

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERA MECÁNICA E INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:
ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SIMULACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO DEL CRECIMIENTO DE ESPUMA DE
POLIURETANO DENTRO DE UN MOLDE POR MEDIO DE LA
UTILIZACIÓN DE UN SOFTWARE ESPECIALIZADO CON RELACIÓN A
LA APLICACIÓN PRÁCTICA**

**AUTORES:
SANDOVAL BORJA PABLO MARCELO
SILVA CARGUA MARÍA ALEJANDRA**


**DOCENTE TUTOR:
CABRERA MORETA VÍCTOR HUGO**

Quito, marzo de 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Sandoval Borja Pablo Marcelo, con documento de identificación N° 171331220-3 y Silva Cargua María Alejandra, con documento de identificación N° 220008048-5, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CRECIMIENTO DE ESPUMA DE POLIURETANO DENTRO DE UN MOLDE POR MEDIO DE LA UTILIZACIÓN DE UN SOFTWARE ESPECIALIZADO CON RELACIÓN A LA APLICACIÓN PRÁCTICA”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera Mecánica e Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Sandoval Borja Pablo Marcelo

C.I. 171331220-3



Silva Cargua María Alejandra

220008048-5

Quito, marzo del 2018.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el proyecto de titulación, “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CRECIMIENTO DE ESPUMA DE POLIURETANO DENTRO DE UN MOLDE POR MEDIO DE LA UTILIZACIÓN DE UN SOFTWARE ESPECIALIZADO CON RELACIÓN A LA APLICACIÓN PRÁCTICA” realizado por Sandoval Borja Pablo Marcelo y Silva Cargua María Alejandra, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2018



Cabrera Moreta Víctor Hugo

C.I. 171486465-7

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado, en primer lugar, a Dios, a toda mi familia, quienes se han convertido en el motor para lograr mis sueños y, muy especialmente, a mi padre quien con su ejemplo sembró la tenacidad de mi espíritu.

Pablo

El presente trabajo va dedicado a Dios por permitirme culminar con éxito mis metas personales y profesionales, por su ayuda eterna al facilitarme las cosas durante este proceso y porque sin su gloria nada es posible; a mi madre que, aunque estando lejos siempre me ha brindado su infinito amor, paciencia y apoyo incondicional; a mi padre quien es mi guía y me ha enseñado que la base para culminar todo propósito es la humildad; a mi hermana por su cariño. A mis familiares por ser parte importante en la culminación de mi proyecto, a las personas que ya no están conmigo, pero fueron pieza fundamental en la toma de mis decisiones; y a la vida que a pesar de los golpes duros y sorpresivos que me ha dado, me ha permitido ser mejor día a día; pero, sobre todo, me ha ayudado entender su valor.

María Alejandra

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento a todos quienes aportaron un granito de arena para hacer posible la culminación de este trabajo; especialmente a nuestro tutor, Ingeniero Víctor Hugo Cabrera, quien nos brindó su predisposición para la elaboración de este sueño.

Pablo

Agradezco la colaboración para la entrega de este trabajo a la Universidad Politécnica Salesiana y a todos sus colaboradores.

A mi tutor, el Ingeniero Víctor Cabrera, por sus aportes, observaciones y, principalmente, por su compromiso en la ejecución del presente trabajo.

También debemos agradecer al Ingeniero Fernando Toapanta, docente que aportó con su granito de arena para la realización de la simulación de este proyecto.

Muchas gracias a todas las personas que conforman la Carrera de Ingeniería Mecánica ya que con su colaboración y guía me permitieron culminar con éxito mis estudios.

María Alejandra

ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1.....	4
MARCO TEÓRICO	4
1.1. Polímeros	4
1.2. Clasificación de los polímeros	4
1.2.1. Según su forma.....	4
1.2.1. Polímeros lineales	4
1.2.1.2 Polímeros ramificados.....	5
1.2.2. Según el tipo de sus monómeros:.....	5
1.2.2.1. Homopolímeros.....	5
1.2.2.2. Copolímeros	5
1.2.3. Según su origen	6
1.2.3.1. Polímeros naturales	6
1.2.3.2. Polímeros sintéticos	6
1.2.4. Según sus propiedades físicas	7
1.3. Poliuretano	8
1.3.1. Polioliol	10
1.3.2. Isocianato	11
1.4. Moldes.....	13
1.4.1. Diseño de moldes	13
1.4.2. Tipos de moldes	13
1.4.2.1. Moldes en resina epoxi.....	14
1.4.2.2. Moldes de aluminio.....	15
1.5. Elementos finitos.....	16
1.5.1. Aplicación del método	18

1.5.1.1. Aplicaciones de elementos finitos.....	18
1.5.1.2. Cálculos por el método de elementos finitos	21
1.5.1.3. Aplicación de elementos finitos en la simulación del poliuretano.....	23
1.6. Reacciones químicas del poliuretano	26
1.6.1. Reacción de gelificación	26
1.6.2. Reacción de soplado.....	26
CAPÍTULO 2.....	27
DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA SIMULACIÓN DE	
CRECIMIENTO DE POLIURETANO POR MEDIO DE UN SOFTWARE	
ESPECIALIZADO.....	27
2.1. Determinación de parámetros	27
2.2. Determinación de casos de estudio	27
2.2.1. Densidad de espuma.....	28
2.2.2. Líneas de soldadura.....	30
2.2.3. Atrapamientos de aire	30
2.3. Simulación de casos de estudio.....	31
2.3.1. Simulador	31
2.3.1.1. Introducción de parámetros para simulación	32
2.3.1.1.1. Tratamiento de sólido.....	32
2.3.2. Simulaciones	43
CAPÍTULO 3.....	66
VALIDACIÓN DE DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN Y	
COMPARACIÓN CON DATOS REALES.....	66
4.1. Parámetros de prueba	66
4.2. Resultados de prueba física	68
CAPÍTULO 4.....	72
ANÁLISIS DE COSTOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ...	72
4.1. Análisis de costos	72
4.2. Conclusiones y recomendaciones	76
4.2.1. Conclusiones	76
4.2.2. Recomendaciones.....	77
Referencias.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	43
Tabla 2.....	50
Tabla 3.....	51
Tabla 4.....	62
Tabla 5.....	63
Tabla 6.....	65
Tabla 7.....	66
Tabla 8.....	69
Tabla 9.....	73
Tabla 10.....	74
Tabla 11.....	74
Tabla 12.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Esquema de formación de un polímero. Fuente: [2].....	4
Fig. 2. Polímeros según su forma lineales y ramificados. Fuente: [21]	5
Fig. 3 Estructura de polímeros según el tipo de monómeros. Fuente: [3]	6
Fig. 4. Cadenas de monómeros. Fuente: [2].....	7
Fig. 5. Cadena de polímero de poliuretano. Fuente: [4].....	9
Fig. 6. Estructura química del isocianato. Fuente: [4]	11
Fig. 7. Descripción gráfica simplificada de la producción de TDI. Fuente: [4] ..	12
Fig. 8. Descripción gráfica simplificada de la producción de MDI. Fuente: [4] ..	13
Fig. 9. Molde de resina epoxi para la inyección de poliuretano. Fuente: [30].....	14
Fig. 10. Molde de aluminio para inyección de poliuretano. Fuente: [30].....	15
Fig. 11. Condiciones en los sistemas a analizar, método de elementos finitos. Fuente: [10].....	17
Fig. 12. Discretización empleando elementos triangulares. Fuente: [26]	18
Fig. 13. Discretización pobre. Fuente: [9].....	19
Fig. 14. Discretización adecuada. Fuente: [9].....	20
Fig. 15. Curva de viscosidad de poliuretano. Fuente: [16]	23
Fig. 16. Curva PVT poliuretano. Fuente: [16]	24
Fig. 17. Curva de capacidad calorífica PU. Fuente: [16].....	24
Fig. 18. Curva de curado del poliuretano. Fuente: [16]	25
Fig. 19. Propiedades mecánicas del material. Fuente: [16].....	25
Fig. 20. Modelo de almohada 600x400x140 milímetros. Elaborado por: Modelo matemático Pablo Sandoval, María Silva	29
Fig. 21. Cuadro de diálogo "Propiedades Autodesk Inventor" volumen del modelo matemático. Elaborado por: Modelo matemático Pablo Sandoval, María Silva ..	29
Fig. 22. Parte inyectada en donde se puede apreciar una línea de unión. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva.....	31
Fig. 23. Parte inyectada en donde se puede apreciar: a) atrapamiento de aire superficial, b) atrapamiento de aire interno. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva	31
Fig. 24. Paso 1, importación de modelo 3D desde un programa de diseño. Fuente: [16].....	33

Fig. 25. Paso 2, ingreso de colada, para el caso del poliuretano se crea un lugar por donde ingresará la mezcla de isocianato y polioliol en uno o varios puntos definidos. Fuente: [16]	34
Fig. 26. Paso 3, ingreso de dimensiones y tipo de sistema de enfriamiento y apertura de molde. Fuente: [16]	34
Fig. 27 Paso 4, definición de parámetros para la generación de una malla que permita una simulación exacta. Fuente: [16]	35
Fig. 28 Paso 4, exportación y verificación de la parte mallada. Fuente: [16].....	35
Fig. 29. a) Mallado con parámetros por defecto de Moldex3D b) pérdida de precisión en curvaturas de modelo matemático, c) valores resultado del mallado del modelo. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva	36
Fig. 30. a) Mallado con distancia entre nodos de 20mm b) mallado en modelo matemático, c) valores resultado del mallado del modelo. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva	37
Fig. 31. a) Mallado con distancia entre nodos de 10mm b) mallado en modelo matemático, c) valores resultado del mallado del modelo. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva	37
Fig. 32. Paso 1, configuración de proyecto. Fuente: [16]	38
Fig. 33. Paso 2, ingreso de sólido mallado. Fuente: [16].....	38
Fig. 34. Paso 3, a) cuadro de dialogo para definir el material desde la librería de Moldex3D, b), c), d), e), características propias de cada material para el caso de la simulación se escoge el material PU-2, f), g) modelos matemáticos que rigen las curvas características de cada propiedad del material. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	39
Fig. 35. Paso 4, Cuadro de diálogo para ingreso de parámetros del proceso como son b) presiones de inyección, c) tiempos y presiones de llenado, d) cantidad de material a inyectarse, e) temperaturas de molde, f) resumen de parámetros. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva	40
Fig. 36. Paso 5, a) ingreso de parámetros de cálculo como son b) gravedad, presión atmosférica, temperatura ambiente y c) con o sin ventilas de salida de aire. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva	41
Fig. 37. Paso 6, verificación de los datos ingresados como parámetros de la simulación. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva42	

Fig. 38. Paso 7, Moldex3D crea un árbol de proyecto desde donde se inicia la corrida de la simulación. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	42
Fig. 39. Densidad de parte simulación 1ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	44
Fig. 40. Densidad de parte simulación 1ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	44
Fig. 41. Resultados aire atrapado de simulación 1ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	45
Fig. 42. Presión al interior del molde simulación 1ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	45
Fig. 43. Densidad de parte simulación 2ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	46
Fig.44. Densidad de parte simulación 2ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	46
Fig. 45. Resultados aire atrapado de simulación 2ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	47
Fig. 46. Presión al interior del molde simulación 2ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	47
Fig. 47. Densidad de parte simulación 3ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	48
Fig. 48. Densidad de parte simulación 3ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	48
Fig. 49. Resultados aire atrapado de simulación 3ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	49
Fig. 50. Presión al interior del molde simulación 3ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	49
Fig. 51. Resultados aire atrapado de simulación 1B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	52
Fig. 52. Líneas de unión en la parte simulación 1B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	52
Fig. 53. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 1B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	53

Fig. 54. Resultados aire atrapado de simulación 2B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	53
Fig. 55. Líneas de unión en la parte simulación 2B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	54
Fig. 56. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 2B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva	54
Fig. 57. Resultados aire atrapado de simulación 3B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	55
Fig. 58. Líneas de unión en la parte simulación 3B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	55
Fig. 59. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 3B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva	56
Fig. 60. Resultados aire atrapado de simulación 4B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	57
Fig. 61. Líneas de unión en la parte simulación 4B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	57
Fig. 62. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 4B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva	58
Fig. 63. Resultados aire atrapado de simulación 5B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	59
Fig. 64. Líneas de unión en la parte simulación 5B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	59
Fig. 65. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 5B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva	60
Fig. 66. Resultados aire atrapado de simulación 6B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	60
Fig. 67. Líneas de unión en la parte simulación 6B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	61
Fig. 68. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 6B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva	61
Fig. 69. Comparativo de la posición de concentración de aire al 99,9% de llenado de la cavidad con inclinaciones de 0 y 10 grados. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	63

Fig. 70. Resultados aire atrapado de simulación 1C. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	64
Fig. 71. Líneas de unión en la parte simulación 1C. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva.....	64
Fig. 72. Pantalla de ingreso de parámetros de inyección en máquina inyectora Krauss Maffei RSC4040. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva	67
Fig. 73. Molde de inyección de almohada 600x400x140 según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva.....	67
Fig. 74. Inyección de almohada 600x400x140 según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva	68
Fig. 75. Almohada 600x400x140 inyectada según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva	68
Fig. 76. Peso de la almohada 600x400x140 inyectada según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva.....	69
Fig. 77. Atrapamientos de aire en almohada 600x400x140 inyectada según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva.....	70
Fig. 78. Determinación de la densidad de almohada 600x400x140 inyectada según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva.....	70

RESUMEN

El presente trabajo consiste en realizar la simulación del crecimiento de la espuma de poliuretano dentro de un molde con la finalidad de optimizar recursos tales como material, mano de obra y tiempo, utilizados en la realización de ensayos repetitivos encaminados a encontrar la mejor opción dentro de un proceso productivo tanto en la incorporación de un nuevo producto como en la mejora de uno existente.

El poliuretano es un polímero formado por la reacción de cantidades específicas de isocianato y polioliol que da a lugar a la formación de burbujas como agente de crecimiento, este crecimiento hace que se ocupe el espacio vacío de la cavidad en donde fue depositado. Una de las mayores ventajas para el diseñador utilizando un software especializado es que le permite la fabricación eficaz de moldes previamente adaptados al proceso de inyección de poliuretano.

De lo expresado anteriormente es de suponer que para realizar el proceso de simulación del comportamiento de espuma de poliuretano dentro del molde se necesita determinar los parámetros necesarios que permitan realizar un sinnúmero de experimentos que al ser comparados entre sí develen la mejor opción al momento de construir el molde y obtener piezas físicas.

Se pudo comprobar que la variación de datos con relación a la práctica es mínima, por ende, se concluyó que la finalidad de una simulación es mejorar los procesos en áreas tales como el diseño del molde e, inclusive la producción de las partes y que esta mejora se ve reflejada en un desperdicio mínimo de material, tiempos menores de lanzamiento de productos y el consiguiente ahorro de dinero.

Palabras clave: Polímero, poliuretano, molde, simulación, parámetro, validar, MEF (método de elementos finitos).

ABSTRACT

This work involves the simulation of the growth of polyurethane foam inside a mold with the objective of optimizing resources such as materials, labor, and time, and utilizing them in the testing process in order to find the best option in the productive process, in both the incorporation of the new product as well as the improvement of already existing ones.

Polyurethane is a polymer formed by reactions of certain amounts of isocyanate and polyol that lead to the formation of bubbles as the agent of growth. Such growth allows the empty space in the cavity in which it was deposited to be filled. One of the primary advantages to the designer using specialized software is that it allows an efficient production of molds previously adapted to the process of injecting polyurethane.

This is assuming that in order to attain the simulation process of the polyurethane foam's behavior inside the mold, the necessary parameters must be determined in order to carry out several experiments that, when compared to each other, will reveal the best option in mold construction and obtaining the physical parts.

It has been proven that the errors in the data are minimal in connection with the practice, and therefore the conclusion reveals that the final objective of the simulation is to improve the processes in areas such as mold design as well as the pieces, and this improvement is reflected in a minimum waste of materials, less time dedicated to product launch and the subsequent cost effectiveness.

Key words: Polymer, polyurethane, mold, simulation, parameter, validate, FEA (finite elements analysis)

INTRODUCCIÓN

El poliuretano se ha convertido en uno de los principales elementos de construcción de partes y piezas especialmente en la industria automotriz. Es reconocido el hecho de que en dicha industria se requieren herramientas valederas para mejorar, especialmente, la productividad, reducir costos, eliminar desperdicios y ser amigables con el medio ambiente. De alguna manera los altos estándares aplicados a la fabricación de autopartes han ayudado significativamente a conseguir dichos objetivos.

Una de las principales herramientas que aportan para el mejoramiento continuo de los procesos productivos es la tecnología.

Esta tecnología expresada en su forma más actual constituye la utilización de diversos paquetes informáticos con aplicaciones muy especializadas que permiten el conocimiento anticipado del comportamiento de un sinnúmero de materiales.

Son extensamente utilizados en la fabricación de partes, permitiendo a los usuarios predecir y corregir los posibles defectos, además de analizar el desempeño que en el tiempo el diseñador desee darles a estas.

Debido a lo poco explorado de este tema dentro del medio, este estudio se apoyará de muchos documentos publicados en distintas partes del mundo y ayudará a incentivar el emprendimiento de actividades en campos similares.

- Planteamiento del problema

Al momento de la construcción de un molde para la fabricación de partes en espuma de poliuretano es común la localización de puntos de desfogue de gases y del aire que pueden contenerse dentro del molde.

El generar una estandarización de los movimientos del cabezal de inyección para el regado uniforme y controlado dentro del molde.

Todo esto con el fin de obtener un producto de óptima calidad y así un desperdicio mínimo de materias primas.

Estos procesos iniciales dentro de la fabricación de partes de espuma de poliuretano conllevan a confiar en el conocimiento adquirido por los inyectores o por los responsables del modelado. Dicho de otra manera, se trata de un proceso puramente empírico que exige realizar las primeras inyecciones del producto en la etapa de pre lanzamiento en función del método de prueba y error.

Con la simulación del crecimiento de la espuma de poliuretano dentro del molde se espera predecir la ubicación de estos desfogues e inclusive el emplazamiento óptimo del material dentro de la cavidad en la etapa del diseño en función de la forma de este.

Para conseguir este fin se debe tener en cuenta algunos factores externos como el clima, la presión atmosférica del lugar, partes estructurales internas de la pieza moldeada y demás parámetros propios del material a utilizar.

-Objetivo general

Simular el crecimiento del poliuretano dentro de un molde valiéndose de un software adecuado para este propósito y validar estos resultados de forma práctica.

-Objetivos específicos

Estudiar y entender el comportamiento, las fases de crecimiento y reacción química del poliuretano dentro de un molde de aluminio.

Determinar los diferentes parámetros que modifican el comportamiento del poliuretano en el proceso de moldeo.

Analizar resultados comparativos entre la simulación con el software y la práctica; además, proponer una nueva alternativa en el diseño de moldes para partes moldeadas en poliuretano.

