas)

A continuación las columnas de cada cadena significativa fueron nombradas ver tabla 14 que se muestra a continuación. Un efecto principal siempre es llamado “columna 1” y sus interacciones de 2 factores (I2F) son llamados “columna 2, 3 ó 4” respectivamente. No hay una regla específica para determinar cuál número de columna debe ser asignado a una I2F determinada, pero el experimentador puede asignar el número 2 a la I2F más importante o a la interacción que necesita más desacoplamiento del efecto principal, porque el desacoplamiento es más fuerte entre las columnas 1 y 2, y es más débil para cualquier otra combinación de 2 columnas. Rios (2009).

	COLUMNA 1	COLUMNA 2	COLUMNA 3
CADENA 1	E	DF	AC
CADENA 2	B	AD	CF

Tabla 14 Nombrando las columnas de los factores significativos E y B

A continuación dos corridas adicionales fueron específicamente diseñadas para agregarlas con el objetivo desacoplar la primera cadena, de acuerdo con el Algoritmo R3. El método para diseñar esas corridas fue definido en una investigación previa (Misra, 2006) y se muestran en la figura siguiente. Se observa que si la cadena contiene 2 columnas, entonces 2 corridas adicionales serán necesarias para mantener balance, pero si la cadena contiene 3 o más columnas, entonces 4 corridas serán requeridas para mantener el balance. Esas corridas son adicionadas en pares, primero las corridas 1 y 2, y después si fueran necesarias, las corridas 3 y 4.

2 Columnas		
Corridas	Columna 1	Columna 2
1	-1	1
2	1	-1

3 Columnas			
Corridas	Columna 1	Columna 2	Columna 3
1	-1	1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	1
4	1	-1	1

4 Columnas				
Corridas	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
1	-1	1	-1	1
2	1	-1	-1	1
3	-1	1	1	-1
4	1	-1	1	-1

Tabla 15 Adición de corridas para desacoplar 2, 3 y 4 columnas (Misra, 2006)

Las primeras dos corridas de aumentación se definieron como se muestra en la siguiente tabla 16. Se tomaron las columnas de I2F y se asignan los signos a los efectos principales asociados con esas interacciones de acuerdo al Algoritmo R3. Como se observa en la tabla 14 E fue considerado columna 1, DF columna 2 y AC columna 3. Para el signo – en la columna DF se asignó – a la columna D y + a la columna F, para el signo + en la columna DF se asignó – a la columna D y – a la columna F (se observa la asignación en la tabla 17). Para el signo – inferior de la columna AC se asignó + a la columna A y – a la columna C, y para el signo – superior de la columna AC se asignaron – en la columna A y + en la columna C. Se buscó cuidar el balance en estas asignaciones.

Corrida	A	B	C	D	E	F	DF	AC
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	1	-1	1	1
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1
Corrida adicional 1					-1		1	-1
Corrida adicional 2					1		-1	-1

Tabla 16 Definición inicial de las dos primeras corridas de aumentación al aplicar la técnica Algoritmo R3

Corrida	A	B	C	D	E	F	DF	AC
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	1	-1	1	1
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1
Corrida adicional 1	-1		1	-1	-1	-1	1	-1
Corrida adicional 2	1		-1	-1	1	1	-1	-1

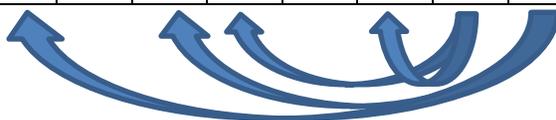


Tabla 17 Asignación de signos a la matriz de diseño

Siguiendo el procedimiento del Algoritmo R3, a continuación se identificó si la segunda cadena $[B] = [B] + [AD] + [CF]$ podía ser desacoplada por algún factor auxiliar que pudiera ser usado (en la mayoría de los casos la primera cadena es suficiente para determinar los signos de la mayoría de los efectos principales, y la segunda cadena puede ser desacoplada usando los efectos principales que quedan como factor auxiliar, Ríos, 2009). En este caso A, C, D y F fueron ya determinados por los signos asignados a DF y AC, y solo permanece B sin asignación. A las columnas AD y CF se asignaron los signos correspondientes con los signos de los efectos principales ya asignados previamente. B se asignó para que cumpliera con la tabla 17. Con la misma lógica se asignaron los signos para el resto de las columnas, tal como se observa en la tabla 18.

Corrida	A	B	C	D	E	F	DF	AC	CF	AD	CE	BD
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
5	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Corrida adicional 1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
Corrida adicional 2	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Tabla 18 Asignación completa de los signos para las dos primeras corridas

En la asignación se busca crear un contraste entre el efecto principal y sus I2F, en especial la que el experimentador busca desacoplar.

Se condujeron los experimentos para las 2 primeras corridas aumentadas, se efectuaron las mediciones (los resultados se muestran en la siguiente TABLA 19) y fueron determinados los términos significativos.

A	B	C	D	E	F	DF	AC	CF	AD	CE	BD	Y
-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	2.281
1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	5.215
-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	2.059
1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	2.517
-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	5.971
1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1.231
-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	4.179
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.150
-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	5.737
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.412

Tabla 19 Se muestran las dos primeras corridas de aumentación con los resultados de contracción obtenidos

El paso siguiente en el desarrollo del Algoritmo R3 fue crear las matrices de correlación, cuyos elementos son:

Ecuación 6

$$(x_i \cdot x_j)/n$$

Dichos elementos se usan para representar los alias. La tabla 20, se presenta a continuación y muestra las matrices de correlación.

	DF	AC	CF	AD	CE	BD
A	-0.2	0	0	-0.2	0.8	0.6
B	-0.2	0	0.8	0.6	0	-0.2
C	0.2	0	0	0.2	0	0.2
D	0	0.2	0.2	0	0.2	0
E	0.6	0.8	0	-0.2	0	-0.2
F	-0.2	0	0	-0.2	0	-0.2

	DF	AC	CF	AD	CE	BD
DF	1	0.8	0	0.2	0	0.2
AC	0.8	1	0.2	0	0.2	0
CF	0	0.2	1	0.8	0.2	0
AD	0.2	0	0.8	1	0	0.2
CE	0	0.2	0.2	0	1	0.8
BD	0.2	0	0	0.2	0.8	1

Tabla 20 Matrices de correlación obtenidas con las dos aumentaciones iniciales

Las anteriores matrices muestran tres tipos de información: 1 los términos que puede estimar el modelo de regresión (A, B, C, D, E y F); 2 los términos significativos reportados después del análisis (A, B y E); y 3 los términos que están fuertemente alias (CF y AD con B, AC y DF con E y CE y BD con A). Se observa que la adición de solo dos corridas no permite estimar términos adicionales porque las I2F se encuentran aun fuertemente alias con los efectos principales.

A continuación se decidió continuar desacoplando interacciones, eligiendo como la siguiente cadena alias la cadena $[B] = B + AD + CF$ (ver tabla 21)

	COLUMNA 1	COLUMNA 2	COLUMNA 3
CADENA 1	B	AD	CF
CADENA 2	E	AC	DF

Tabla 21 Nombrando las columnas de los factores significativos B y E

A continuación se repitió el procedimiento del Algoritmo R3 para definir las dos corridas siguientes de aumentación (3 y 4). Se corrieron los experimentos de aumentación 3 y 4 y se realizaron las mediciones. La tabla 22 muestra a continuación los resultados de las aumentaciones 3 y 4.

A	B	C	D	E	F	DF	AC	CF	AD	CE	BD	y
-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	2.281
1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	5.215
-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	2.059
1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	2.517
-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	5.971
1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1.231
-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	4.179
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.150
-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	5.737
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.412
-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	0.344
1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	5.216

Tabla 22 Resultados de asignación de signos y mediciones de contracción para las corridas de aumentación 3 y 4

En la tabla 23 que se muestra a continuación, se presentan las matrices de correlación en las que se observa que el factor B ya no tiene una interacción significativa, sus efectos de interacción se han desacoplado. También se observa que el efecto principal E se encuentra fuertemente alias aún con la I2F AC.