Analizar costos de la aplicación de una simulación del crecimiento de poliuretano en contraparte a las formas tradicionales de desarrollo de partes.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Polímeros

Son aquellos que se forman a partir de la unión repetitiva de una molécula llamada monómero como se visualiza en la Fig. 1, pueden estar compuestos de miles de estas. Se puede encontrar polímeros naturales y sintéticos. [1]

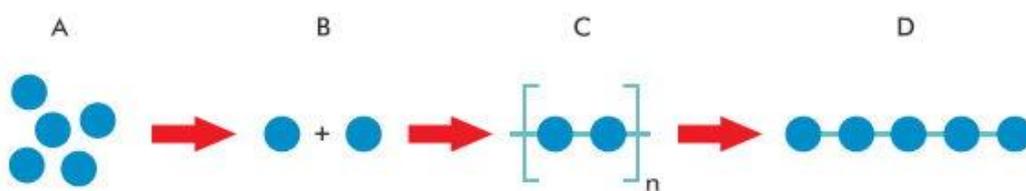


Fig. 1. Esquema de formación de un polímero. Fuente: [2]

Los monómeros son micro moléculas que se unen formando un polímero mediante el proceso de polimerización. [1]

1.2. Clasificación de los polímeros

Las múltiples aplicaciones que tienen los polímeros se dan gracias a la gran diversidad de características y propiedades que poseen, debido a su estructura. [2]

1.2.1. Según su forma

Si se tiene en consideración la forma del polímero se pueden clasificar en polímeros lineales y ramificados. [2]

1.2.1. Polímeros lineales

Este tipo de polímeros se crean cuando el monómero que lo constituye tiene dos puntos de enlace, de modo que el polímero se forma en una sola dirección, formando cadenas de tipo lineal, (Fig. 2). Estos polímeros son materiales blandos y moldeables. [2]

1.2.1.2 Polímeros ramificados

Estos polímeros ramificados se forman a partir de una cadena lineal con la excepción de que en sus partes laterales se forman enlaces, formando como se muestra en la Fig. 2, de modo que la polimerización ocurre tridimensionalmente, es decir, en las tres direcciones del espacio, los polímeros ramificados serán frágiles y rígidos. [2]

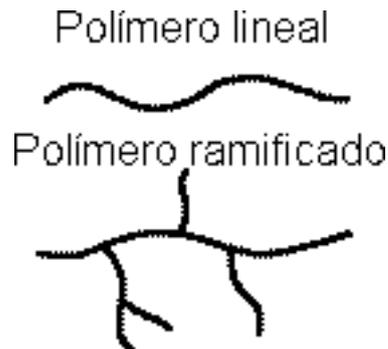


Fig. 2. Polímeros según su forma lineales y ramificados. Fuente: [21]

1.2.2. Según el tipo de sus monómeros:

Por otro lado, si se toma en consideración los tipos de monómeros que constituyen la cadena; se tiene los homopolímeros y los copolímeros, Fig. 3. [2]

1.2.2.1. Homopolímeros

Los homopolímeros son aquellos que se forman por la adhesión de una sola clase de monómeros, por ejemplo, polipropileno [2]

1.2.2.2. Copolímeros

En la Fig. 4 se observa que los copolímeros son aquellos en donde existen dos o más clases de monómeros, alternados indistintamente, en una cadena principal, por ejemplo, el poliuretano. [2]

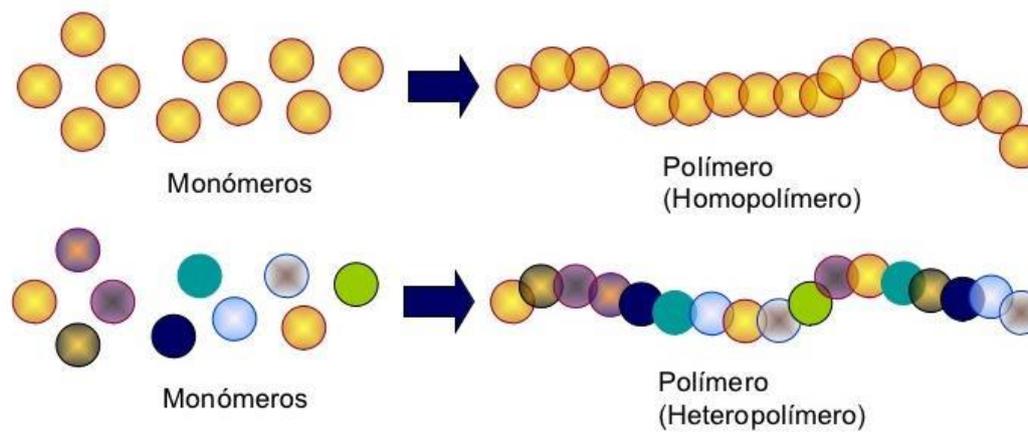


Fig. 3 Estructura de polímeros según el tipo de monómeros. Fuente: [3]

1.2.3. Según su origen

Finalmente, si se toma en consideración el origen de los polímeros, se puede encontrar a los naturales y sintéticos. [2]

1.2.3.1. Polímeros naturales

Estos polímeros se hallan en la naturaleza; siendo parte de seres vivos, entre ellos encontramos como los principales al almidón, la seda, caucho, celulosa, etc. [2]

1.2.3.2. Polímeros sintéticos

Se obtienen mediante procesos de producción en industrias o laboratorios, entre otros tenemos nylon, baquelita, PVC (policloruro de vinilo) y teflón. [2]

Cabe señalar, que tanto polímeros sintéticos como naturales se forman a partir de los mismos componentes; siendo un diferenciador entre ellos el método de obtención. [2]

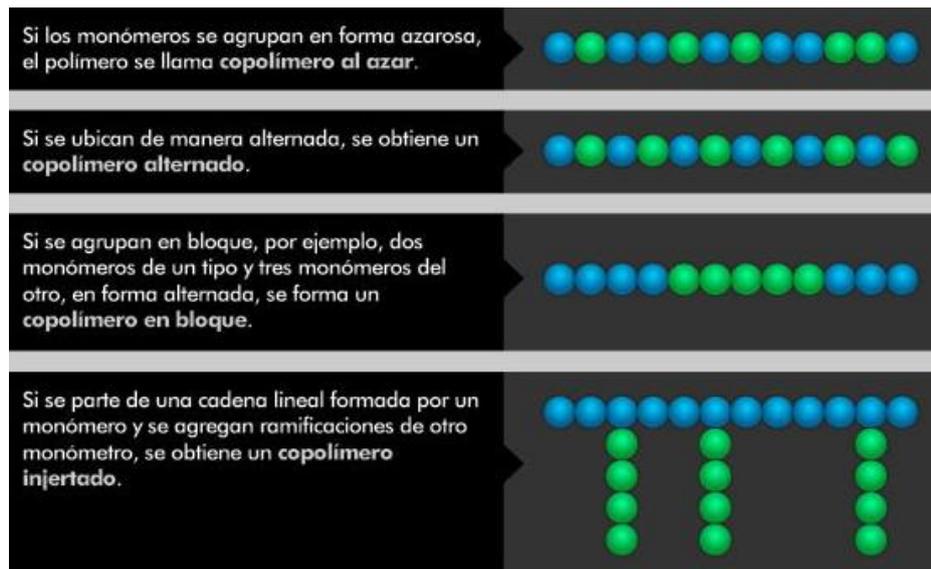


Fig. 4. Cadenas de monómeros. Fuente: [2]

1.2.4. Según sus propiedades físicas

Estos pueden ser:

- **Fibras:** Se trata de polímeros naturales y sintéticos que se caracterizan por tener moléculas estiradas y alargadas las cuales forman hilos largos con una gran resistencia sin dejar de ser delgados. Por ejemplo: algodón, lana, nailon, poliéster.
- **Elastómeros:** Pueden ser naturales y sintéticos, con la elasticidad como su característica principal. Por ejemplo, caucho y neopreno. [2]
- **Plásticos:** Polímeros sintéticos que se moldean por medio de la aplicación de calor y presión. Por ejemplo, PVC, poliestireno. Se pueden clasificar en función de las características térmicas que poseen en termoplásticos y termoestables. [2]
- **Termoplásticos:** Estos plásticos se ablandan cuando se aplican altas temperaturas y se rigidizan al enfriarse. Una vez que se hallan formados pueden llegar a fundirse fácilmente para poder ser remodelados en repetidas ocasiones. Son solubles en solventes orgánicos. Por ejemplo, polietileno, poliestireno, policloruro de vinilo o PVC, etc. [2]

Generalmente, los termoplásticos son reciclables, dado que sometidos a altas temperaturas se funden, pudiendo cambiar su forma sin modificar su estructura. [2]

- **Termoestables:** Son polímeros que únicamente pueden ser moldeados durante su proceso de conformado mediante calentamiento. Una vez fríos sus cadenas quedan permanentemente entrelazadas, formando una red imposible de ser modificada posteriormente. Son insolubles, rígidos y duros. Entre los más relevantes se tiene a la baquelita y el poliuretano. [2]

Este tipo de plásticos termoestables no son factibles de reciclar, puesto que su estructura al ser sometida a temperaturas elevadas presenta una modificación total. [2]

1.3. Poliuretano

El descubrimiento de la química del poliuretano se le atribuye a Otto Bayer junto con el equipo de investigación que dirigió en la empresa química I.G. Farben AG. La primera patente asociada con poliuretanos se presentó en 1937 y posteriormente I.G. Farben fue dividida después de la Segunda Guerra Mundial por complicidad en crímenes de guerra. Los principales líderes de la compañía fueron condenados por crímenes contra la humanidad. [4]

Las secuelas de esta empresa son Bayer AG y BASF SE, que siguen siendo muy grandes y los mayores productores de productos químicos de poliuretano. [4]

Después del descubrimiento inicial y los avances de la química básica, sobre todo basada en dioles de cadena corta y polioles de poliéster, los poliuretanos industriales vieron un crecimiento inmenso después del desarrollo de los polioles de poliéter por E.I. DuPont de Nemours and Co. y The Dow Chemical Co. Aunque Dow Chemical sigue siendo uno de los mayores fabricantes mundiales de productos químicos de poliuretano, DuPont ha salido de casi por completo del negocio del poliuretano que estaba principalmente relacionados con textiles y revestimientos. Mientras que los poliésteres siguen siendo componentes prominentes de la química del poliuretano, fue el procesamiento superior, la flexibilidad a baja temperatura y la estabilidad hidrolítica de polioles de poliéter que expandieron los polímeros de poliuretano en su aceptación actual en todos los aspectos de la vida moderna. [4]

Tan omnipresentes como son los poliuretanos, es sorprendente que representen una fracción relativamente menor (considerablemente significativa) del volumen global de consumo de plásticos. [4]

Las estructuras de los polímeros de estos productos básicos son unidades relativamente simples, su simplicidad es en gran parte responsable de su alto nivel de utilidad y relativo bajo costo. La industria de los plásticos ha generado variantes de las estructuras introduciendo ramificaciones, aún esas complejidades no alteran fundamentalmente la estructura polimérica básica. [4]

El poliuretano es un polímero que no se puede caracterizar por una estructura simple y representa una clase de polímeros, y cualquier polímero con una unidad de repetición de uretano, Fig. 5, se clasifica como un poliuretano independientemente de las otras estructuras funcionales o poliméricas incorporadas. [4]

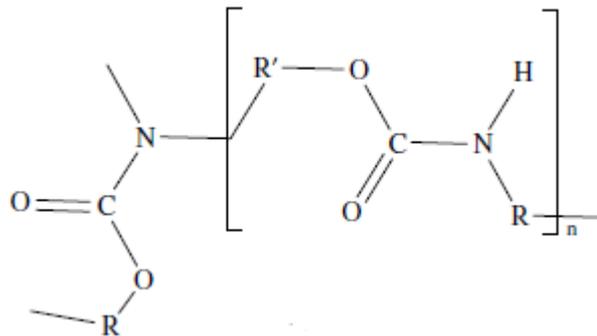


Fig. 5. Cadena de polímero de poliuretano. Fuente: [4]

Las estructuras de poliuretano específicas utilizadas para fabricar espuma de colchón, espuma aislante o espuma de zapato, son significativamente diferentes entre sí y no pueden representarse claramente. Incluso las estructuras de diferentes espumas aislantes varían tan ampliamente que tampoco podrían ser fácilmente representadas por una sola estructura. [4]

Otra diferencia con otros polímeros de productos básicos es que las aplicaciones de gran volumen de poliuretano requieren la mezcla de dos componentes líquidos reactivos a diferencia del procesamiento de un gránulo en un objeto moldeado o

extruido. Teniendo en cuenta estas complejidades, es notable que los poliuretanos se han convertido en una categoría de plástico y es un testimonio de versatilidad y rendimiento que se han tornado tan difíciles de reemplazar en sus aplicaciones. [4]

Los polímeros de poliuretano se fabrican a partir de bloques reactivos y polímeros de cadena corta (u oligómeros). Estos bloques pueden incluir categorías, tales como, poliisocianatos, poliéteres, poliésteres, agua y aminas [4]

Como categorías de bloques de construcción, tampoco pueden representarse por estructuras únicas y se denominan "R" para permitir a los diseñadores insertar cualquier unidad concebida, químicamente admisible. [4]

La estructura del poliuretano se confunde fácilmente con las estructuras relacionadas de poliéster, poliurea o poliamida (nylon). De hecho, las poliureas, poliésteres y poliuretanos son a menudo unidos en materiales constituyentes de poliuretano y ampliamente clasificados (las poliamidas no son parte de la química del poliuretano debido a características de procesamiento muy diferentes). [4]

Como productos básicos, los poliuretanos han logrado un cierto estatus en la ciencia académica. Sin embargo, la actividad en la industria del poliuretano no muestra signos de disminución, debido a su alto potencial de diseño e innovación [4]

1.3.1. Poliol

El término poliol se refiere simplemente a esqueletos poliméricos que contienen nominalmente dos o más grupos de hidroxilos. Los polioles son la materia prima de mayor volumen de utilización en aplicaciones de poliuretano con fracciones en peso que van desde el 90% en selladores flexibles, 70% en peso en espumas flexibles y hasta 30% en peso en espumas aislantes rígidas. Los polioles en las formulaciones de poliuretano tienden a proporcionar suavidad y flexibilidad, mientras que los isocianatos y los extensores de cadena de bajo peso molecular proporcionan dureza y rigidez a las estructuras poliméricas resultantes. [4]

Los polioles se producen con una gama de espigas ramificaciones y funcionalidades de hidroxilo que se pueden adaptar para satisfacer mejor el proceso de aplicación y los

requisitos según la propiedad deseada a obtenerse. Las ramificaciones del poliol más industrialmente significativas están basadas en éter y éster, mientras que un número menor de ramificaciones incluyen carbonatos, acrílicos y éteres derivados de tetrahidrofurano (THF) y se usan en aplicaciones de revestimientos, adhesivos y elastómeros de alto rendimiento. [4]

Existe una gran variedad de polioles que pueden utilizarse en la fabricación de espuma de poliuretano que para este estudio solo cabe mencionarlos como una referencia:

- Polioles de poliéter [4]
- Polioles de poliéster [4]
- Polioles alifáticos de poliéster [4]
- Polioles de poliéster aromáticos [4]
- Polioles de policarbonato [4]
- Polioles de poliacrilato [4]
- Polioles PHD (*polyharnstoff dispersión*) [4]
- Polioles PIPA (*polyisocyanate polyaddition*) [4]
- Polioles derivados de aceite de semillas [4]

1.3.2. Isocianato

Los isocianatos, especialmente los poli isocianatos, Fig. 6, están identificados con la química del poliuretano. Los isocianatos representan una clase de productos químicos que se caracterizan por su alta reactividad y versatilidad. Esta combinación de atributos positivos ha contribuido en gran medida a la amplia aplicación de materiales de poliuretano, mas es parte integrante de las complicaciones asociadas con los isocianatos. El atributo químico más importante de los isocianatos es su reactividad con moléculas que contienen hidrógenos activos, estos hidrógenos activos se encuentran típicamente en moléculas que poseen componentes de alcohol, amina y agua. [4]



Fig. 6. Estructura química del isocianato. Fuente: [4]

A diferencia de los polioles en los que hay muchas variedades dadas principalmente por el avance tecnológico, para el caso de los isocianatos se pueden distinguir básicamente dos tipos; en un caso el basado en el tolueno para obtener diisocianato de tolueno (denominado TDI) (Fig. 7) y en el segundo caso basado en la anilina y formaldehído para preparar diisocianato de difenilmetano (denominado MDI) (Fig. 8). [4]

Un componente clave para la fabricación del TDI e isocianatos, en general, es el fosgeno y se produce por la reacción en fase de vapor de monóxido de carbono con cloro, asociados a este gas, se tienen graves problemas de salud y seguridad por la exposición al fosgeno [4], dentro de la empresas que usan este tipo de isocianato se gastan una cantidad de energías y recursos en evitar la exposición prolongada a este agente contaminante derivado de la reacción necesaria para producir poliuretano.

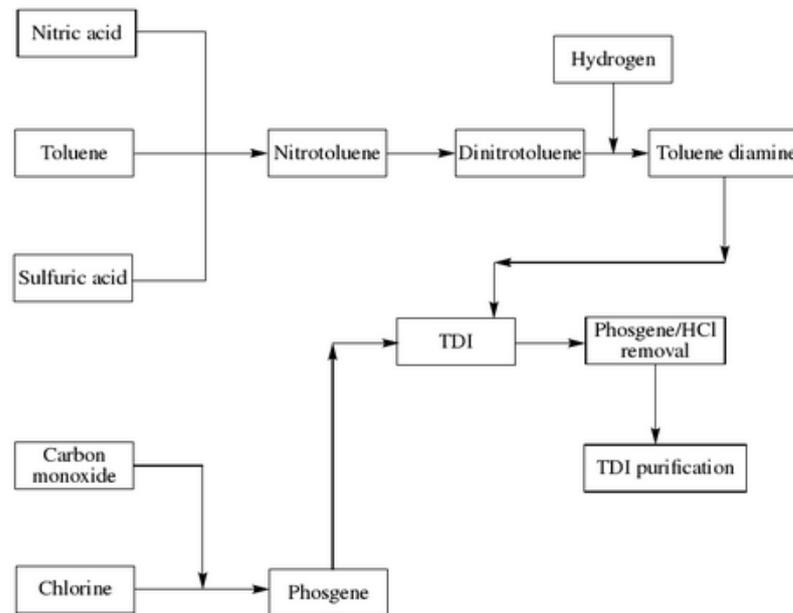


Fig. 7. Descripción gráfica simplificada de la producción de TDI. Fuente: [4]

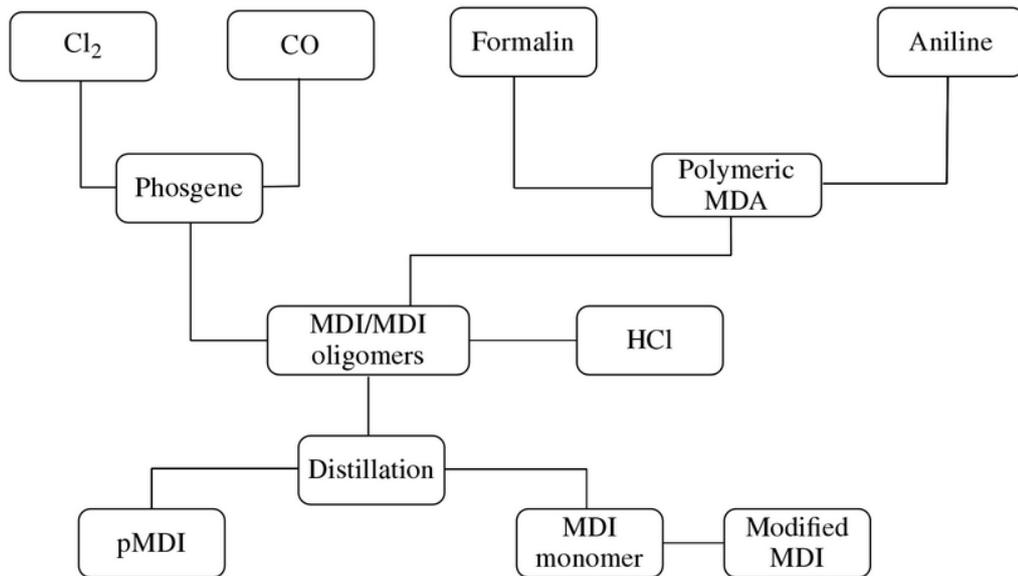


Fig. 8. Descripción gráfica simplificada de la producción de MDI. Fuente: [4]

1.4. Moldes

1.4.1. Diseño de moldes

La obtención final de un producto depende mucho del diseño y fabricación del molde, Xu, Jingyi y Lih-Sheng Turng [5] indica que es de vital importancia un diseño adecuado de los moldes porque acorde a ello, se determina la forma final de la pieza, el uso de materia prima y sobre todo el acabado de la pieza o producto. [5]

El diseño óptimo del molde puede reducir el desperdicio de la materia prima, basándose en el rendimiento único del moldeo con espumación microcelular, se mejorará el diseño del molde para satisfacer los requisitos especiales de moldeo por inyección microcelular. [5]

1.4.2. Tipos de moldes

El poliuretano es un material que permite un sin número de aplicaciones debido a su gran variedad tales como, elastómeros, espumas rígidas y espumas flexibles, variando sus densidades libres de 80 kg/m^3 a 1200 kg/m^3 . [6]

Se fabrican principalmente dos tipos de moldes:

- Moldes fabricados en resina epoxi de colada con porta molde metálico y, [6]
- Moldes mecanizados directamente en duraluminio. [6]

1.4.2.1. Moldes en resina epoxi

El fabricante moldes y matrices [7] nos explica como la utilización de resinas cargadas con aluminio transmiten mejor el calor que las convencionales lo que ayuda a reducir los tiempos y las temperaturas de curado. [7]

Los moldes fabricados en resina epoxi, (Fig. 9), implican un costo de fabricación menor a los de aluminio y se los realiza de forma artesanal, basándose en plantillas y modelos endurecidos de la parte final. [7]

La presencia de aluminio permite nivelar los picos de temperatura en los moldes, y las tensiones que pueden provocar, prolongando sensiblemente la vida útil del molde. Los coeficientes de expansión térmica tanto de la resina epoxi como del aluminio son muy similares y lineales; por lo que, los laminados realizados con estas resinas resistirán a numerosos ciclos de calentamiento/enfriamiento. Esta característica

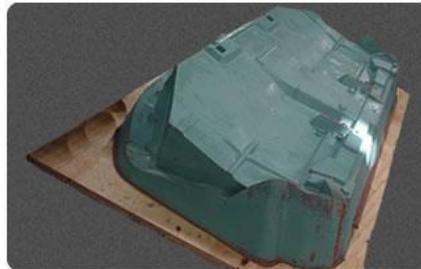


Fig. 9. Molde de resina epoxi para la inyección de poliuretano. Fuente: [30]

convierte a estos moldes en ideales para *solid surface* (superficie sólida) donde se inyecta resina polyester con cargas, para moldes de termo conformado, moldes para pre-impregnados, etc. Los moldes fabricados con este sistema cargado con aluminio producen más piezas que los laminados con resinas convencionales. [7]

1.4.2.2. Moldes de aluminio

Es el material más aconsejable para construir los moldes, (Fig. 10). Su dureza hace más sencillo el control de temperatura y permite aumentar la presión de cierre del molde. [8]

- **Moldes de duraluminio:** Los bloques de aluminio laminado de alta dureza permiten fabricar moldes con mucha rapidez y con acabados de gran calidad, pudiendo ser grabados al ácido. Su excelente capacidad de transmisión del calor ayuda a mantener el molde a la temperatura adecuada. [8]
- **Moldes de fundición de aluminio re mecanizado:** Con estos moldes se puede ofrecer un precio de molde muy competitivo, la transmisión de temperatura también es muy buena, es una tecnología que no brinda una gran dureza del molde y además puede dar problemas de acabado, no pudiéndose grabar el ácido, tampoco posee la durabilidad del duraluminio. [8]

Cada pieza debe estudiarse en profundidad, teniendo en cuenta todos los datos disponibles para decidir cuál es el mejor material para la construcción del molde. [8]



Fig. 10. Molde de aluminio para inyección de poliuretano. Fuente: [30]

1.5. Elementos finitos

El método del elemento finito es una técnica numérica para resolver problemas que se describen por ecuaciones diferenciales parciales o que a su vez ser formulados por medio de una minimización de un funcional (cálculo variacional). [9]

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. [10]

De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no. [10]

En cualquier sistema a analizar, (Fig. 11), se puede distinguir entre:

- **Dominio:** Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema. [10]
- **Condiciones de contorno:** Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor. [10]
- **Incógnitas:** Variables del sistema que se desea conocer después de que las condiciones de contorno han actuados sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas. [10]

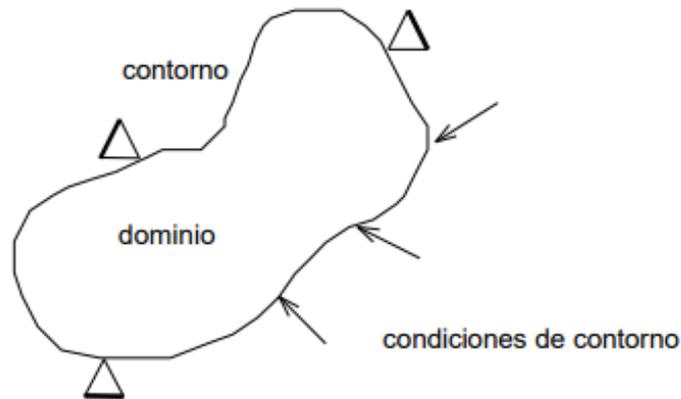


Fig. 11. Condiciones en los sistemas a analizar, método de elementos finitos. Fuente: [10]

El método de elementos finitos es un método de aproximación de problemas, de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de elementos, cuyo comportamiento es determinado mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”, Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con su adyacente. [10]
- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de elementos. [10]
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser funciones en los nodos. [10]
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas *funciones de interpolación o funciones de forma*. [10]

El MEF (método de elementos finitos), por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos. [11]

1.5.1. Aplicación del método

1.5.1.1. Aplicaciones de elementos finitos

Existen diferentes aplicaciones del método de elementos finitos, que van desde la simulación de flujo de fluidos, el análisis de esfuerzos estructurales, la transferencia de calor y el análisis multifenómeno para la determinación de secuencias mecánicas. [12]

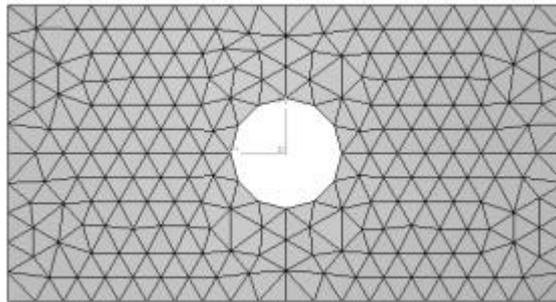


Fig. 12. Discretización empleando elementos triangulares. Fuente: [26]

Alejandro Cruz Santos [9] explica que el método de elementos finitos es una herramienta poderosa de análisis que permite obtener soluciones aproximadas a una amplia variedad de problemas de mecánica en el medio continuo. El primer indicio es que una región de solución puede ser modelada analíticamente reemplazándola con un arreglo de elementos discretos (Fig. 12).