	DF	AC	CF	AD	CE	BD
A	-0.16666667	-0.16666667	0.16666667	-0.16666667	0.83333333	0.5
B	-0.16666667	0.16666667	0.5	0.5	-0.16666667	-0.16666667
C	0	0	0	0.33333333	0	0
D	0	0.33333333	0	0	0	0
E	0.5	0.83333333	-0.16666667	-0.16666667	-0.16666667	-0.16666667
F	-0.16666667	0.16666667	-0.16666667	-0.16666667	-0.16666667	-0.16666667

	DF	AC	CF	AD	CE	BD
DF	1	0.66666667	0	0	0	0.33333333
AC	0.66666667	1	0	0	0	0
CF	0	0	1	0.66666667	0.33333333	0
AD	0	0	0.66666667	1	0	0
CE	0	0	0.33333333	0	1	0.66666667
BD	0.33333333	0	0	0	0.66666667	1

Tabla 23 Matrices de correlación obtenidas con las aumentaciones 3 y 4

A continuación se efectuó un primer análisis de regresión en Minitab para verificar las interacciones de interés presentes en el modelo que incluye las primeras 4 aumentaciones. El resultado de ese análisis de regresión se muestra en la tabla 24 a continuación.

Análisis de regresión: y vs. A, B, E, DF, AC, CF, AD, CE, BD

El factor * CE está altamente correlacionado con otras variables X.
* CE se ha eliminado de la ecuación.

El factor * BD está altamente correlacionado con otras variables X.
* BD se ha eliminado de la ecuación.

La ecuación de regresión es

$$y = 2.95 - 0.672 A - 1.24 B - 0.814 E - 0.118 DF - 0.589 AC + 0.464 CF + 0.053 AD$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	2.9504	0.2302	12.82	0.000
A	-0.6722	0.2302	-2.92	0.043
B	-1.2411	0.3987	-3.11	0.036
E	-0.8140	0.5639	-1.44	0.222
DF	-0.1176	0.3453	-0.34	0.751
AC	-0.5887	0.5017	-1.17	0.306
CF	0.4643	0.3453	1.34	0.250
AD	0.0528	0.3045	0.17	0.871

S = 0.651121 R-cuad. = 96.9% R-cuad. (ajustado) = 91.4%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	7	52.4335	7.4905	17.67	0.007
Error residual	4	1.6958	0.4240		
Total	11	54.1293			

Fuente	GL	SC	Sec.
A	1	2.8326	
B	1	21.3041	
E	1	27.1896	
DF	1	0.0036	
AC	1	0.2184	
CF	1	0.8726	
AD	1	0.0127	

Observaciones poco comunes

Obs	A	y	Ajuste	EE de ajuste	Residuo	Residuo estándar
9	-1.00	5.737	5.737	0.651	-0.000	* X
10	1.00	0.412	0.412	0.651	-0.000	* X
11	-1.00	0.344	0.344	0.651	0.000	* X
12	1.00	5.216	5.216	0.651	0.000	* X

X denota una observación cuyo valor X le concede gran apalancamiento.

Tabla 24 Análisis de regresión del modelo con 4 corridas aumentadas que muestra correlaciones altas de CE y BD

Se puede observar en el análisis de regresión mostrado en la tabla 24, que CE y BD aún están altamente correlacionados. Dado que se encontraron términos de interés altamente

correlacionados, se continuó siguiendo el mismo procedimiento del Algoritmo R3: se diseñaron las siguientes dos corridas de aumentación, la 5 y 6 de la misma manera en que se explicó previamente para las corridas 1 y 2. Se efectuaron las corridas en la inyectora y se midieron las muestras, los resultados se muestran en la tabla siguiente 25.

A	B	C	D	E	F	DF	AC	CF	AD	CE	BD	y
-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	2.281
1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	5.215
-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	2.059
1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	2.517
-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	5.971
1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1.231
-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	4.179
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.150
-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	5.737
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.412
-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	0.344
1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	5.216
-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	3.557
1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	5.404

Tabla 25 Resultados de asignación de signos y mediciones de contracción para las aumentaciones 5 y 6

Se realizó nuevamente un análisis de regresión en Minitab con la información de las 6 corridas aumentadas. El análisis de regresión realizado se presenta a continuación en la Tabla 26.