Esto permite reducir un número infinito de incógnitas del problema a uno con un número finito de incógnitas. Por otro lado, el método también permite variar las condiciones (parámetros elásticos, viscosidad, densidad, temperatura, etc.) de los elementos individualmente o en grupos de acuerdo con las ecuaciones constitutivas que se empleen en el problema. [9]

Alejandro Cruz Santos [9] indica que el método de elementos finitos trabaja dividiendo la región de solución en elementos y expresando las incógnitas en términos de funciones aproximadas dentro de cada elemento.

En turno, las funciones aproximadas se expresan en términos de valores de la variable de campo para ciertos puntos llamados nodos o puntos nodales. El conjunto de nodos configura una malla o rejilla de solución para el problema. [9]

Esta malla puede o no seguir la configuración física del campo. Por ejemplo, se traslada el problema al campo de solución matemático, cuyas fronteras no obtienen coincidencia con las orillas del cuerpo físico. [9]

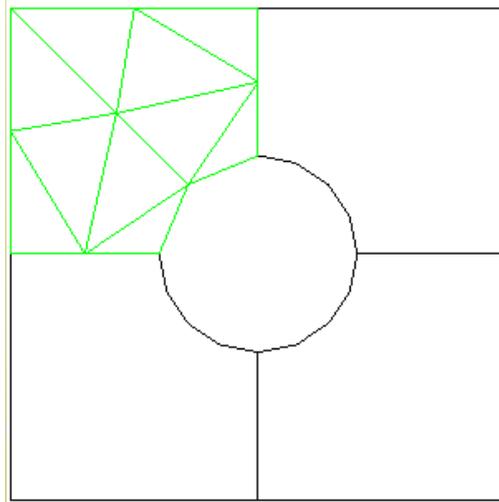


Fig. 13. Discretización pobre. Fuente: [9]

En la Fig. 13 se puede apreciar un sistema de discretización no adecuado en donde la aproximación de resultados tendrá una gran variación en comparación con la Fig. 14, que presenta una discretización correcta con una precisión mayor en sus soluciones. [9]

Existen básicamente cuatro maneras de formular las ecuaciones del sistema: [9]

- **Aproximación directa**

Las ecuaciones del sistema se ensamblan directamente de las ecuaciones que gobiernan el problema. [9]

Desventaja: Sólo se pueden analizar elementos de formas o geometrías simples. [9]

- **Aproximación variacional**

En esta alternativa, se requieren usar funciones obtenidas del cálculo variacional, es decir, encontrando los valores extremos de un funcional (por ejemplo, la energía potencial). [9]

Ventaja: Se pueden usar formas de elementos tanto simples como complejos. [9]

- **Aproximación de residuales pesados (*weighted residuals*)**

En esta forma se traslada el problema del campo de solución físico al campo de solución puramente matemático. [9]

Ventaja: Puede aplicarse en problemas donde no se cuenta con un funcional adecuado. [9]

- **Aproximación de balance de energía**

Muy empleado en casos de mecánica de sólidos. Se basa en el balance de la energía térmica o mecánica del sistema. [9]

Ventaja: Puede aplicarse en problemas donde no se cuenta con un funcional adecuado. [9]

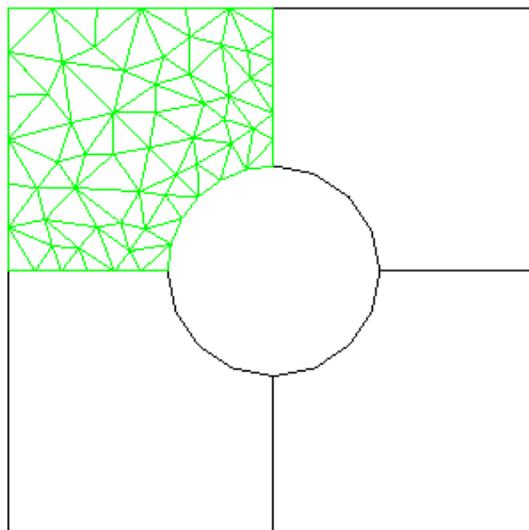


Fig. 14. Discretización adecuada. Fuente: [9]

1.5.1.2. Cálculos por el método de elementos finitos

- Datos y resultados

Los datos básicos que se requieren para llevar a cabo un cálculo por el MEF son los siguientes: [13]

-Definición de la geometría del dominio de cálculo y discretización del mismo

Esto se hace dando una lista de nodos y de elementos. Cada nodo es un punto dentro del dominio de cálculo y se define mediante un número de orden o etiqueta identificativa (número de nodo) y sus coordenadas en el sistema de referencia elegido. [13]

El conjunto de nodos y elementos constituye lo que se conoce como mallado o malla de elementos finitos. [13]

-Atributos o propiedades de los elementos

Estas propiedades dependen de la clase de elemento finito que se esté utilizando. Así como en todos los casos hay que identificar el material que constituye el subdominio o elemento, existen otros atributos que necesitan o no ser especificados en función del problema y el tipo de elemento. Ejemplos típicos son: el espesor, la sección transversal y su orientación en el espacio. [13]

-Propiedades de los materiales

Cada material se identifica mediante un número o etiqueta. A cada material se le asocia un modelo matemático para representar su comportamiento (elasticidad, plasticidad, hiperelasticidad) y se definen en cada caso los parámetros numéricos del modelo matemático elegido (por ejemplo, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, tensión de fluencia). El modelo matemático de comportamiento del material se conoce muchas veces con el nombre de modelo constitutivo o ley de comportamiento. [13]

-Condiciones de contorno

En otro tipo de problemas, no mecánicos, también puede hacerse la distinción entre estas dos clases de condiciones de contorno. Por ejemplo, en problemas de transferencia de calor, las condiciones de contorno en desplazamientos corresponden a temperaturas

impuestas; y las condiciones de contorno en fuerzas o acciones corresponden a flujos o fuentes de calor. [13]

-Otros datos

Los datos que se mencionan en los puntos anteriores son imprescindibles en cualquier cálculo por elementos finitos. Existen otras clases de datos que pueden no ser necesarios en función del tipo de problema que se trate de resolver. Se puede pensar, por ejemplo, en datos de condiciones iniciales del dominio (tensión, velocidad, temperatura), en relaciones impuestas entre el movimiento de diferentes nodos (vínculos cinemáticos). A partir de los datos anteriores, los resultados básicos que proporciona un cálculo por elementos finitos corresponden a dos grandes categorías: [13]

- *Variables nodales*

Son los resultados que definen la variable de campo incógnita básica o sus derivadas con respecto al tiempo. Dependiendo del problema, son los desplazamientos, giros, velocidades, temperaturas, etc. Se trata de valores que se obtienen directamente en los nodos del mallado y su orden de aproximación suele ser bastante bueno, aun con discretizaciones muy gruesas. En esta categoría se incluyen también las reacciones en los puntos a los que se aplican condiciones de contorno en desplazamientos. [13]

- *Variables elementales*

Son los resultados que corresponden a campos derivados del campo incógnita básica a través de derivadas espaciales. Son, por ejemplo, los campos de deformaciones, tensiones, flujo de calor, etc. Se trata de resultados calculados en puntos internos de los elementos, aunque a veces se extrapolen luego a los nodos. Su orden de aproximación es peor que el de las variables nodales: si se utilizan discretizaciones gruesas pueden cometerse errores importantes. [13]

Para la realización de la simulación del comportamiento de crecimiento de espuma de poliuretano, el mallado usado por el software está sujeto a métodos algebraicos, es decir se realiza un cálculo para determinar la posición de los nodos en la red, de tal manera que los elementos que resultan posean características como tamaño y regularidad, como lo estipula Alejandro Días Morcillo. [14]

Uno de los métodos más usados en el cálculo de coordenadas nodales, es el denominado algebraico, en este procedimiento se enfatizan las conjeturas de transformación en geometrías canónicas y de interpolación infinita. Como primera parte, el dominio original se convierte en un continuo canónico es decir su contorno es discretizado, como, por ejemplo, un rectángulo. [14]

1.5.1.3. Aplicación de elementos finitos en la simulación del poliuretano

Moldex3D, maneja el estudio de los nodos por medio del mallado, mediante la utilización de modelos matemáticos para el cálculo de parámetros tales como la viscosidad del material, presión, volumen, temperatura, curado, formación de espumado, capacidad calorífica, conductividad térmica y propiedades mecánicas del material, sin dejar atrás a las reacciones químicas del poliuretano. [15]

Moldex3D pre establece curvas de comportamiento del material para los parámetros antes mencionados.

-Viscosidad

La curva de viscosidad del material seleccionado se muestra en la ventana de datos del material (Fig. 15). [16]

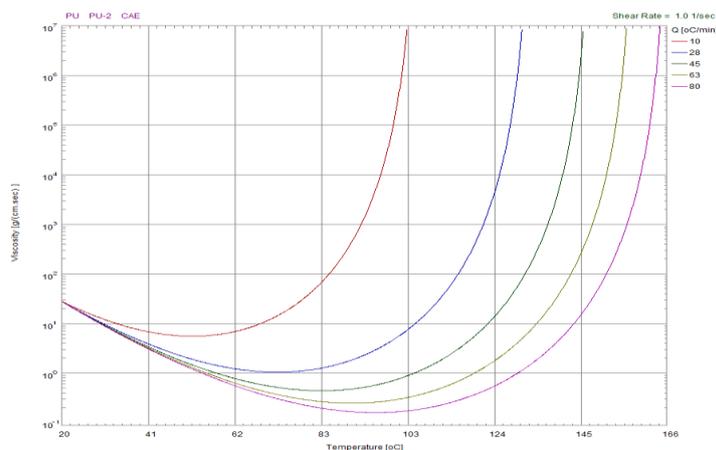
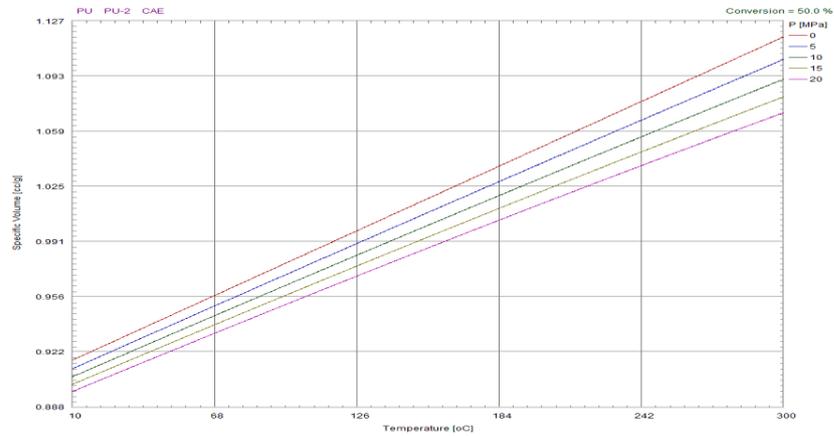


Fig. 15. Curva de viscosidad de poliuretano. Fuente: [16]

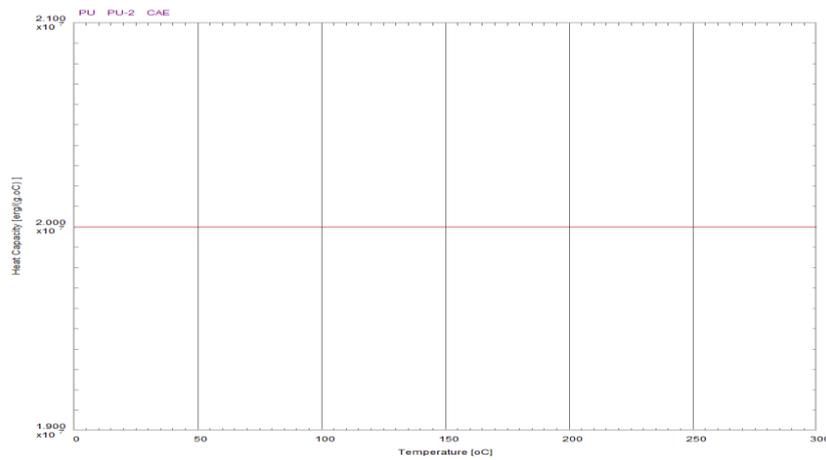
-PVT

Las curvas PVT (presión, volumen, temperatura) del material seleccionado se muestran en la ventana de datos del material (Fig. 16). [16]



-Capacidad calorífica

La curva de capacidad calorífica (C_p) del material seleccionado se muestra en la ventana de datos del material (Fig. 17). [16]



-Curado

El gráfico curado muestra el porcentaje de conversión a diferentes temperaturas y diferentes tasas de condición de aumento de temperatura ($^{\circ}\text{C} / \text{min}$). [16]

La conversión representa el grado de reacción química en la formación de la espuma. Cuanto mayor sea la conversión de espuma, más gas se producirá y mayor generación de gas dará como resultado una expansión de volumen con menor densidad. [16]

En general, una temperatura más alta causa una mayor tasa de conversión de espuma (Fig. 18). [16]

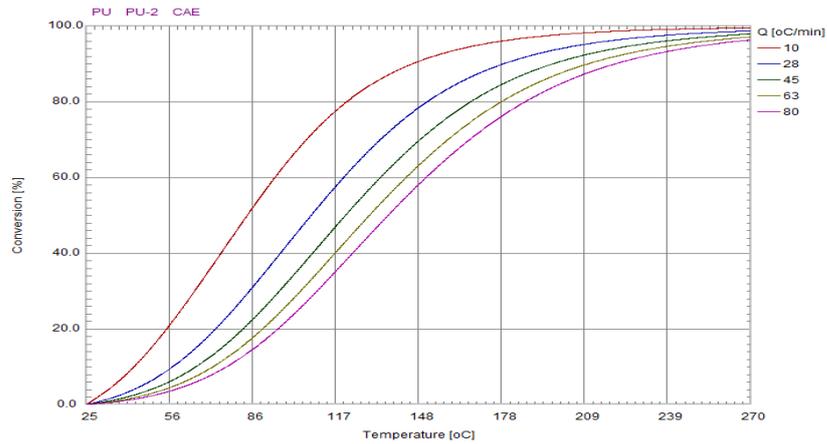


Fig. 18. Curva de curado del poliuretano. Fuente: [16]

-Propiedades mecánicas

Muestra las propiedades mecánicas, incluidas las relaciones de Poisson (PR), el módulo elástico (EM) y el CLTE (Coeficiente de expansión térmica lineal) (Fig. 19). [16]

Polymer Grade Name Producer	PU PU-2 CAE
Mechanical Properties	Pure polymer - Isotropic properties
Elastic Modulus	1e+010 (dyne/cm ²)
Poisson's Ratio	0.3 (-)
CLTE(solid)	6e-005 (1/K)

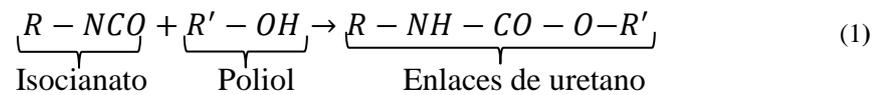
Fig. 19. Propiedades mecánicas del material. Fuente: [16]

1.6. Reacciones químicas del poliuretano

La siguiente reacción química se produce al mezclar las materias primas (isocianato, poliol y agua). [16]

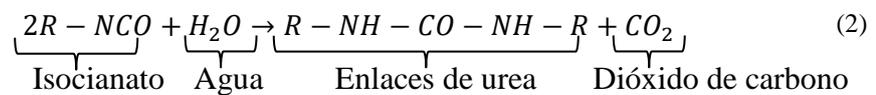
1.6.1. Reacción de gelificación

La reacción química entre el isocianato y el poliol produce un enlace uretano. La reacción de polimerización del enlace de uretano produce el polímero de poliuretano. [16]



1.6.2. Reacción de soplado

Al mismo tiempo, la reacción química entre el isocianato y el agua produce gas de dióxido de carbono. [16]



CAPÍTULO 2

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO DE POLIURETANO POR MEDIO DE UN SOFTWARE ESPECIALIZADO

2.1. Determinación de parámetros

La inyección de poliuretano es el resultado de la combinación íntima del isocianato y del polioliol en un cabezal de mezcla dispuesto en una máquina diseñada para este efecto.

Como resultado de la reacción química entre estos elementos se produce el CO₂ que es el agente de soplado responsable del crecimiento del material

Una vez que el poliuretano se inyecta en el molde, la forma de la parte es dada por la cavidad de este.

Aunque no se requieren modificaciones de molde, en algunos casos las modificaciones de diseño se recomiendan para obtener resultados óptimos. [5]

El molde debe proveer todas las facilidades para la garantizar una óptima calidad final de las piezas obtenidas después de la inyección.

Dichas facilidades se resumen como las siguientes:

- Control de acabado superficial de la parte inyectada
- Control de deformación
- Reducción de peso
- Control de venteo o salidas de aire
- Calidad de la piel y estructura del núcleo
- Morfología de la espuma
- Líneas de soldadura [5]

2.2. Determinación de casos de estudio

Para delimitar este estudio de manera que se ajuste a una posible realidad en el campo práctico se va a plantear algunos casos de estudio.

Todos estos se verán limitados a conseguir la mejor de las posibilidades en cuanto al cumplimiento de los parámetros que permitan dar al diseñador o fabricante de los moldes de inyección una pauta valedera acerca de la mejor disposición de mecanismos y soluciones orientados a obtener una pieza de buena calidad y con una menor cantidad de pruebas fallidas al momento de la implementación.

Los parámetros que van a determinar la calidad de la pieza serán los siguientes.

- Cantidad de material (únicamente referencial)
- Líneas de unión debido a frentes de crecimiento de material
- Atrapamientos de aire
- Inclinación del molde

2.2.1. Densidad de espuma

La densidad de una espuma de poliuretano es la cantidad de masa por unidad de volumen de la espuma expresada en kg/m^3 o lb/ft^3 .

Esta densidad no es una medida o expresión de firmeza, sin embargo, es un factor importante. La espuma de mayor densidad generalmente da como resultado una mejor calidad y rendimiento. [17]

Para el caso de este estudio se toma una densidad estándar de 60 kg/m^3 correspondiente a una almohada de fabricación normal con un sistema de materia prima Huntsman compuesto de polioliol con un nombre comercial de Rubiflex SC 38695 y un isocianato Suprasec 7507 [18], por otro lado, se tiene el modelo matemático de la cavidad del molde de la almohada con un volumen de 0.029 m^3 , Fig. 20 y Fig. 21.



Fig. 20. Modelo de almohada 600x400x140 milímetros. Elaborado por: Modelo matemático Pablo Sandoval, María Silva

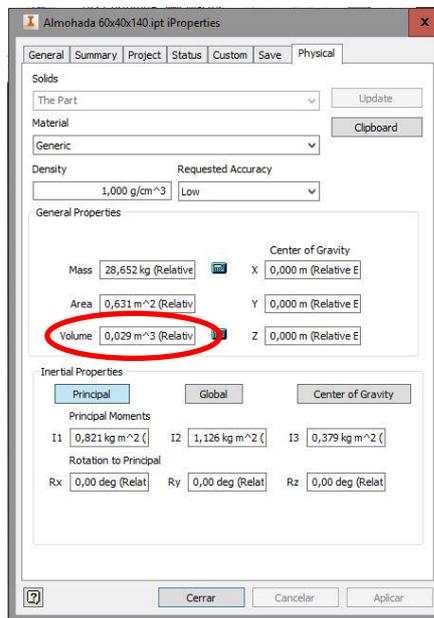


Fig. 21. Cuadro de diálogo "Propiedades Autodesk Inventor" volumen del modelo matemático. Elaborado por: Modelo matemático Pablo Sandoval, María Silva

Entonces:

$$\delta = \frac{P}{V} \quad (3)$$

Donde:

$$\delta = \text{Densidad de la parte} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

P = Cantidad de poliuretano vertido en e molde [kg]

V = Volumen de la cavidad del molde a ser llenada [m^3]

Si se desea saber la cantidad de poliuretano se debe despejar P de la Ec. 3., y tenemos:

$$P = \delta * V$$

$$P = 60 \left[\frac{kg}{m^3} \right] 0,029[m^3]$$

$$P = 1,74 [kg] = 1740 [gr]$$

Este valor se vuelve un parámetro únicamente referencial al momento de la simulación, debido a que al realizar la inyección de poliuretano en planta la densidad tiene una gran variación por efectos propios del material, presión atmosférica, eficiencia del proceso, material de construcción de los moldes, etc.

2.2.2. Líneas de soldadura

Se conoce como línea de soldadura (Fig. 22) al lugar en donde se juntan dos o más frentes de flujo durante el llenado del molde. [5]

Por lo general, una pieza de moldeo microcelular puede conformarse mucho mejor que la parte moldeada por inyección regular ya que una parte microcelular se expande más de lo que se contrae. Sin embargo, es posible que se deba prestar especial atención a la ventilación y líneas de soldadura, ya que una ventilación no adecuada y una línea de soldadura débil pueden causar problemas de calidad para la parte, ya sea visualmente o en desempeño. [5]

2.2.3. Atrapamientos de aire

La ventilación del molde es importante para el llenado exitoso, una cavidad insuficientemente ventilada puede causar aire y gas atrapados (Fig. 23), quemaduras localizadas y daño subsecuente a la parte. [5]



Fig. 22. Parte inyectada en donde se puede apreciar una línea de unión. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva

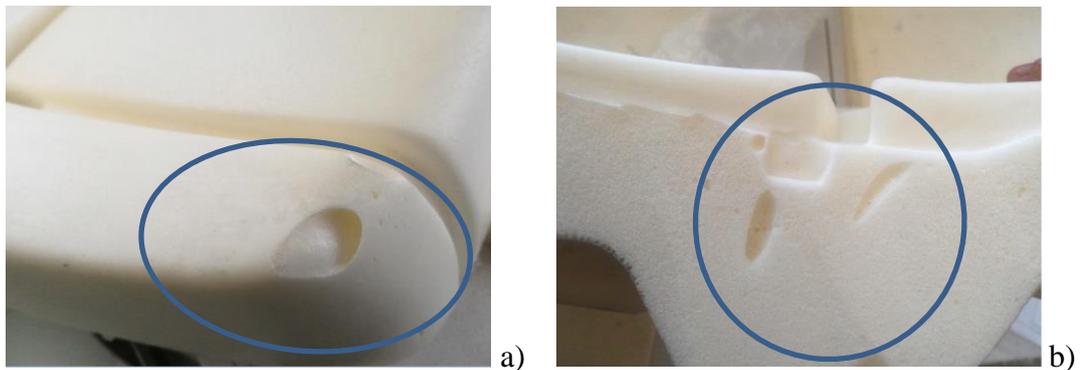


Fig. 23. Parte inyectada en donde se puede apreciar: a) atrapamiento de aire superficial, b) atrapamiento de aire interno. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva

2.3. Simulación de casos de estudio

2.3.1. Simulador

El proceso de fabricación de una parte moldeada está sujeto a varias etapas que garantizan su éxito, éstas por lo general son: el diseño de la parte, diseño del herramental y la definición del proceso de inyección.

Las diferentes opciones de software para simulación se convierten en gran aliado del diseñador al momento de responder preguntas tales como:

- ¿El molde se llenará por completo?
- ¿La parte final se deformará o tendrá defectos visuales?

- ¿Qué cambios podrían hacerse en la geometría de la pieza, los materiales, el grosor de la pared o las ubicaciones de los puntos de inyección para mejorar la pieza o el proceso?
- ¿Cómo afectaría la calidad de la pieza la disminución del tiempo de ciclo o la temperatura?, etc. [19]

Para desarrollar la presente parte de este trabajo se ha utilizado el software Moldex3D que es uno de los programas de mayor difusión a nivel mundial en cuanto a procesos de ingeniería asistida por computador CAE (*Computer Aided Engineering*) aplicado al diseño de procesos de inyección de polímeros y en este caso específico, al poliuretano.

2.3.1.1. Introducción de parámetros para simulación

A continuación, se hará una breve reseña de los parámetros que se deben tener en cuenta para la simulación del crecimiento del poliuretano dentro del molde, asistidos por el software de simulación Moldex3D.

2.3.1.1.1. Tratamiento de sólido

Moldex3D *designe* es el módulo en donde se realiza el primer procesamiento del sólido.

A través de su interfaz gráfica de usuario, puede manejar y optimizar varios modelos de moldeo por inyección en cinco pasos:

- Importar el modelo
- Construir sistema de recorrido de colada
- Especificar el sistema de enfriamiento
- Generar malla, y exportación de malla

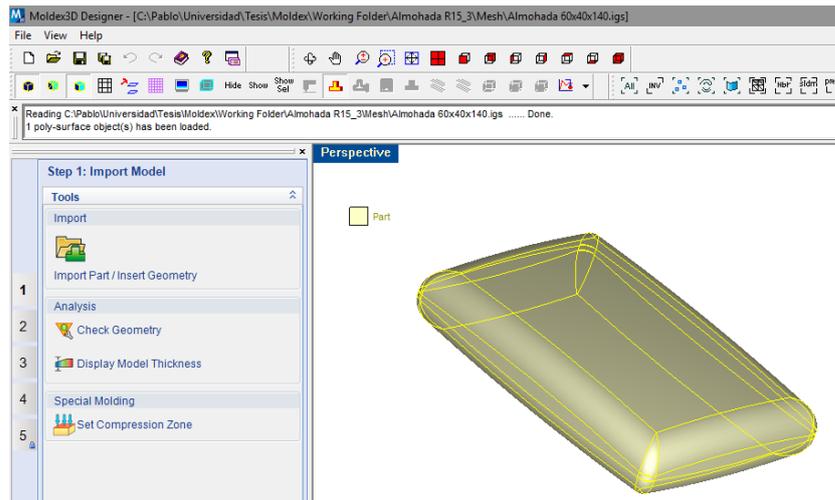


Fig. 24. Paso 1, importación de modelo 3D desde un programa de diseño. Fuente: [16]

Como primer paso se importa el sólido en el que se trabajará (Fig. 24) y se realiza un análisis de la geometría para detectar problemas que puedan dar inconvenientes en la generación de la malla.

En el caso del molde utilizado para la inyección de poliuretano se obvia el diseño de los canales de recorrido de la colada (Fig. 25), ya que la inyección se la realiza directamente en el molde cuando este se encuentra abierto.

La posición o distribución del material dentro de la cavidad estará dada, en este caso, por un patrón de regado previamente definido por el diseñador y que el operador debe realizarlo manipulando el cabezal de mezcla dispuesto en la máquina.

Este patrón de regado se aplica generalmente en caso de procesos manuales. Existen procesos automatizados en donde el regado del material se lo hace por medio de un robot.

La refrigeración (Fig. 26), es un parámetro importante si se va a tomar en cuenta los efectos que la reacción del poliuretano pueda tener sobre el refrigerante o sobre la deformación de la parte.

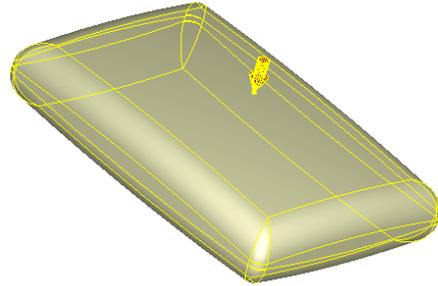


Fig. 25. Paso 2, ingreso de colada, para el caso del poliuretano se crea un lugar por donde ingresará la mezcla de isocianato y polioli en uno o varios puntos definidos. Fuente: [16]

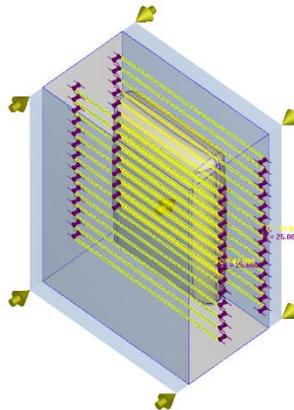
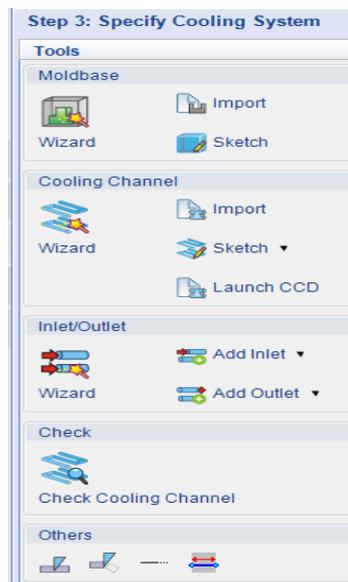


Fig. 26. Paso 3, ingreso de dimensiones y tipo de sistema de enfriamiento y apertura de molde. Fuente: [16]

El mallado de la parte es fundamental para obtener resultados confiables en la simulación, es por esta razón que los pasos mostrados en la Fig. 27 y Fig. 28 son de gran importancia dentro del parametrizado de la simulación.

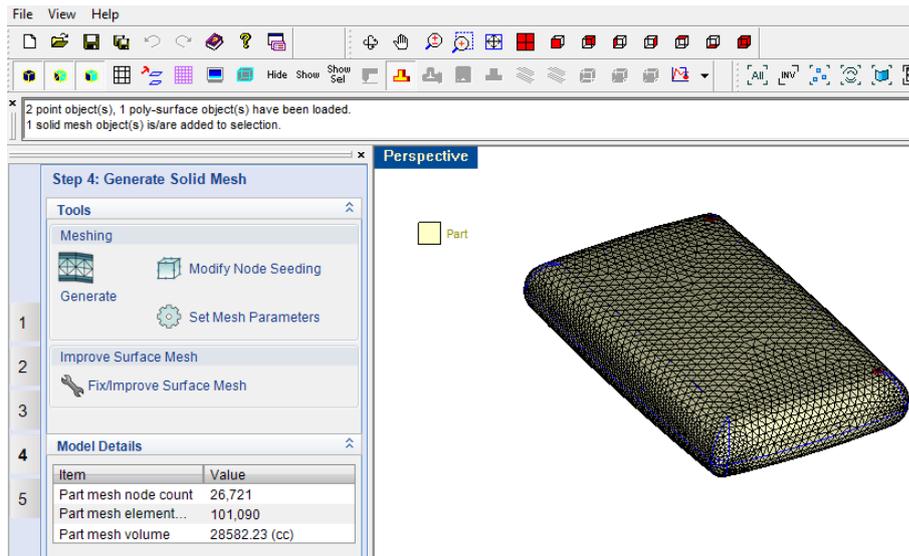


Fig. 27 Paso 4, definición de parámetros para la generación de una malla que permita una simulación exacta. Fuente: [16]

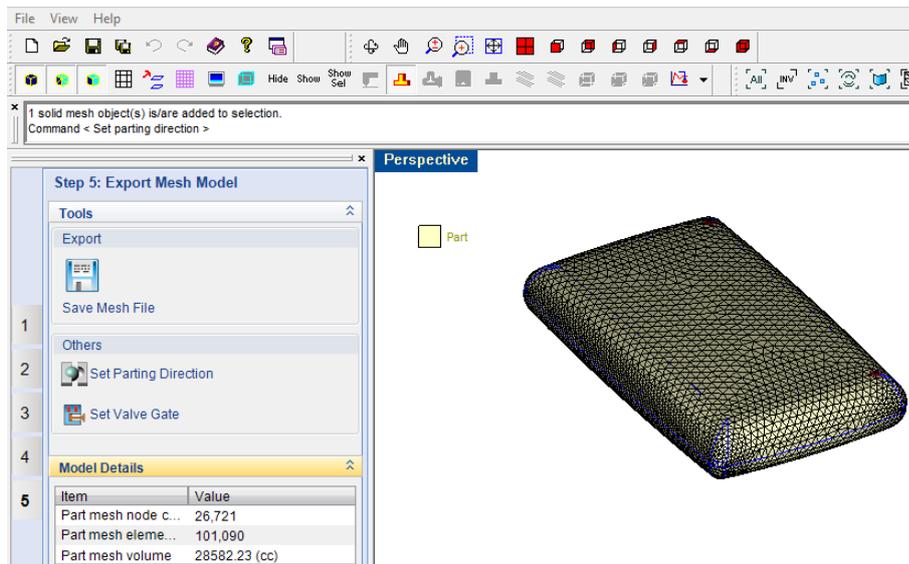


Fig. 28 Paso 4, exportación y verificación de la parte mallada. Fuente: [16]

Debido a la importancia que la generación adecuada del mallado tiene sobre los resultados de la simulación, Moldex3D provee de algunas herramientas para mejorar la conformación de esta.

Es a través de las mencionadas herramientas como se puede modificar la distancia entre nodos, ofreciendo un mallado de mejor calidad.

Al analizar un mallado con las características ofrecidas por defecto (Fig. 32), en donde la distancia entre nodos es grande y se pierden detalles tales como las curvas que posee el modelo matemático

Así mismo si analizamos los mallados en donde la distancia entre nodos es de 20 mm (Fig. 30) y de 10 mm (Fig. 31) encontramos que los detalles están mejor definidos y los valores del volumen son más aproximados a los determinados en la Fig. 21.

Es importante acotar que, tanto el tamaño del archivo resultante y el tiempo de procesamiento de la simulación se incrementan notablemente en función de la calidad del mallado, por esto es necesario llegar a un equilibrio en donde los resultados sean satisfactorios sin sacrificar la exactitud.

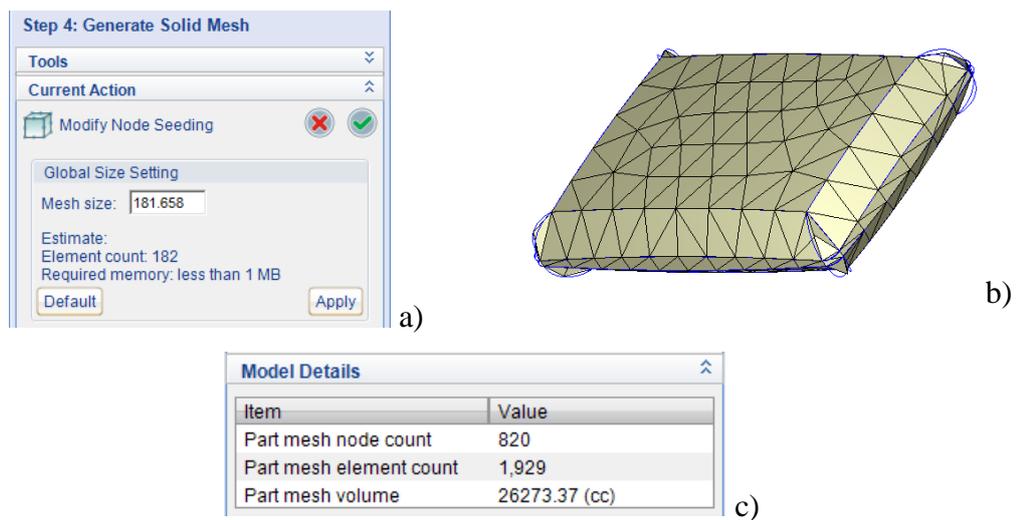
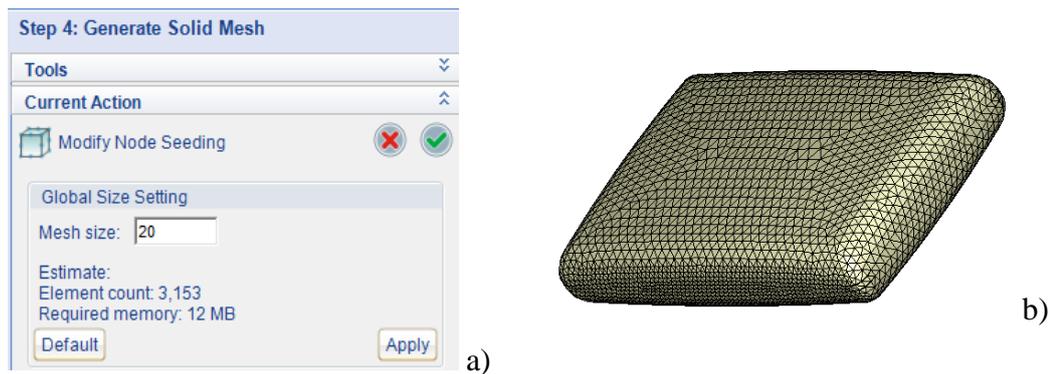


Fig. 29. a) Mallado con parámetros por defecto de Moldex3D b) pérdida de precisión en curvaturas de modelo matemático, c) valores resultado del mallado del modelo. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva



Model Details

Item	Value
Part mesh node count	24,212
Part mesh element count	90,072
Part mesh volume	28575.95 (cc)

c)

Fig. 30. a) Mallado con distancia entre nodos de 20mm b) mallado en modelo matemático, c) valores resultado del mallado del modelo. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva

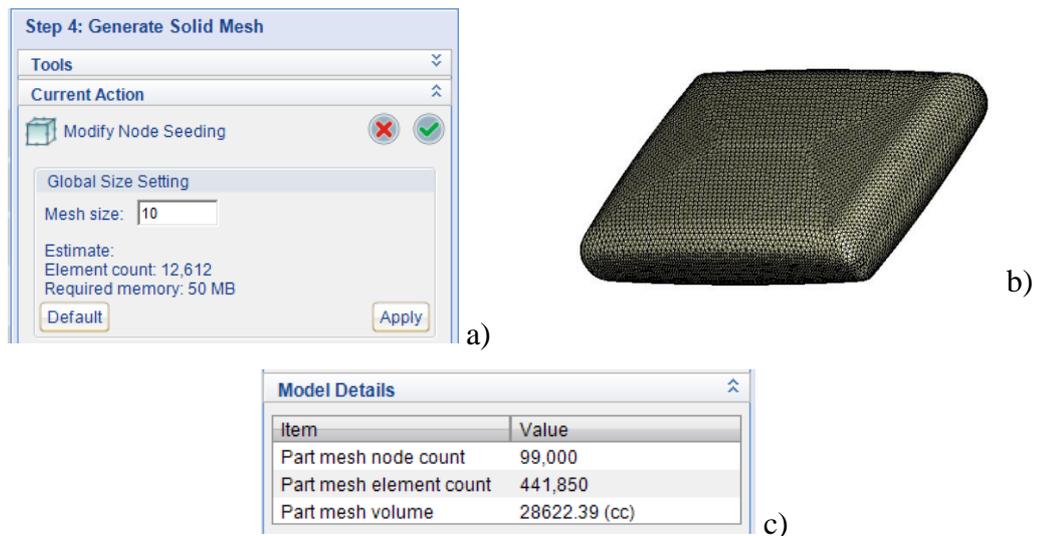


Fig. 31. a) Mallado con distancia entre nodos de 10mm b) mallado en modelo matemático, c) valores resultado del mallado del modelo. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva

Una vez que se ha configurado el sólido en cuanto a ingreso de material, refrigeración, apertura de molde y mallado; se parametriza el módulo de simulación de Moldex3D.

En este se ingresan todos los parámetros referentes a datos del proyecto (Fig. 32), archivo de mallado (Fig. 33), material de la parte (Fig. 34), proceso de fabricación

(Fig. 35), parámetros de cálculo como son gravedad, presión atmosférica y ventilas (Fig. 36).