En el análisis de regresión siguiente (tabla 26), se verifica que ya no existen aliases entre los factores significativos de interés, con lo que se concluye el proceso del Algoritmo R3 y se presenta el modelo de regresión, libre de interacciones con los factores significativos del modelo.

El análisis de regresión presenta una R cuadrada de 97.2 % y una R cuadrada ajustada de 90.8 %, valores de desempeño del modelo mejores que los obtenidos antes de la experimentación secuencial.

Análisis de regresión: y vs. A, B, E, DF, AC, CF, AD, CE, BD

La ecuación de regresión es

$$y = 2.95 + 0.437 A - 1.92 B - 1.24 E - 0.797 DF + 0.520 AC + 1.14 CF + 0.053 AD - 1.79 CE + 0.680 BD$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	2.9504	0.2302	12.82	0.000
A	0.4366	0.3640	1.20	0.297
B	-1.9209	0.3987	-4.82	0.009
E	-1.2430	0.2819	-4.41	0.012
DF	-0.7974	0.3045	-2.62	0.059
AC	0.5201	0.3045	1.71	0.163
CF	1.1441	0.5017	2.28	0.085
AD	0.0528	0.3045	0.17	0.871
CE	-1.7886	0.6712	-2.66	0.056
BD	0.6798	0.3987	1.70	0.163

S = 0.651121 R-cuad. = 97.2% R-cuad.(ajustado) = 90.8%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	9	58.1914	6.4657	15.25	0.009
Error residual	4	1.6958	0.4240		
Total	13	59.8873			

Fuente	GL	SC	Sec.
A	1	1.1336	
B	1	13.4341	
E	1	38.0127	
DF	1	0.5216	
AC	1	1.0157	
CF	1	0.3256	
AD	1	0.5497	
CE	1	1.9661	
BD	1	1.2324	

Observaciones poco comunes

Obs	A	y	Ajuste	EE de ajuste	Residuo	Residuo estándar
9	-1.00	5.737	5.737	0.651	-0.000	* X
10	1.00	0.412	0.412	0.651	-0.000	* X
11	-1.00	0.344	0.344	0.651	-0.000	* X
12	1.00	5.216	5.216	0.651	0.000	* X
13	-1.00	3.557	3.557	0.651	-0.000	* X
14	1.00	5.404	5.404	0.651	-0.000	* X

X denota una observación cuyo valor X le concede gran apalancamiento.

Tabla 26 Análisis de regresión después de 6 corridas aumentadas que muestra que ya no hay altas correlaciones

Se observa en el modelo de regresión que después de la tercera aumentación (de dos corridas cada una, totalizando seis corridas adicionales), todos los términos significativos están libres de alias. Mediante la eliminación de factores con altos niveles de valor-P, el modelo se transforma en uno casi idéntico al modelo real.

Es interesante observar cómo los términos correctos son identificados después de sólo 6 corridas adicionales a las 8 del factorial fraccionado inicial, totalizando 14 experimentos, lo cual no puede ser logrado mediante un semifold o un foldover.

Un resultado obtenido hasta aquí es la aplicabilidad en un proceso industrial real de la técnica Algoritmo R3. No sólo es aplicable, sino que los resultados esperados del método coinciden con los obtenidos en cuanto al número de corridas adicionales necesarias. Otro resultado es el modelo de regresión obtenido, el cual tiene todos sus términos libres de alias.

CONCLUSIONES

Fue formulado PP reforzado con fibras naturales de cebada pulverizadas para utilizarlo en el desarrollo de unidades experimentales.

Unidades experimentales de geometría compleja fueron preparadas mediante el proceso de moldeo por inyección para realizar estudios sobre la contracción.

La contracción volumétrica de piezas fue medida aplicando un método propuesto, en el que se aplicaron los métodos de escaneo láser 3D, análisis de imágenes y cálculo directo de contracción en milímetros cúbicos.

Es posible utilizar el método de escáner laser 3D y análisis de imágenes para estudiar la contracción volumétrica de piezas moldeadas por inyección obteniendo precisión aceptable en las mediciones.