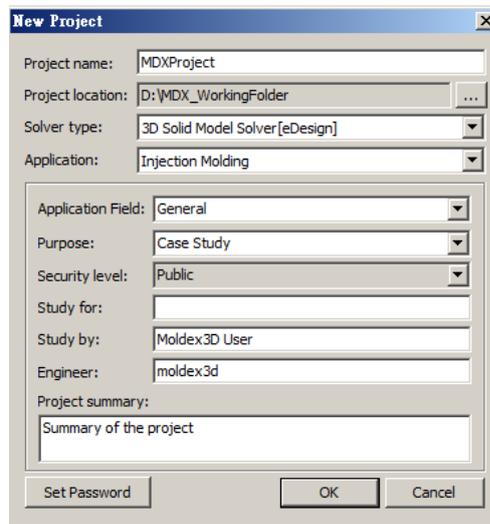


Fig. 32. Paso 1, configuración de proyecto. Fuente: [16]

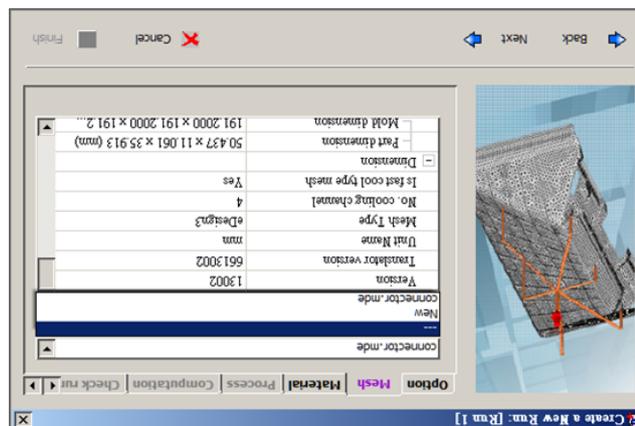
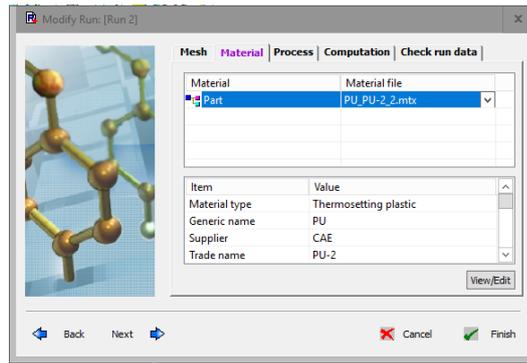
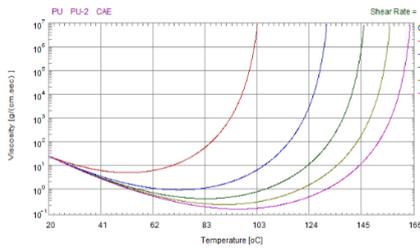


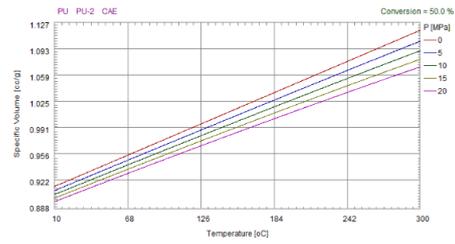
Fig. 33. Paso 2, ingreso de sólido mallado. Fuente: [16]



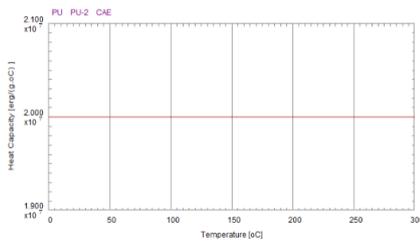
a)



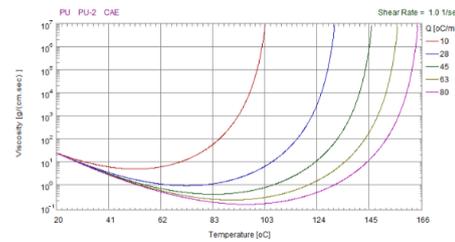
b)



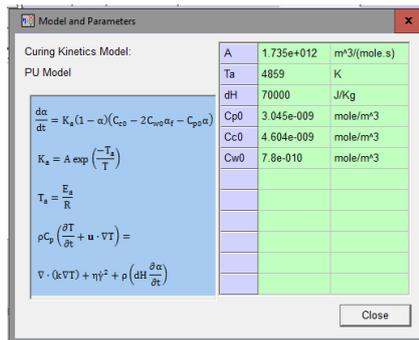
c)



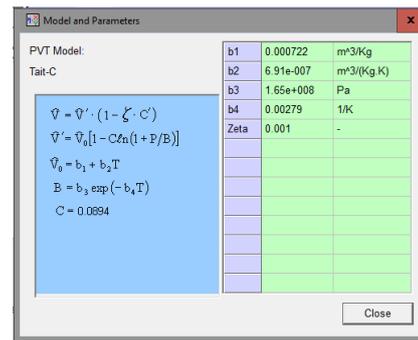
d)



e)

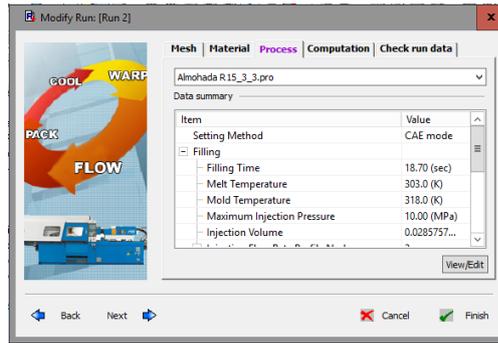


f)

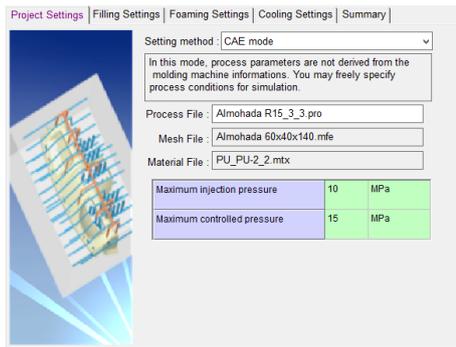


g)

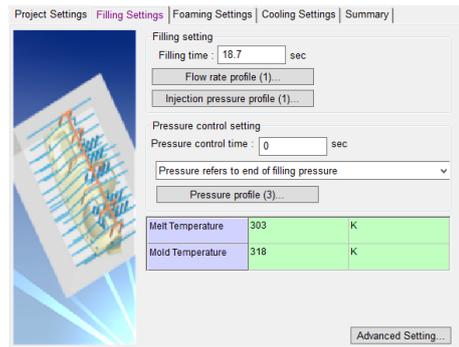
Fig. 34. Paso 3, a) cuadro de dialogo para definir el material desde la librería de Moldex3D, b), c), d), e), características propias de cada material para el caso de la simulación se escoge el material PU-2, f), g) modelos matemáticos que rigen las curvas características de cada propiedad del material. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva



a)



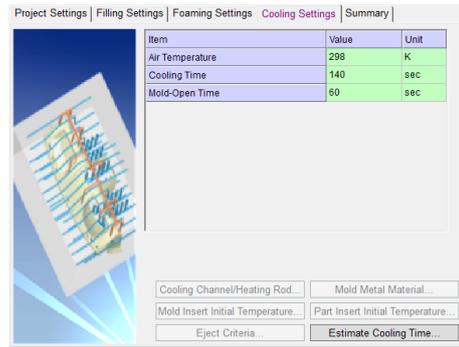
b)



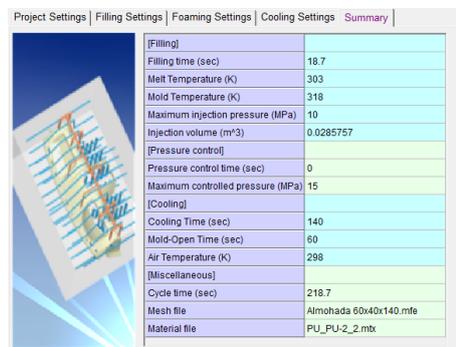
c)



d)



e)



f)

Fig. 35. Paso 4, Cuadro de diálogo para ingreso de parámetros del proceso como son b) presiones de inyección, c) tiempos y presiones de llenado, d) cantidad de material a inyectarse, e) temperaturas de molde, f) resumen de parámetros. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

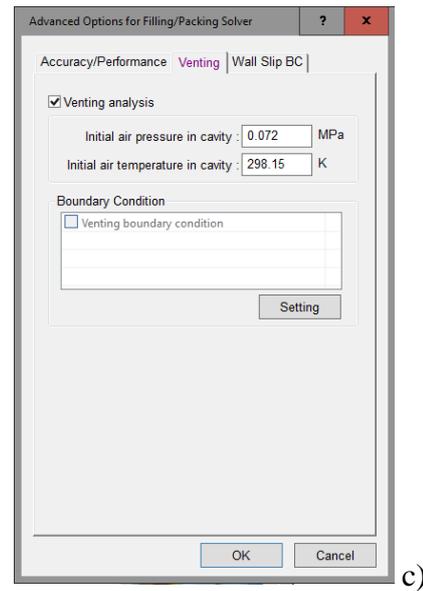
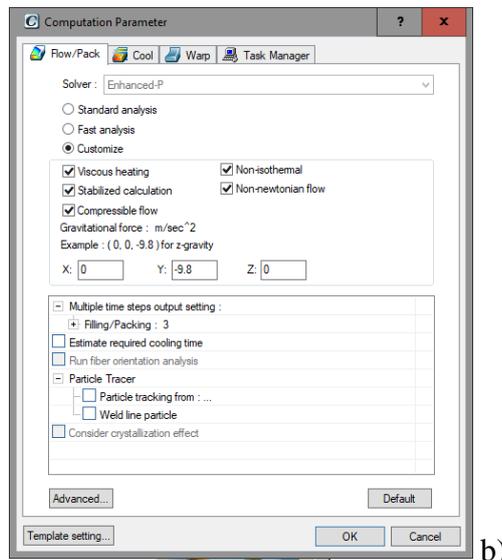
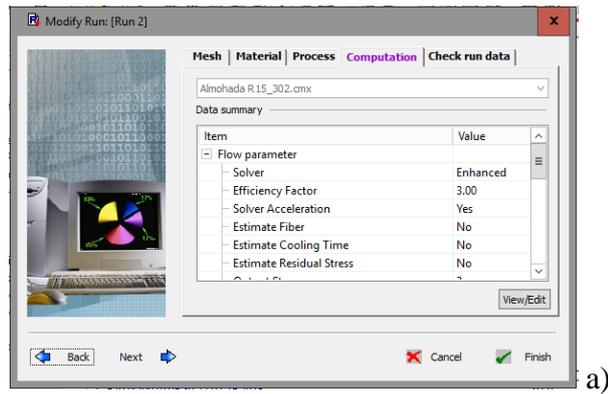


Fig. 36. Paso 5, a) ingreso de parámetros de cálculo como son b) gravedad, presión atmosférica, temperatura ambiente y c) con o sin ventilas de salida de aire. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

Una vez que se ingresan todos los parámetros de proceso Moldex3D realiza una verificación final y publica los resultados y/o posibles fallas en el cuadro diálogo *check run data*, mostrado en la Fig. 37.

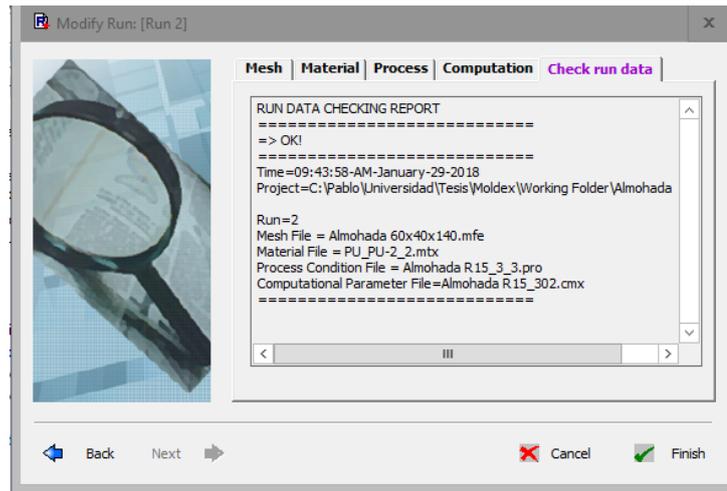


Fig. 37. Paso 6, verificación de los datos ingresados como parámetros de la simulación. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

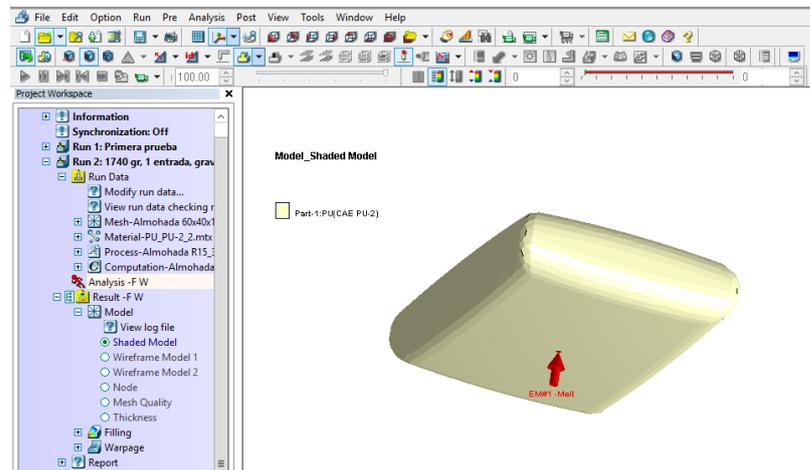


Fig. 38. Paso 7, Moldex3D crea un árbol de proyecto desde donde se inicia la corrida de la simulación. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

El siguiente paso es la simulación, esta se inicia al seleccionar la opción *Analysis FW* en el árbol de proyecto mostrado en la Fig. 38.

Al finalizar el proceso de simulación, Moldex3D permite revisar los resultados por medio del árbol de proyecto, dar un tratamiento más preciso mediante el menú *Post*, así también, hacer modificaciones en la visualización o analizarlos por medio de gráficas.

2.3.2. Simulaciones

La metodología utilizada para la evaluación de los parámetros de prueba enunciados anteriormente será de prueba y error.

Se plantea una serie de simulaciones iniciales utilizando el software Moldex3D para la realización de estas, en donde se ingresa la información necesaria y en base a los resultados obtenidos se puede elegir la opción más idónea para la teórica fabricación del molde y de la parte.

Tabla 1
PARÁMETROS DE SETEO DE SIMULACIÓN 1.

Modelo	Sub-grupo de prueba	Ubicación de lugar de inyección	Cantidad de material [gr]	Inclinación de molde [grados]	Salidas de aire
1	A	1 punto	1740	0	sin
2	A	2 puntos opuestos	1740	0	sin
3	A	Regado uniforme en la base	1740	0	sin

La Tabla 1 corresponde al planteamiento de la primera simulación en donde se escogen tres ubicaciones diferentes para realizar la inyección del poliuretano, en todos los casos se mantiene la cantidad de material inyectado, la inclinación del molde totalmente horizontal y no se aplican salidas para el aire atrapado al interior de la cavidad

A continuación, se realiza la primera simulación, con los parámetros seleccionados.

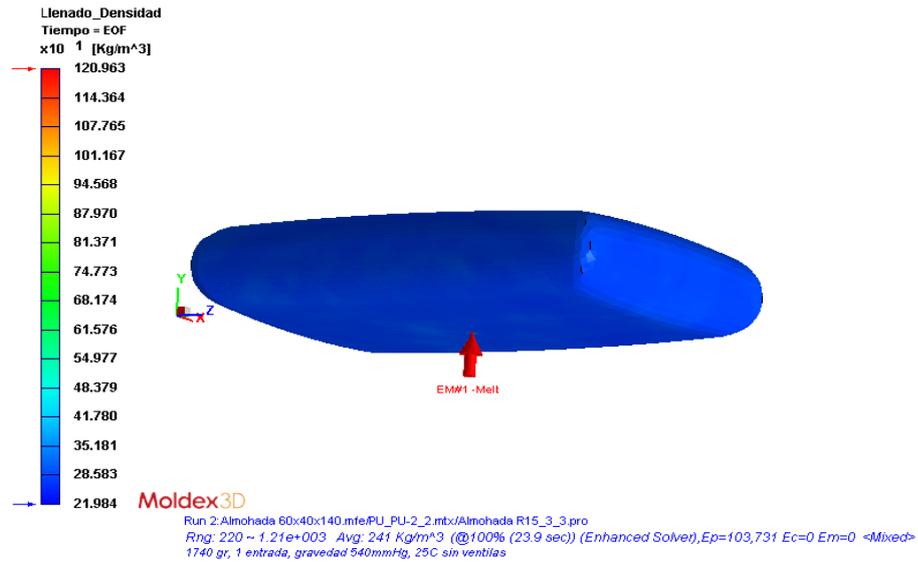


Fig. 39. Densidad de parte simulación 1ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

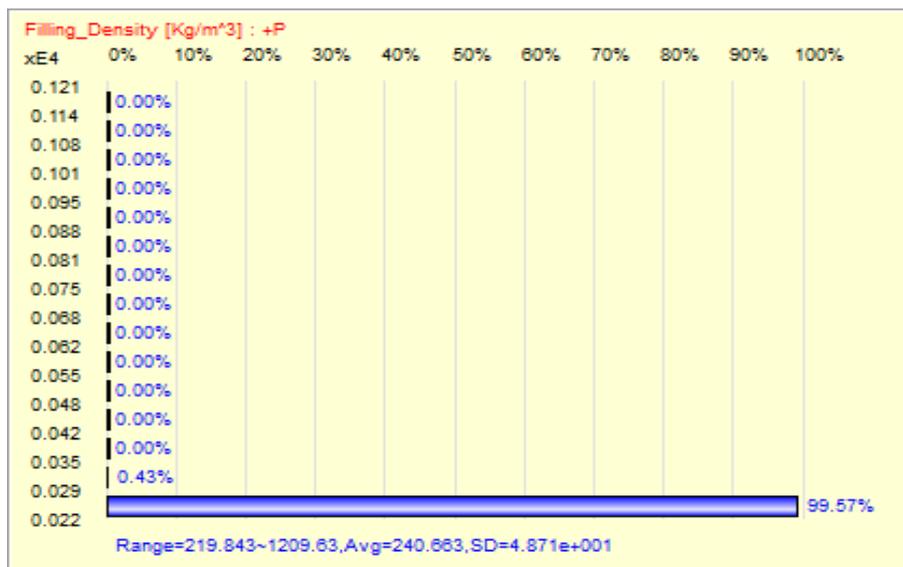
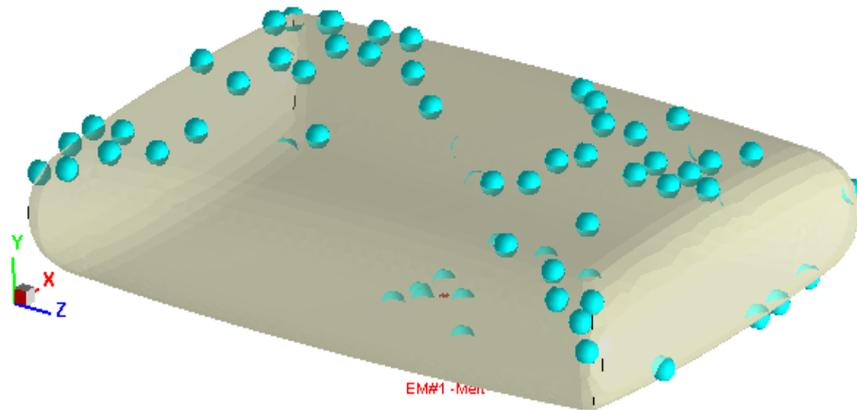


Fig. 40. Densidad de parte simulación 1ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 39 se observa gráficamente la densidad obtenida de la simulación 1A en donde se tiene una variación dentro de la pieza final comprendida entre 219 y 1209 kg/m³, en la Fig. 40 se obtiene que el 99.57 % de la geometría total de la pieza está en un rango promedio Avg (*average*) de 240.663 kg/m³.



Moldex3D

Run 2:Almohada 60x40x140.mfe/PU_PU-2_2.mtx/Almohada R15_3_3.pro
 No. Air Trap:67 (Interior:0, Surface:67)
 1740 gr, 1 entrada, gravedad 540mmHg, 25C sin ventilas

Fig. 41. Resultados aire atrapado de simulación 1ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

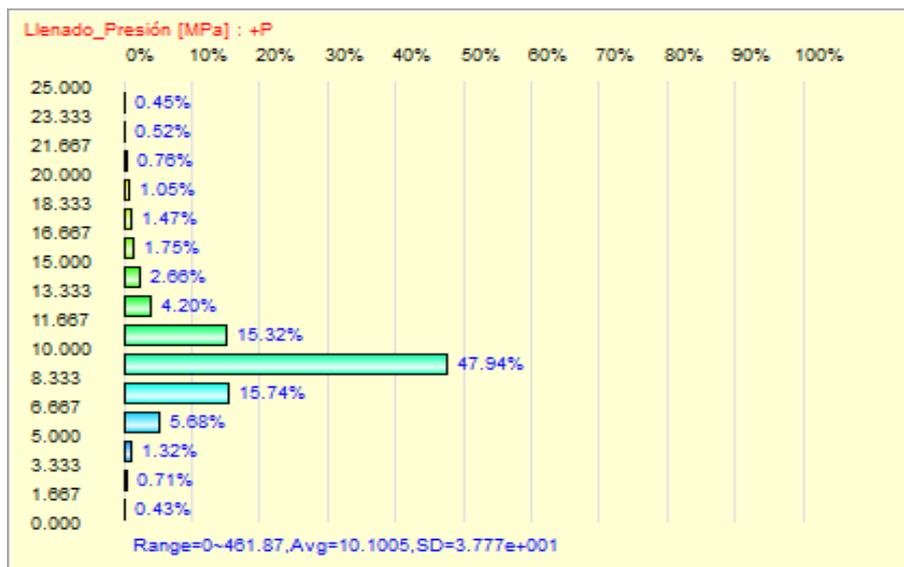


Fig. 42. Presión al interior del molde simulación 1ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 41 se aprecia la cantidad de atrapamientos de aire contenida en la pieza inyectada llegando a un valor de 67, distribuidos gráficamente en la superficie de la almohada. La Fig. 42 muestra que la presión al interior de la cavidad tiene un valor promedio Avg (*average*) de 10,1005 MPa predominante en un 47,94 % del espacio ocupado por el poliuretano.