Se planearon los experimentos para la técnica de Taguchi y el Algoritmo R3.

La técnica de Taguchi permite realizar optimizaciones eficientes dentro de los niveles estudiados de los parámetros de control para la contracción, con lo que se puede mejorar la calidad de las piezas.

Las condiciones óptimas definidas con el método Taguchi (dentro de los niveles de proceso estudiados) para minimizar la contracción media son: Presión Remanente en nivel alto, Tiempo de Remanencia en nivel alto, Velocidad de Inyección en nivel alto y Temperatura de Plastificación en nivel alto.

Las condiciones más robustas determinadas con el método Taguchi para lograr que el proceso sea resistente a los factores de ruido son: Presión Remanente en nivel alto, Tiempo de Remanencia en nivel alto, Velocidad de Inyección en nivel alto y Temperatura de Plastificación en nivel bajo.

Los parámetros de proceso de mayor significancia para minimizar la característica de calidad % de contracción en piezas moldeadas por inyección (determinadas por método Taguchi) son el Tiempo de Remanencia y la Presión de Remanencia, mientras que los parámetros con menor significancia son la Velocidad de Inyección y la Temperatura de Plastificación.

Los parámetros de proceso de mayor significancia para minimizar la característica de calidad % de contracción en piezas moldeadas por inyección (determinadas por Algoritmo R3) son también el Tiempo de Remanencia y la Presión de Remanencia, pero se encontró que tiene aún más influencia en la contracción el factor Contenido de Fibras.

Investigación básica del Algoritmo R3 fue aplicada en un proceso industrial en ambiente robusto, con lo que se comprueba su aplicabilidad. La técnica desarrollada por Ríos (2009) es capaz de separar las interacciones de interés.

Los dos métodos de DOE aplicados presentan diferencias debido a que siguen caminos distintos para lograr su objetivo de modelar un proceso y obtener información del modelo. El método de Taguchi se utiliza para generar un modelo y determinar los niveles de los factores de control que robustecen al proceso de los factores de ruido, además de los niveles de esos mismos factores que permiten lograr el objetivo de calidad. La técnica de Ríos (2009) puede ser aplicada para desacoplar de una manera eficiente las interacciones presentes en un diseño factorial fraccionado mediante experimentación secuencial, que permite obtener un modelo casi idéntico al modelo real.

Al aplicar la técnica de Taguchi se realizaron 32 corridas experimentales, lo cual permitió determinar los niveles de los factores de control que robustecen el proceso al ruido, además permitió definir los niveles de los factores que optimizan la contracción de las muestras estudiadas. Con este método no fueron consideradas las interacciones.

En el desarrollo de la técnica Algoritmo R3 sólo fueron necesarias 14 corridas experimentales, con lo que se obtuvo un modelo libre de interacciones en los efectos de interés, lo cual es importante por la proximidad del modelo con la realidad. Con este método no fueron determinados los niveles que optimicen la contracción ni los que robustezcan el proceso del ruido, aunque podrían determinarse.

El desarrollo del método de Ríos es más eficiente en cuanto a la cantidad de corridas necesarias que el desarrollo del método de Taguchi.

El proceso se optimizó mediante el método de Taguchi. Con el Algoritmo R3 no se optimizó el proceso, sólo fueron comparados los efectos significativos obtenidos por ambos métodos, sin embargo trabajo futuro podría comparar los niveles óptimos de proceso recomendados por ambas técnicas.

RECOMENDACIONES

Se visualiza trabajo futuro. En primera instancia se tiene la posibilidad de desarrollar estudios relacionados con innovación en diseño de experimentos con la finalidad de complementar otras técnicas de diseño de experimentos con la aumentación secuencial basándose en el Algoritmo R3, con la finalidad de desacoplar factores de interés de manera eficiente.

En segundo lugar se pueden desarrollar estudios que retomen la experiencia del Algoritmo R3 aplicado en esta investigación para llegar a optimizar el proceso.

Finalmente se puede estudiar la variabilidad de mediciones con el método propuesto y realizar estudios comparativos de desempeño con otras técnicas de medición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografía

Altan, M., 2009. Reducing Shrinkage in injection moldings via de Taguchi, ANOVA and neural network methods. *Materials and Design*, Issue 31, pp. 599-604.

Axelsson, P., 1999. Processing of laserscanner data—algorithms and applications. Volumen 54, pp. 138-147.

Chang, T. C. & Faison III, E., 2001. Shrinkage Behavior and Optimization of Injection Molded Parts Studied by the Taguchi Method. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, MAY.pp. 703-710.

Chavez, M. L., Vizán, A., Márquez, J. J. & Ríos, J., 2010. Inspection Model and Correlation Functions to Assist in the Correction of Qualitative Defects of Injected Parts. Volumen 50, p. 1268–1279.

Chung-Feng, Kuo, J., Te-Li, S. & Yung-Chang, L., 2007. Construction and Analysis in Combining the Taguchi Method and the Back Propagation Neural Network in the PEEK Injection Molding Process. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Volumen 46, p. 841–848.

Cinelli, P., Chiellini, E., Lawton, J. & Imam, S. H., 2006. Properties of injection molded composites containing corn fiber and poly(vinyl alcohol). *Journal of Polymer Research*, Issue 13, pp. 107-113.

Deng, W.-J.y otros, 2008. An effective approach for process parameter optimization in injection molding of plastic housing components. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Issue 47, pp. 910-919.

Fen Lui, S. Z. H. Z. J. L., 2011. A Study on the Distinguishing Responses of Shrinkage and Warpage to Processing Conditions in Injection Moldin. *Journal of Applied Polymer Science*, .

Fu-Chen, K. & Yung-Jin, W., 2008. Optimizations of the Processing Parameters of High-Performance Engineering Plastic in Injection Molding. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Volumen 47, p. 1154–1161.

Georgopoulos, S. T. y otros, 2005. Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agricultural residues. *Polymer Degradation and Satability*, Issue 90, pp. 303-312.

Gutiérrez P, H. & De la Vara S, R., 2008. *Análisis y diseño de experimentos, 2a Edición*. México: Mc Graw Hill Interamericana.

Gutiérrez Pulido, H. & De la Vara Salazar, R., 2008. *Análisis y Diseño de Experimentos*. 2a. Edición ed. México: Mc Graw Hill.

Janda, M. & Kuchyhkova, H., 2010. USE OF 3D SCANNER FOR DIAGNOSTIC OF ELECTRICAL. Issue 87.

Jeffrey Kuo, C.-F., Su, T.-L. & Li, Y.-C., 2007. Construction and analysis in combining the Taguchi method and the Back Propagation Neural Network in the PEEK Injection Molding Process. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Issue 46, pp. 841-848.

Kabanemi, K. K., Villancourt, H., Wang, H. & Salloum, G., 1998. Residual Stresses, Shrinkage, and Warpage of Complex Injection Molded Products: Numerical Simulation and Experimental Validation. 38(1), pp. 21-37.

Kaja, A. & Vladimir, F., 2010. The Use of 3D technologies in Cultural Heritage Communication.

Kung, F.-C. & Weng, Y.-J., 2008. Optimizations of the Processing Parameters of Hi-Performance Engineering Plastic in Injection Molding. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Issue 47, pp. 1154-1161.

Liao, S. J. y otros, 2004. Optimal Process Conditions of Shrinkage and Warpage of Thin-Wall Parts. 44(5), pp. 917-928.

Liao, S. J. & Hsieh, W. H., 2004. Shrinkage and Warpage Prediction of Injection-Molded Thin-Wall Parts Using Artificial Neural Networks. 44(11), pp. 2029-2040.

Lin, Y.-S., Deng, W.-J., Huang, C.-H. & Yang, Y.-K., 2008. Optimization of Injection Molding Process for Tensile and Wear Properties of Polypropylene Components via Taguchi and Design of Experiments Method. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Issue 47, pp. 96-105.

Liu, C. & Manzione, L. T., 1996. Process Studies in Precision Injection Molding.I: Process Parameters and Precision. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, 36(1), pp. 1-9.

Mamat, A., Trochu, F. & Sanschagrin, B., 1995. Analysis of Shrinkage by Dual Kriging for Filled and Unfilled Polypropylene Molded Parts. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, pp. 1511-1520.