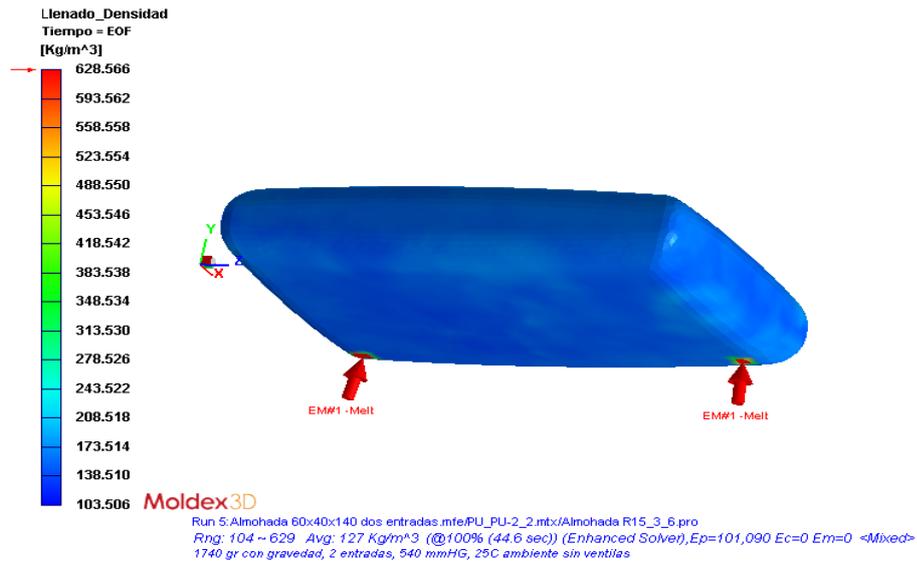


Fig. 43. Densidad de parte simulación 2ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

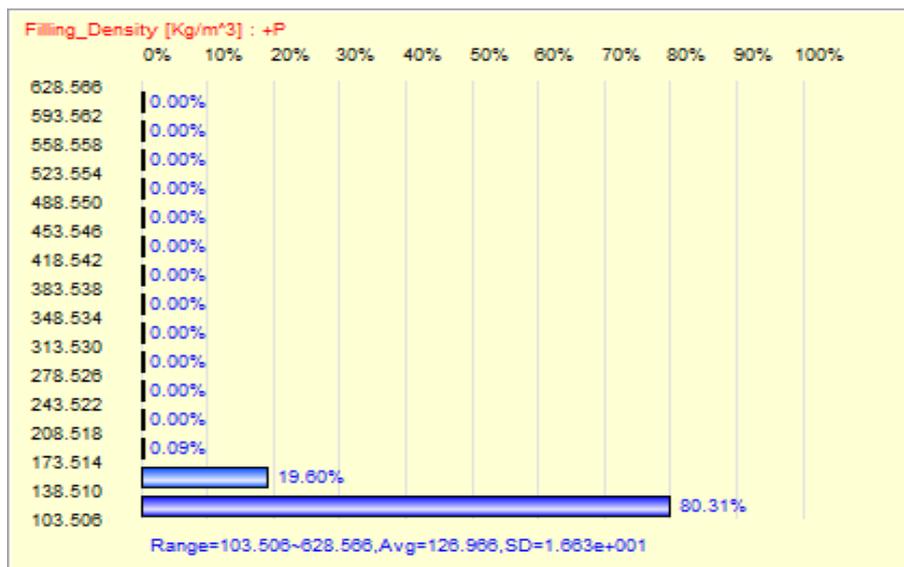
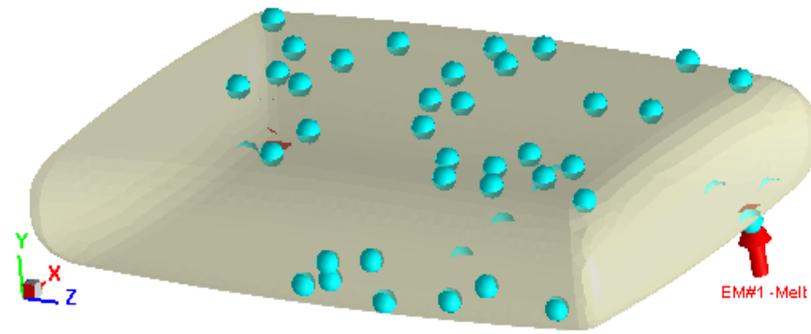


Fig.44. Densidad de parte simulación 2ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 43 se observa gráficamente la densidad obtenida de la simulación 2A en donde se tiene una variación dentro de la pieza final comprendida entre 104 y 629 kg/m^3 , en la Fig.44 se obtiene que el 80,31 % de la geometría total de la pieza está en un rango promedio Avg (*average*) de 126,966 kg/m^3 .



Moldex3D

Run 5:Almohada 60x40x140 dos entradas.mfe/PU_PU-2_2.mtx/Almohada R15_3_6.pro
 No. Air Trap:45 (Interior:0, Surface:45)
 1740 gr con gravedad, 2 entradas, 540 mmHG, 25C ambiente sin ventilas

Fig. 45. Resultados aire atrapado de simulación 2ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

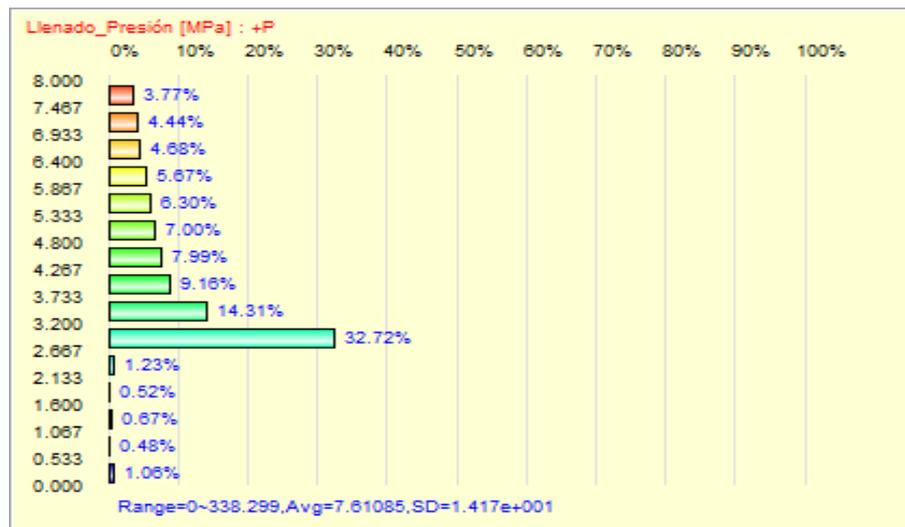


Fig. 46. Presión al interior del molde simulación 2ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 45 se aprecia la cantidad de atrapamientos de aire contenida en la pieza inyectada llegando a un valor de 45, distribuidos gráficamente en la superficie de la almohada. La Fig. 46 muestra que la presión al interior de la cavidad tiene un valor promedio Avg (*average*) de 7,61085 MPa predominante en un 32,72 % del espacio ocupado por el poliuretano.

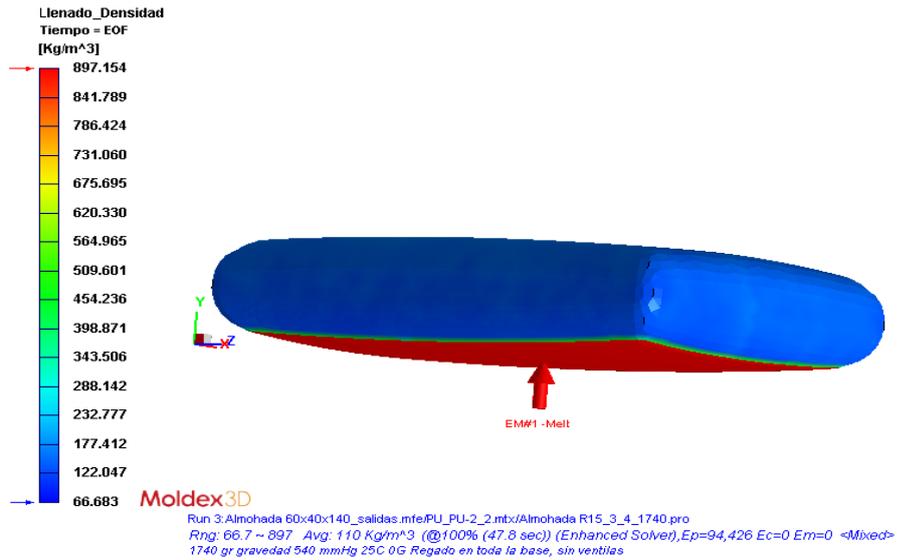


Fig. 47. Densidad de parte simulación 3ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

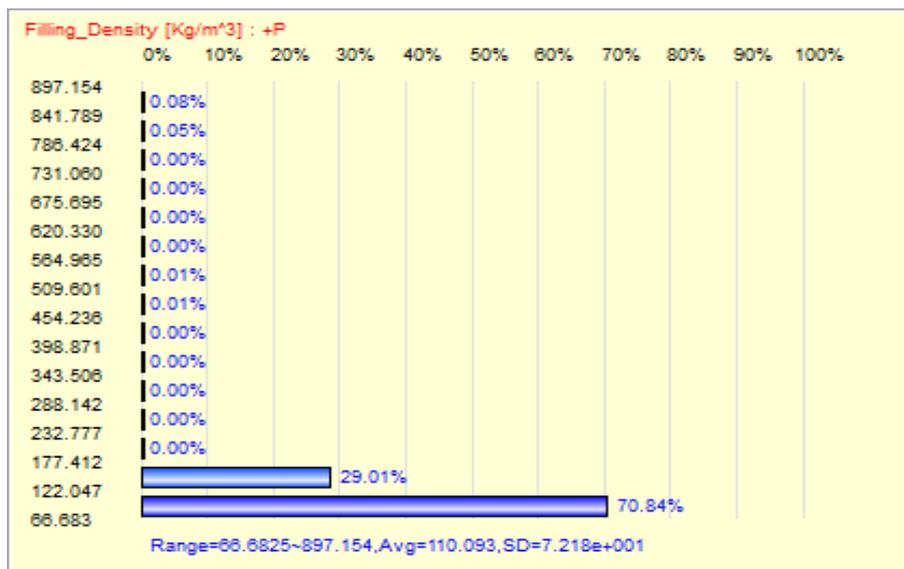
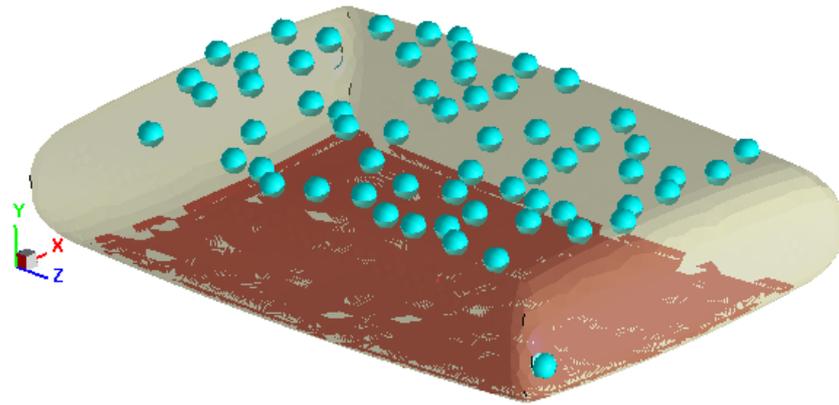


Fig. 48. Densidad de parte simulación 3ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 47 se observa gráficamente la densidad obtenida de la simulación 3A en donde se tiene una variación dentro de la pieza final comprendida entre 66,7 y 897 kg/m³, en la Fig. 48 se obtiene que el 70,84 % de la geometría total de la pieza está en un rango promedio Avg (*average*) de 110,093 kg/m³.



Moldex3D

Run 3: Almohada 60x40x140_salidas.mfe/PU_PU-2_2.mtx/Almohada R15_3_4_1740.pro
 No. Air Trap:62 (Interior:0, Surface:62)
 1740 gr gravedad 540 mmHg 25C 0G Regado en toda la base, sin ventilas

Fig. 49. Resultados aire atrapado de simulación 3ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

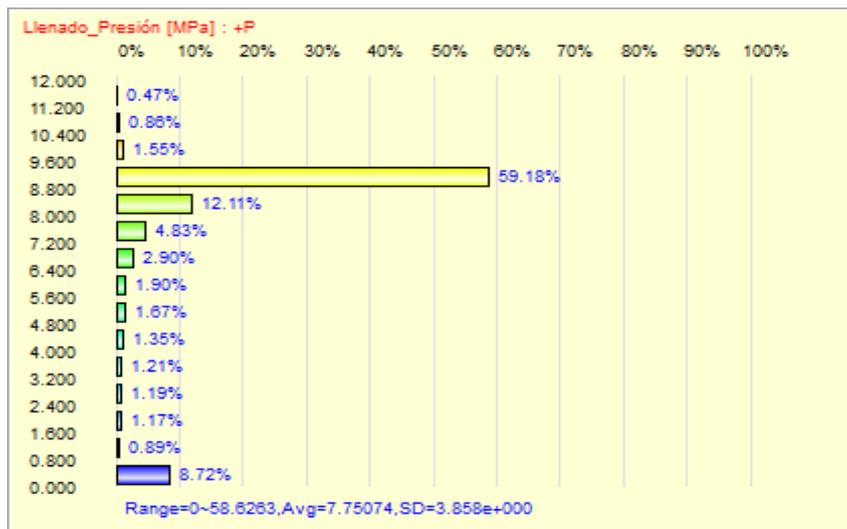


Fig. 50. Presión al interior del molde simulación 3ª. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 49 se aprecia la cantidad de atrapamientos de aire contenida en la pieza inyectada llegando a un valor de 62, distribuidos gráficamente en la superficie de la almohada. La Fig. 50 muestra que la presión al interior de la cavidad tiene un valor promedio Avg (*average*) de 7,75074 MPa predominante en un 59,18 % del espacio ocupado por el poliuretano.

Como resultado de las simulaciones se obtienen los siguientes valores:

Tabla 2
RESUMEN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN 1

Modelo	Sub-grupo de prueba	Ubicación de lugar de inyección	Densidad de referencial [kg/m ³]	Densidad obtenida [kg/m ³]	Aire atrapado	Línea de unión
1	A	1 punto		240,663	67	1
2	A	2 puntos opuestos Regado	60	126,966	45	0
3	A	uniforme en la base		110,093	62	0

De la Tabla 2 se desprende que la inyección realizada en un solo lugar tiene como resultado 67 puntos de atrapamiento de aire al interior de la cavidad, así como también 1 línea de soldadura a diferencia de la inyección aplicada en dos puntos opuestos que corresponde a 45 posibles atrapamientos de aire y 0 líneas de unión

Con el regado uniforme se nota que el atrapamiento de aire se produce en 62 puntos diferentes y no existen líneas de unión.

Dado que el valor de la densidad es únicamente referencial y que lo que se busca es determinar una buena calidad de la pieza obtenida, se puede inferir que las simulaciones 2A y 3A son las más favorables y descartando la opción 1A ya que presenta una mayor cantidad de aire atrapado y adicionalmente una línea de unión.

En base a lo anterior se procede a realizar una nueva tabla de simulación en donde se excluye el llenado de la cavidad por medio del vertido del material en un solo punto.

Adicionalmente se hace uso de un parámetro de inclinación del molde, esto con el fin de eliminar el atrapamiento aire que, en cualquiera de los casos anteriormente simulados, es bastante alto.

Tabla 3
PARÁMETROS DE SETEO DE SIMULACIÓN 2.

Modelo	Sub-grupo de prueba	Cantidad de material [gr]	Ubicación de lugar de inyección	Inclinación de molde [grados]	Salidas de aire
1	B	1740		1	sin
2	B		2 puntos opuestos	5	
3	B		10		
4	B		Regado	1	
5	B		uniforme en la base	5	
6	B		10		

La Tabla 3 corresponde al planteamiento de la segunda simulación en donde se escogen dos ubicaciones diferentes para realizar la inyección del poliuretano, en todos los casos se mantiene la cantidad de material inyectado, la inclinación del molde varía en tres valores diferentes de 1, 5 y 10 grados con respecto a la horizontal y no se aplican salidas para el aire atrapado al interior de la cavidad

En la Fig. 51 se aprecia la cantidad de atrapamientos de aire contenida en la pieza inyectada llegando a un valor de 48, distribuidos gráficamente en la superficie de la almohada.

Se puede diferenciar en la Fig. 52 la formación de 30 líneas de unión dispersas en toda la superficie de la parte inyectada.

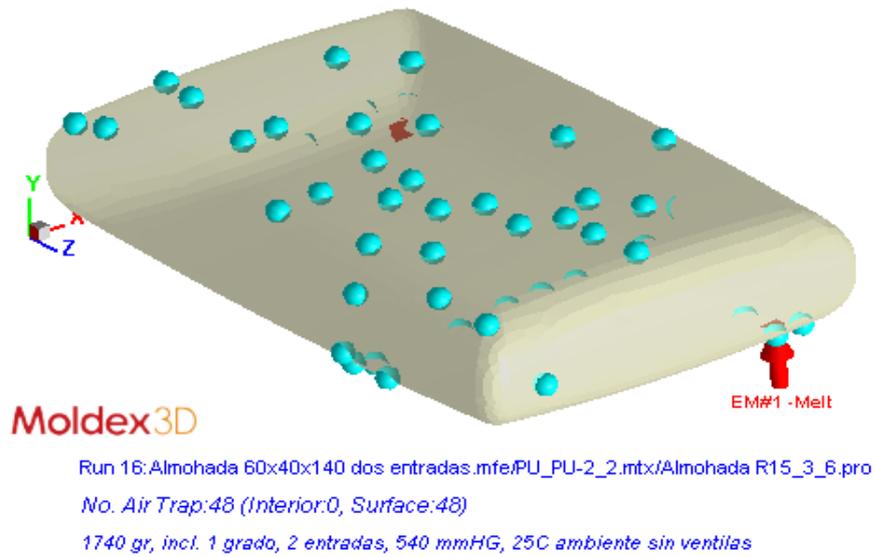


Fig. 51. Resultados aire atrapado de simulación 1B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

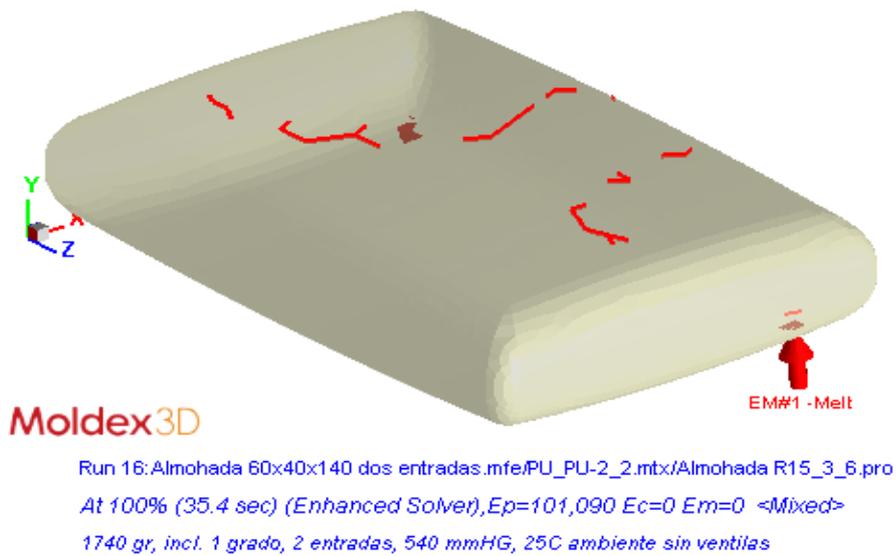


Fig. 52. Líneas de unión en la parte simulación 1B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

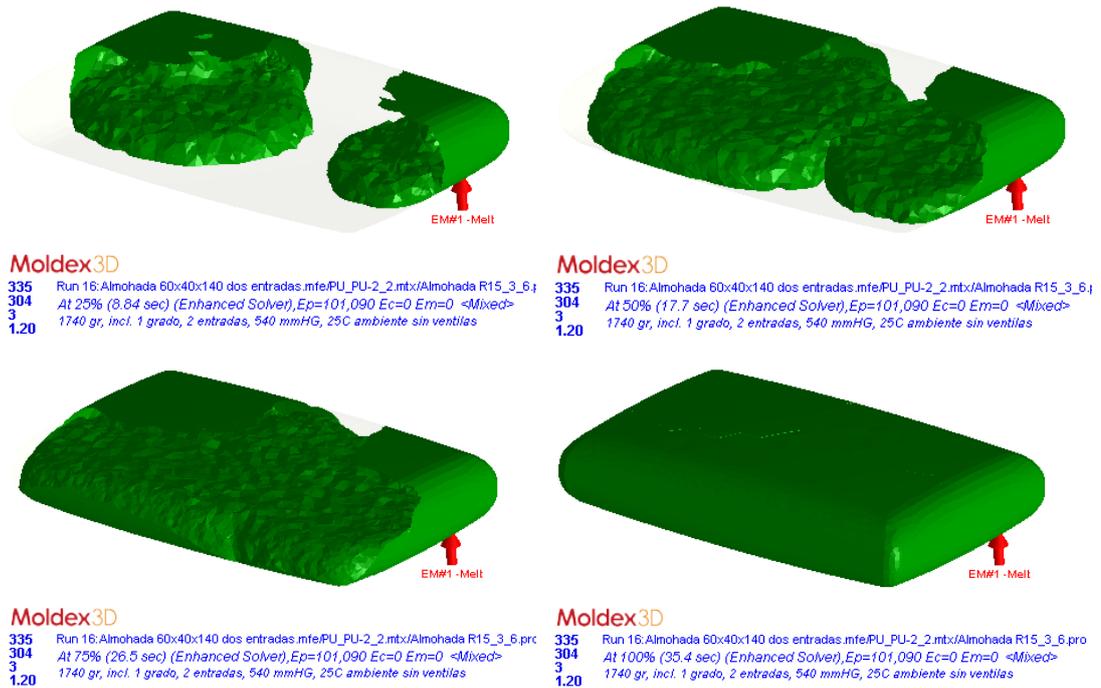


Fig. 53. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 1B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

La Fig. 53 nos muestra el comportamiento del crecimiento que tiene el poliuretano dentro de la cavidad una vez que ha sido depositado en dos puntos opuestos con una inclinación del molde de 1 grado con respecto a la horizontal.