Mizamzul, N. & Kamaruddin, S., 2011. Investigating the Effects of Injection Molding Parameters on the Mechanical Properties of Recycled Plastic Parts Using the Taguchi Method. *Materials and Manufacturing Processes*, 2(26), pp. 202-209.

Mustafa Kurt, Y. K. O. S. K., 2010. Influence of molding conditions on the shrinkage. *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, pp. 571-578.

Panthapulakkal, S. & Sain, M., 2007. Agro-Residue reinforced high-density polyethylene composites: fiber characterization and analysis of composite properties. *Science Direct*, A(38), pp. 1445-1454.

Prashanta, K. y otros, 2009. Taguchi Analysis of shrinkage and warpage of injection-moulded polypropylene/multiwall carbon nanotubes nanocomposites. 3(10), pp. 630-638.

Prashantha, K. y otros, 2009. Taguchi analysis of shrinkage and warpage of injection-moulded polypropylene/multiwall carbon nanotubes nanocomposites. *Express Polymer Letters*, 3(10), pp. 630-638.

Rios, A. J., Diosdado, P. & Hernandez, S., 2009. Sequential experimentation approach for robust designs. *II international congress of engineering and technology*, pp. 13-19.

Rios, A. J., Diosdado, P. & Hernandez, S., 2009. Sequential Experimentation Approach for Robust Designs. *Autonomous University of Ciudad Juarez, S/N(S/N)*, pp. 13-19.

Rios, A. J., Simpson, J. R. & Vazquez, J. A., 2009. Sequential experimentation approach for augmenting of resolution III fractions.

Shen, C., Wang, L. & Cao, W., 2007. Optimization for Injection Molding Process Conditions of the Refrigeratory Top Cover Using Combination Method of Artificial Neural Network and Genetic Algorithms. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Volumen 46, pp. 105-112.

Shen, C., Wang, L., Cao, W. & Qian, L., 2007. Investigation of the effect of molding variables on sink marks of plastic injection molded parts using Taguchi DOE technique. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Issue 46, pp. 201-225.

Shen, C., Wang, L., Cao, W. & Qian, L., 2007. Investigation of the Effect of Molding Variables on Sink Marks of Plastic Injection Molded Parts Using Taguchi DOE Technique. Volumen 46, pp. 219-225.

Shen, C., Wang, L., Cao, W. & Wu, J., 2007. Optimization for injection molding process conditions of the refrigerator top cover using combination method of artificial neural network and genetic algorithms. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Issue 46, pp. 105-112.

Sombatsompop, N., Yotinwattanakumtorn, C. & Thongpin, C., 2005. Influence of Type and Concentration of Maleic Anhydride Grafted Polypropylene and Impact Modifiers on Mechanical Properties of PP/Wood Sawdust Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, Volumen Vol. 97, p. 475– 484.

Speranza, V., Pantani, R., Besana, G. B. & Titomanlio, G., 2007. Anisotropic Shrinkage of Injection Molded Poly Vinylidene Fluoride Samples. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, pp. 1788-1795.

Thamae, T. y otros, 2008. Developing and characterizing new materials based on waste plastic and agro-fibre. *J Mater Sci*, Issue 43, pp. 4057-4068.

Tim, O. & Hernández-Ortiz, J. P., 2006. *Polymer Processing, modeling and simulation*. First ed. Munich, Germany: Hanser Gardner Publications, Inc.

Wang, L., Li, Q., Shen, C. & Lu, S., 2008. Effects of process parameters and two-way interactions on sink mark depth of injection molded parts by using the design of experiment method. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Issue 47, pp. 30-35.

Wang, L., Li, Q., Sheng, C. & Lu, S., 2008. Effects of process parameters and two-way interactions on sink mark depth of injection molded parts by using de design of experiment method. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Issue 47, pp. 33-35.

Wang, L., Qian, L., Shen, C. & Lu, S., 2008. Effects of Process Parameters and Two-Way Interactions on Sink Mark Depth of Injection Molded Parts by Using the Design of Experiment Method. *Volumen 47*, pp. 30-35.