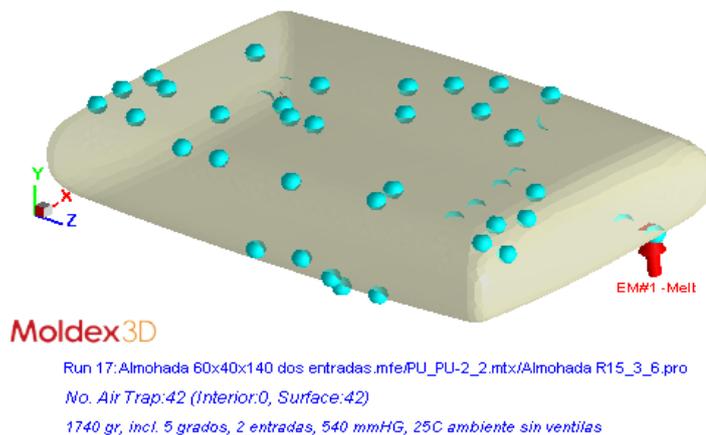
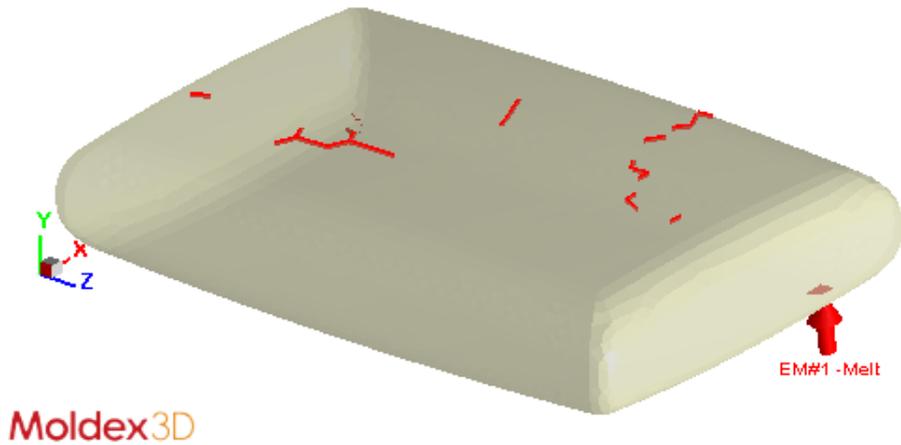


Fig. 54. Resultados aire atrapado de simulación 2B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva



Moldex3D
 Run 17: Almohada 60x40x140 dos entradas.mfe/PU_PU-2_2.mtx/Almohada R15_3_6.pro
 At 100% (35 sec) (Enhanced Solver), Ep=101,090 Ec=0 Em=0 <Mixed>
 1740 gr, incl. 5 grados, 2 entradas, 540 mmHG, 25C ambiente sin ventilas

Fig. 55. Líneas de unión en la parte simulación 2B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

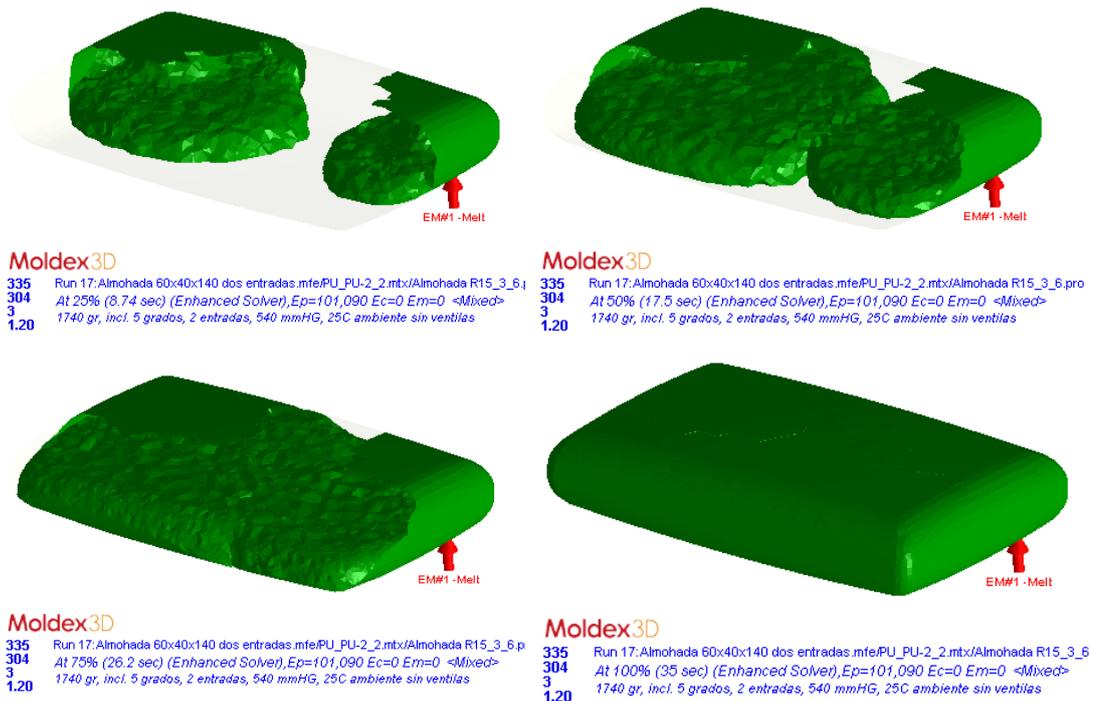


Fig. 56. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 2B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 54 se aprecia la cantidad de atrapamientos de aire contenida en la pieza inyectada llegando a un valor de 42, distribuidos gráficamente en la superficie de la almohada.

Se puede diferenciar en la Fig. 55 la formación de 24 líneas de unión dispersas en toda la superficie de la parte inyectada.

La Fig. 56 nos muestra el comportamiento del crecimiento que tiene el poliuretano dentro de la cavidad una vez que ha sido depositado en dos puntos opuestos con una inclinación del molde de 5 grados con respecto a la horizontal.

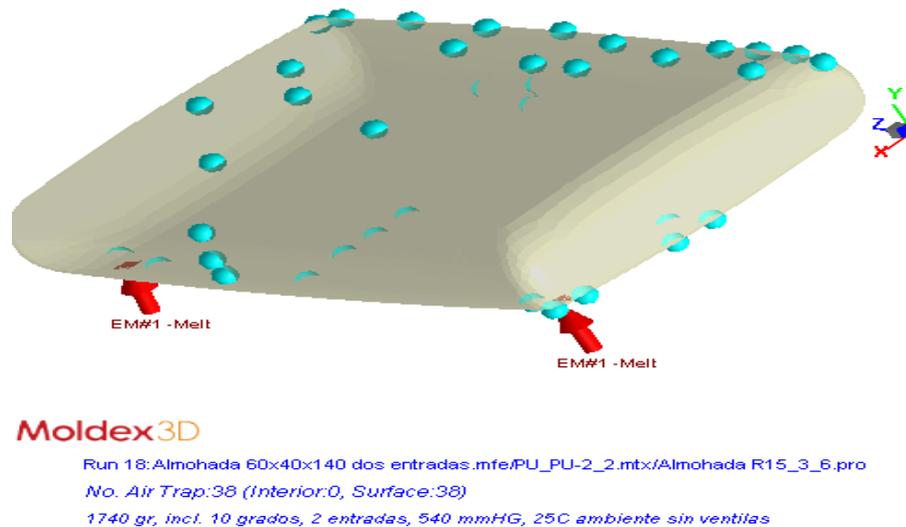


Fig. 57. Resultados aire atrapado de simulación 3B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

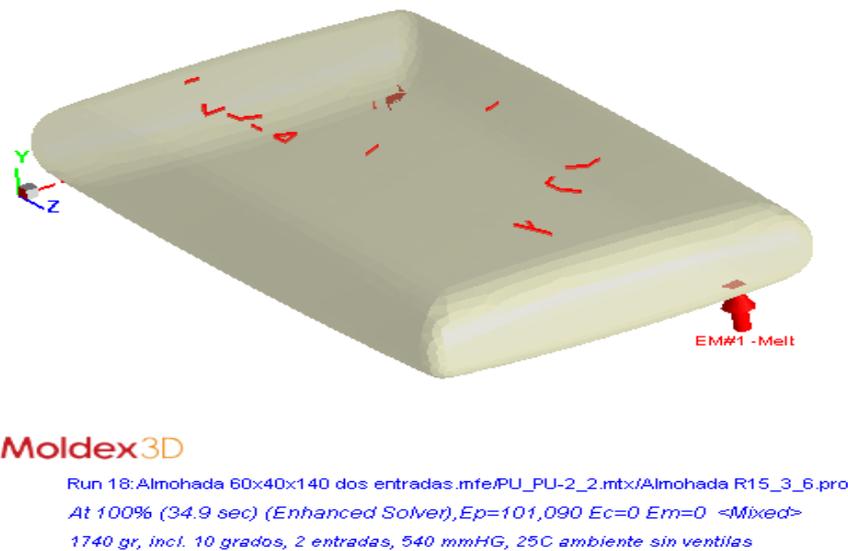


Fig. 58. Líneas de unión en la parte simulación 3B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

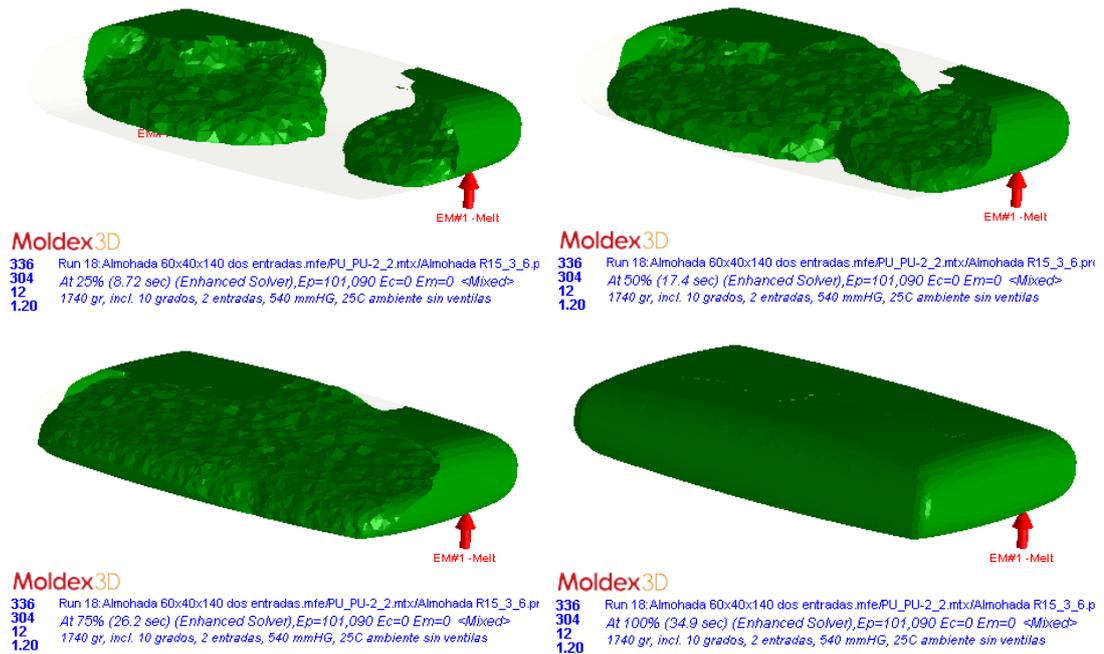


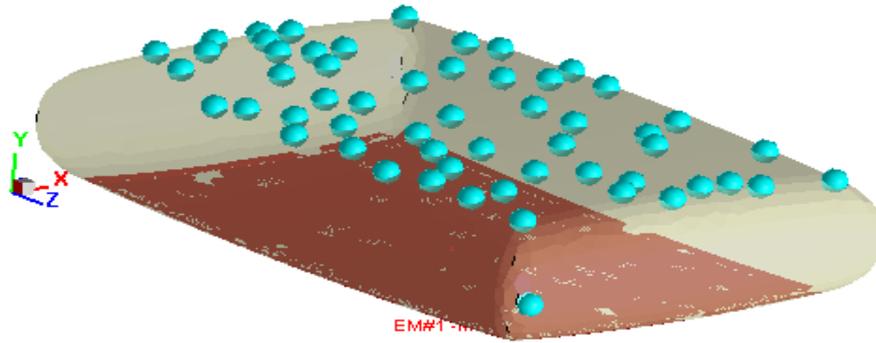
Fig. 59. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 3B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 57 se aprecia la cantidad de atrapamientos de aire contenida en la pieza inyectada llegando a un valor de 38, distribuidos gráficamente en la superficie de la almohada.

Se puede diferenciar en la Fig. 58 la formación de 20 líneas de unión dispersas en toda la superficie de la parte inyectada.

La Fig. 59 nos muestra el comportamiento del crecimiento que tiene el poliuretano dentro de la cavidad una vez que ha sido depositado en dos puntos opuestos con una inclinación del molde de 10 grados con respecto a la horizontal.

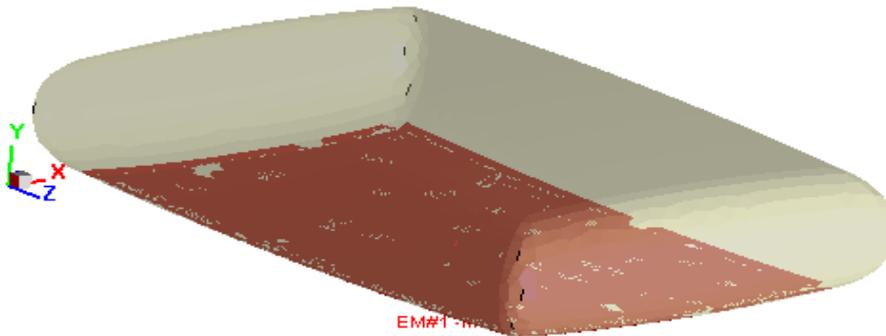
A continuación, se presentan las simulaciones en donde se considera el regado del material en toda la base del molde.



Moldex3D

Run 19:Almohada 60x40x140_salidas.mfe/PU_PU-2_2.mtx/Almohada R15_3_4_1740.pro
 No. Air Trap:57 (Interior:0, Surface:57)
 1740 gr, incl. 1 grado, 540 mmHg 25C Regado en toda la base, sin ventilas

Fig. 60. Resultados aire atrapado de simulación 4B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva



Moldex3D

Run 19:Almohada 60x40x140_salidas.mfe/PU_PU-2_2.mtx/Almohada R15_3_4_1740.pro
 At 100% (47.1 sec) (Enhanced Solver),Ep=94,426 Ec=0 Em=0 <Mixed>
 1740 gr, incl. 1 grado, 540 mmHg 25C Regado en toda la base, sin ventilas

Fig. 61. Líneas de unión en la parte simulación 4B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

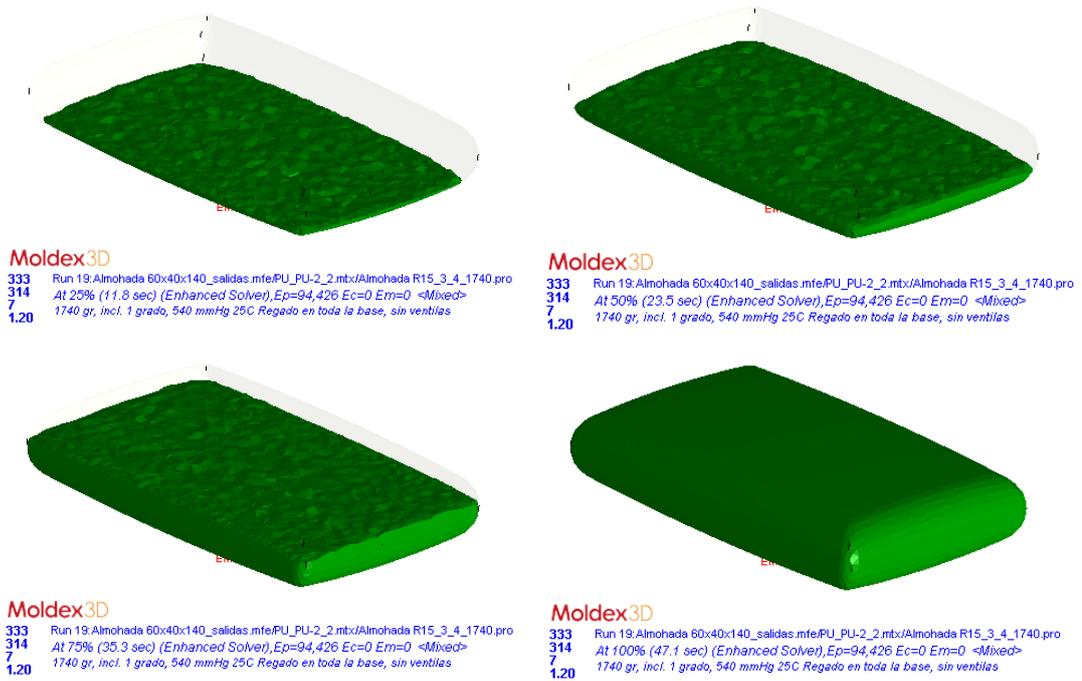
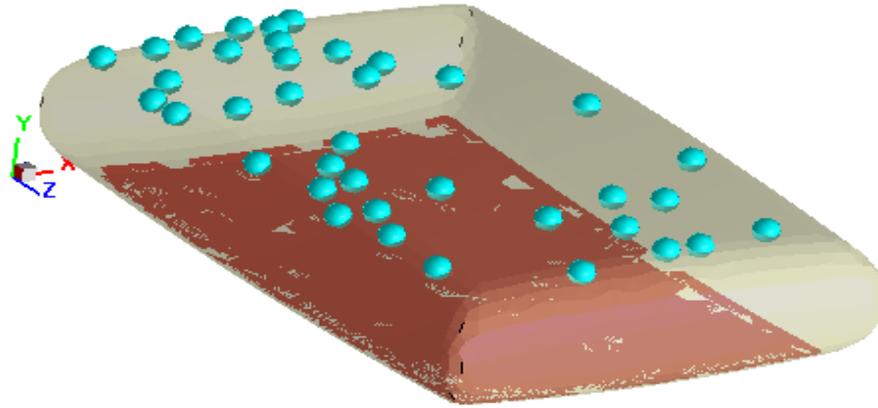


Fig. 62. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 4B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 60 se aprecia la cantidad de atrapamientos de aire contenida en la pieza inyectada llegando a un valor de 57, distribuidos gráficamente en la superficie de la almohada.

Se puede diferenciar en la Fig. 61 que no existe la formación de líneas de unión dispersas en toda la superficie de la parte inyectada.

La Fig. 62 nos muestra el comportamiento del crecimiento que tiene el poliuretano dentro de la cavidad una vez que ha sido depositado en toda la base con una inclinación del molde de 1 grado con respecto a la horizontal.

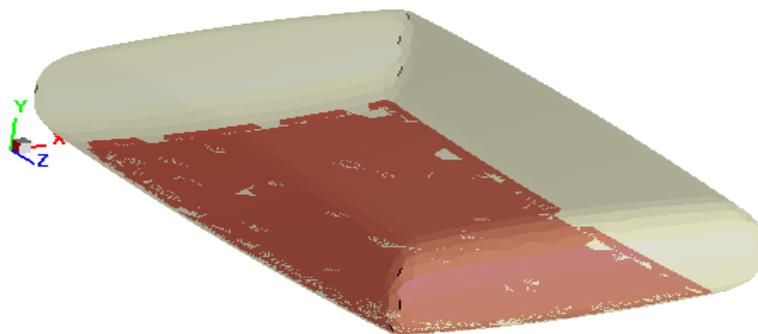


Moldex3D

Run 20:Almohada 60x40x140_salidas.mfe/PU_PU-2_2.mtx/Almohada R15_3_4_1740.pro
 No. Air Trap:38 (Interior:0, Surface:38)
 1740 gr, incl. 5 grados, 540 mmHg 25C Regado en toda la base, sin ventilas

Fig. 63. Resultados aire atrapado de simulación 5B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 63 se aprecia la cantidad de atrapamientos de aire contenida en la pieza inyectada llegando a un valor de 38, distribuidos gráficamente en la superficie de la almohada.