Yin, Q., Dong, A., Wang, J. & Yin, Y., 2008. Rheological and thermal behavior of starch/LDPE blends containing EAA. *Polymer Composites*, Issue 29, pp. 745-749.

Zhang, Z. & Jiang, B., 2007. Optimal Process Design of Shrinkage and Sink Marks in Injection Molding. *Journal of Wuhan University of Technology*, 22(3), pp. 404-408.

Zhou, J. & Turng, L.-S., 2007. Process Optimization of Injection Molding Using an Adaptive Surrogate Model With Gaussian Process Approach. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, *Volumen 47*, p. 684–694.

ANEXOS

Anexo 1 Hoja técnica del material utilizado en la investigación.



PROFAX

6331

HOJA DE DATOS DE PRODUCTO

Homopolímero de Polipropileno para Usos Generales y Fibra.

El Pro-fax 6331 es un homopolímero de polipropileno para usos generales, y aplicaciones de fibra, está diseñado para máquinas de extrusión e inyección de tornillo. Se produce en Indelpro usando el proceso Spheripol. El Pro-fax 6331 está disponible en forma de gránulo (pellet).

La resina base de este producto, cumple con los requerimientos contenidos en el código 21 CFR 177.1520 (a) (1) (i) y (c)1.1a. Y de acuerdo a nuestra información, los demás ingredientes utilizados en este producto cumplen con los requerimientos regulados con respecto a FDA y en 21 CFR 177.1520(b). Este producto cumple con los requerimientos del criterio FDA en 21 CFR 177.1520 para aplicaciones de contacto con alimentos, listados para condiciones de uso C, D, E, F, G, H en 21 CFR 176.170 (c), Tabla 2 y puede ser usado en contacto con todo tipo de alimentos, listados en 21 CFR 176.170 (c), Tabla 1.

Características: Aplicaciones Típicas:

- Alta rigidez. • Inyección en general.
 - Durabilidad al envejecimiento térmico. • Artículos institucionales/del hogar
 - Excelente resistencia a los químicos y solventes. • Extrusión de fibra.
 - Buena resistencia a la intemperie. • Multifilamento y Monofilamento.
 - Distribución de peso molecular estándar. • Película No Orientada - Cast Film.
- PRO-FAX 6331: USOS GENERALES Y FIBRA; APROPIADO PARA CONTACTO CON ALIMENTOS.

PROPIEDADES FISICAS TIPICAS (a) VALOR TIPICO METODO ASTM (b)

- Índice de fluidez (MFR), dg/min 12 D1238
- Resistencia a la tensión en el punto de cedencia, N/mm² (psi) 36 (5,220) D638
- Resistencia al impacto Izod con muesca a 23°C, J/m (ft-lb/in) 33 (0.67) D256A
- Alargamiento en el punto de cedencia, % 11 D638
- Módulo de flexión, N/mm² (psi) 1,520 (220,400) D790B
- Densidad, g/cm³ 0.9 D792A
- Dureza Rockwell, escala R 100 D785A
- Temperatura de deflexión a 0.46 N/mm² (66 psi), °C (°F) 97 (207) D648
- Punto de ablandamiento VICAT (2kg/mm²) °C (°F) 151 (304) D1525

(a) Los valores mostrados aquí son promedios y no deberán ser interpretados como especificación.

(b) Los Métodos de prueba ASTM son los últimos editados por la sociedad.

Con excepción de lo descrito aquí, INDELPRO, S.A. de C.V. no da garantías adicionales expresas o implícitas, como por ejemplo, garantías de comercialización o de aplicaciones específicas en el uso de este

material. La solución a cualquier reclamación con respecto al material, es la reposición del mismo y en ningún caso INDELPRO, S.A. de C.V. será responsable de daños incidentales o consecuenciales. El uso del

producto indica la aceptación de lo anteriormente mencionado.

MR Pro-fax es una marca registrada de basell Polyolefins Incorporated. Impreso en México

Producto fabricado en MEXICO bajo las normas y estándares acordados con basell Polyolefins 10/04/08

Anexo 2 Imágenes escaneadas con sus mediciones