Moldex3D

Run 20:Almohada 60x40x140_salidas.mfe/PU_PU-2_2.mtx/Almohada R15_3_4_1740.pro
 At 100% (46.5 sec) (Enhanced Solver),Ep=94,426 Ec=0 Em=0 <Mixed>
 1740 gr, incl. 5 grados, 540 mmHg 25C Regado en toda la base, sin ventilas

Fig. 64. Líneas de unión en la parte simulación 5B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

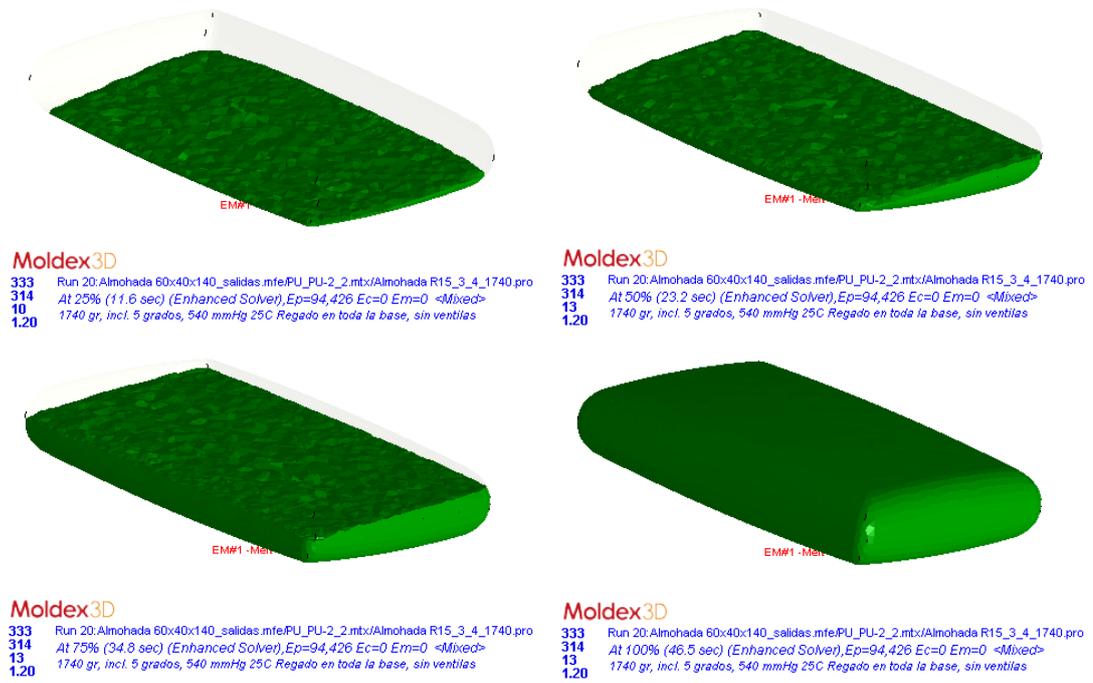


Fig. 65. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 5B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

Se puede diferenciar en la Fig. 64 no existe la formación de líneas de unión dispersas en toda la superficie de la parte inyectada.

La Fig. 65 nos muestra el comportamiento del crecimiento que tiene el poliuretano dentro de la cavidad una vez que ha sido depositado en toda la base con una inclinación del molde de 5 grados con respecto a la horizontal.

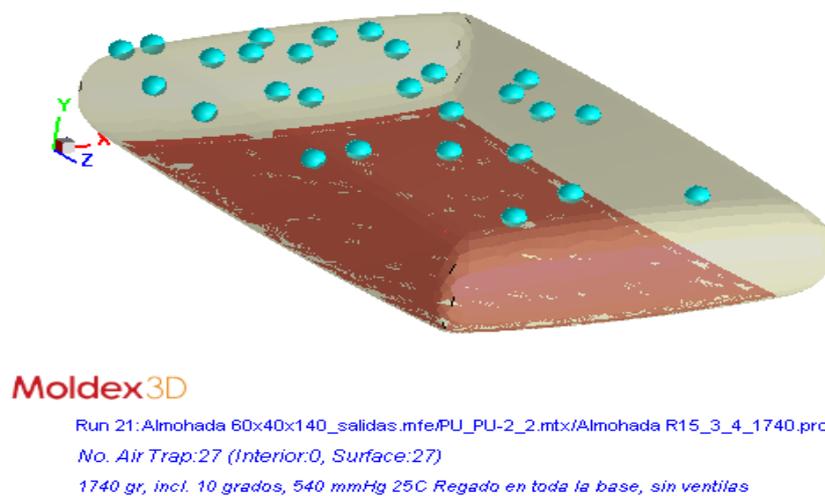
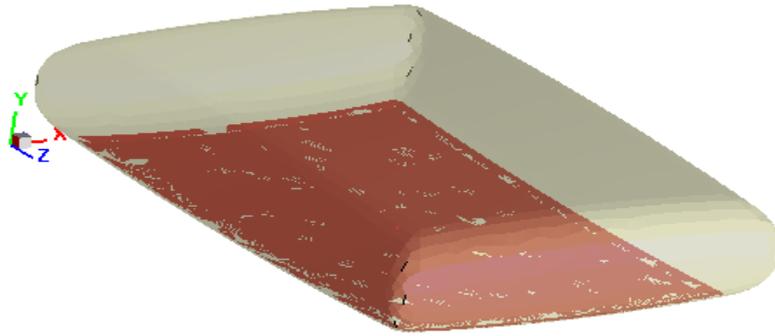


Fig. 66. Resultados aire atrapado de simulación 6B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva



Moldex3D

Run 21:Almohada 60x40x140_salidas.mfe/PU_PU-2_2.mtx/Almohada R15_3_4_1740.pro
 At 100% (46.3 sec) (Enhanced Solver),Ep=94,426 Ec=0 Em=0 <Mixed>
 1740 gr, incl. 10 grados, 540 mmHg 25C Regado en toda la base, sin ventilas

Fig. 67. Líneas de unión en la parte simulación 6B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 66 se aprecia la cantidad de atrapamientos de aire contenida en la pieza inyectada llegando a un valor de 27, distribuidos gráficamente en la superficie de la almohada.

Se puede diferenciar en la Fig. 67 no existe la formación de líneas de unión dispersas en toda la superficie de la parte inyectada.

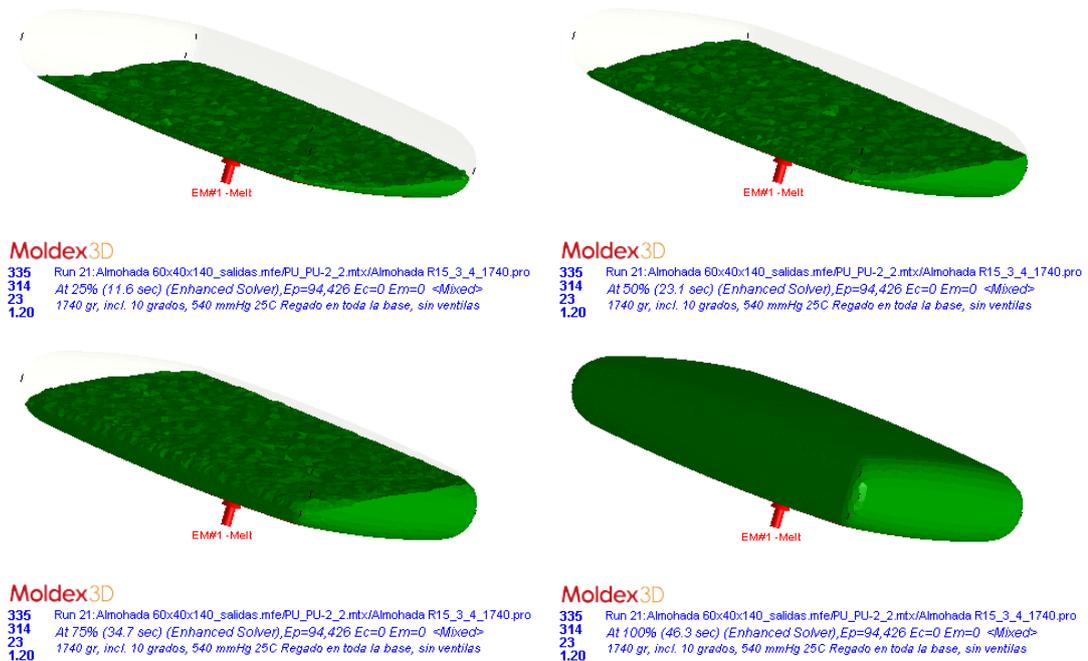


Fig. 68. Llenado de cavidad 25%, 50%, 75%, 100% simulación 6B. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

La Fig. 68 nos muestra el comportamiento del crecimiento que tiene el poliuretano dentro de la cavidad una vez que ha sido depositado en toda la base con una inclinación del molde de 10 grados con respecto a la horizontal.

Como resultado de las simulaciones se obtienen los siguientes valores:

Tabla 4
RESUMEN DE RESULTADOS DE SIMULACIONES 2

Modelo	Sub-grupo de prueba	Ubicación de lugar de inyección	Inclinación de molde [grados]	Aire atrapado	Línea de unión
1	B		1	48	30
2	B	2 puntos	5	42	24
3	B	opuestos	10	38	20
4	B	Regado	1	57	0
5	B	uniforme en	5	38	0
6	B	la base	10	27	0

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 4 se puede valorar que la variación del ángulo de inclinación del molde logra una disminución de la cantidad de aire atrapado. Esto debido a que el crecimiento del material desplaza al aire contenido al interior del molde hacia la parte frontal de la cavidad que es la última en llenarse y que por medio de la inclinación dada se tiende a centralizar.

En el caso expuesto en que la forma de la cavidad tiende a formar una gran burbuja en la parte superior debido a su forma de domo sería bastante difícil tratar de evacuar el aire si el molde estuviese en una posición totalmente horizontal.

Sin embargo, una mayor incidencia en la calidad de la pieza obtenida recae sobre la forma de inyectarla.

Es así como se aprecia que cuando el regado se lo hace puntualmente en dos esquinas opuestas se forman una mayor cantidad de líneas de unión o líneas de soldadura. Esto se puede explicar si se analizan los gráficos expuestos en la Fig. 53, Fig. 56 y Fig. 59

al notar que se forman dos masas o frentes de crecimiento que al encontrarse pueden llegar a generar este fenómeno.

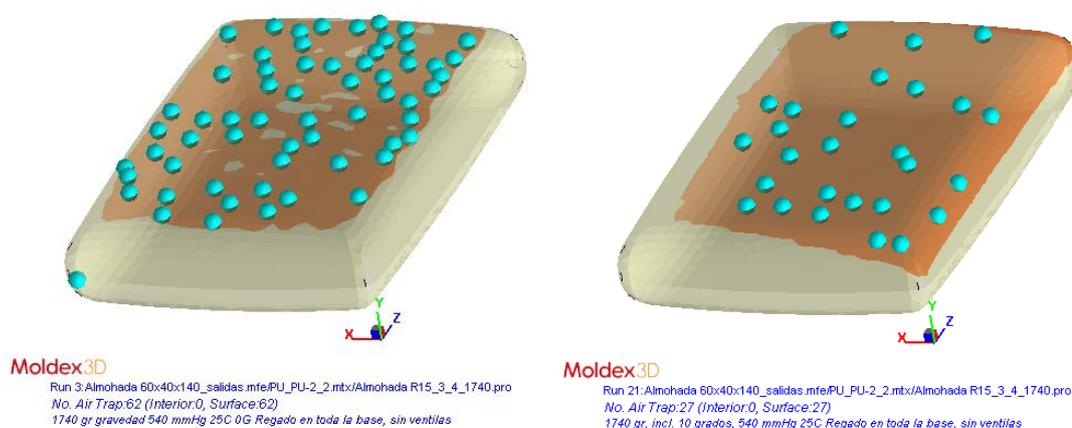


Fig. 69. Comparativo de la posición de concentración de aire al 99,9% de llenado de la cavidad con inclinaciones de 0 y 10 grados. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 69, se puede ver como la inclinación dada al molde llega a concentrar hacia una sola dirección al aire contenido en la cavidad.

Con estas consideraciones se consigue una mejora al momento de diseñar el molde y posicionar las ventilas para una adecuada evacuación del aire.

De esta manera se plantea la siguiente simulación en donde se añaden las ventilas en el mallado de la pieza de tal forma que el aire atrapado sea evacuado.

Tabla 5
PARÁMETROS DE SETEO DE SIMULACIÓN 3

Modelo	Sub-grupo de prueba	Ubicación de lugar de inyección	Cantidad de material [gr]	Inclinación de molde [grados]	Salidas de aire
1	C	Regado uniforme en la base	1740	10	con

La Tabla 5 corresponde al planteamiento de la tercera simulación en donde se escoge el regado uniforme en la base para realizar la inyección del poliuretano, en todos los casos se mantiene la cantidad de material inyectado, la inclinación del molde toma una

valor de 10 grados con respecto a la horizontal y se aplican salidas para el aire atrapado al interior de la cavidad

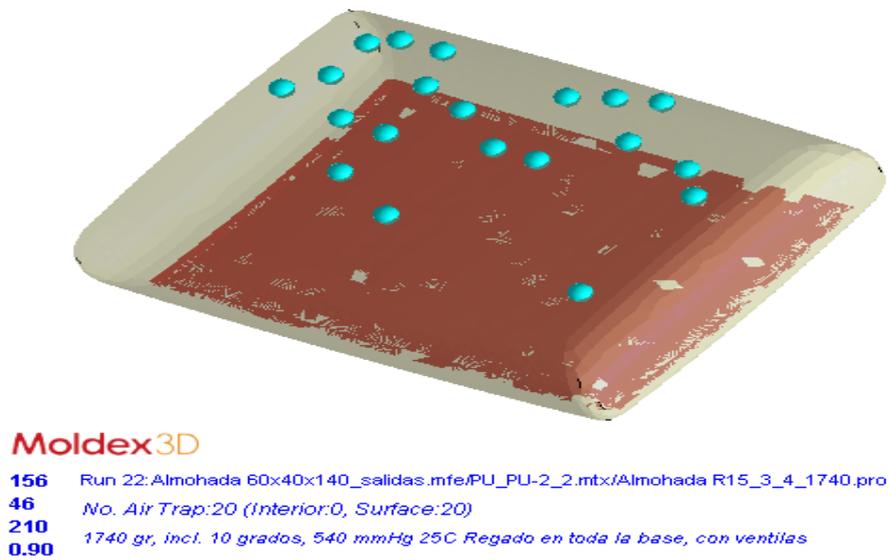


Fig. 70. Resultados aire atrapado de simulación 1C. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

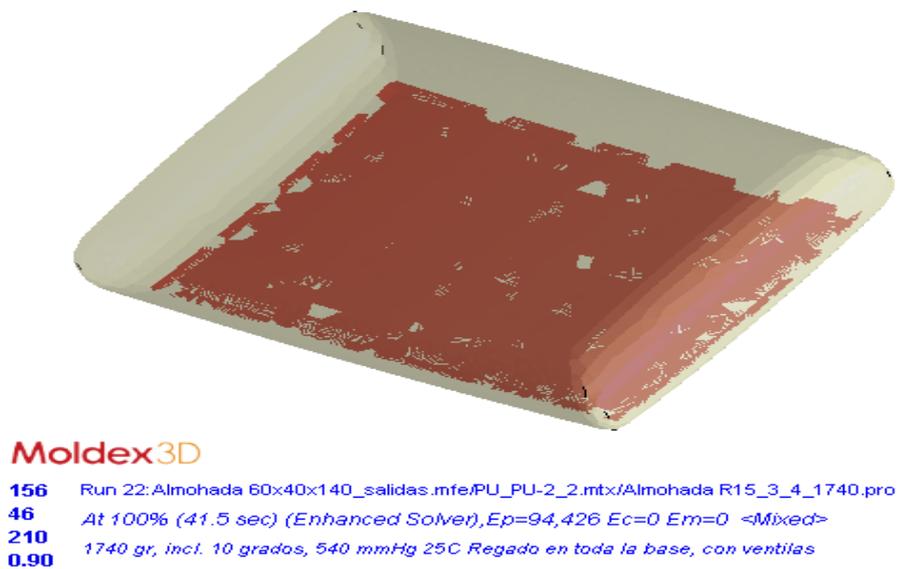


Fig. 71. Líneas de unión en la parte simulación 1C. Elaborado por: Simulación Moldex3D Pablo Sandoval, María Silva

Como resultado de la simulación se obtienen los siguientes valores:

Tabla 6
RESUMEN DE RESULTADOS DE SIMULACIONES 3

Modelo	Sub-grupo de prueba	Ubicación de lugar de inyección	Cantidad de material [gr]	Inclinación de molde [grados]	Salidas de aire	Aire atrapado	Línea de unión
1	C	Regado uniforme en la base	1740	10	con	20	0

A partir de los resultados obtenidos de la simulación dispuestos en la Tabla 6, se tiene que la mejor opción para la fabricación de este modelo de almohada es la elaboración del molde con una inclinación de 10 grados con respecto a la horizontal

La colocación de ventilas para salida de aire en la parte frontal superior de la cavidad ha favorecido a la evacuación casi total de los gases.

El patrón de regado definido en toda la base de la cavidad ha evitado el tener líneas de unión en la pieza inyectada.

La cantidad de material inyectado se ha mantenido en 1740 gr con el fin de garantizar la densidad de diseño.

Con estos resultados se procederá a validar físicamente el proceso de inyección en el siguiente capítulo de este trabajo.

CAPÍTULO 3

VALIDACIÓN DE DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN Y COMPARACIÓN CON DATOS REALES

En el capítulo anterior se obtuvo el resultado de las simulaciones descrito en la Tabla 6 como el más apto para conseguir un producto sin mayores defectos.

Para validar esta opción se va a realizar una serie de pruebas que permitan visualizar la fabricación de una parte basándose en los resultados de la simulación designada como la opción más favorable.

4.1. Parámetros de prueba

En la Tabla 7 se especifican los parámetros de inyección bajo los cuales se realizó la prueba física de la inyección de la almohada de 660x400x140 mm

Tabla 7
PARÁMETROS DE INYECCIÓN DE MUESTRAS FÍSICAS.

Parámetro	Set point
Cantidad de material [gr]	1740
Ubicación de lugar de inyección dentro de la cavidad	Regado uniforme en la base de la cavidad
Inclinación de molde [grados]	10,2
Salidas de aire	7 en parte frontal de la cavidad de 3 mm de diámetro 2 en parte posterior de la cavidad de 3 mm de diámetro
Temperatura de molde [°C]	44,1 cavidad superior 44 cavidad inferior
Temperatura ambiente [°C]	25
Material	Poliuretano de calidad automotriz Poliol: Rubiflex SC 38695 Isocianato: Suprasec 7507
Relación de mezcla [%]	72,4

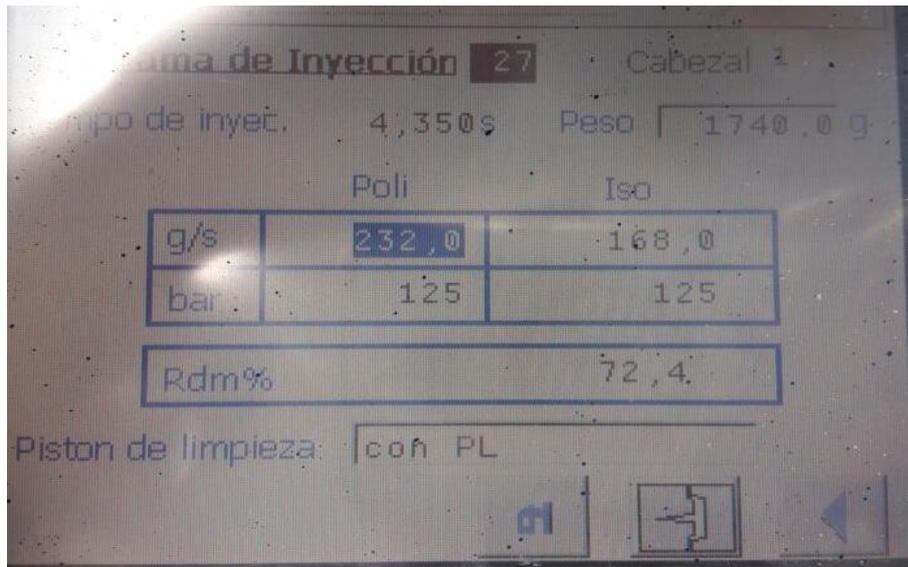


Fig. 72. Pantalla de ingreso de parámetros de inyección en máquina inyectora Krauss Maffei RSC4040. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva

Para el ingreso de los parámetros, la máquina inyectora posee una interfaz que permite visualizar los datos del proceso a realizarse (Fig. 72).



Fig. 73. Molde de inyección de almohada 600x400x140 según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva

La Fig. 73 muestra el molde de inyección con una inclinación de 10 grados con respecto a la horizontal.



Fig. 74. Inyección de almohada 600x400x140 según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva



Fig. 75. Almohada 600x400x140 inyectada según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva

En la Fig. 74 se observa el proceso de inyección de la almohada, depositando el material en toda la superficie de la base del molde de acuerdo a la opción determinada como más óptima para la fabricación de la parte (Fig. 75)

4.2. Resultados de prueba física

A continuación, se detallan los resultados obtenidos después de 2 de inyecciones en el molde del producto final de acuerdo con los parámetros de simulación.

Tabla 8
 RESULTADOS DE INYECCIÓN DE MUESTRAS FÍSICAS.

Peso de la parte [gr]	Aire atrapado	Líneas de unión	Densidad obtenida [kg/m ³]
1660,4	3 atrapamientos de aire superficiales de dimensiones entre 30 y 60 mm y múltiples atrapamientos superficiales con dimensiones entre 1 y 13 mm en la parte frontal superior de la parte inyectada	No se aprecian	59,09 en núcleo de la parte

En la Tabla 8 se determina que, como resultado de la inyección, se obtiene una muestra física con un peso de 1660,4 gramos, con varios atrapamientos de aire, sin líneas de unión y con una densidad de 59,09.



Fig. 76. Peso de la almohada 600x400x140 inyectada según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva



Fig. 77. Atrapamientos de aire en almohada 600x400x140 inyectada según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva

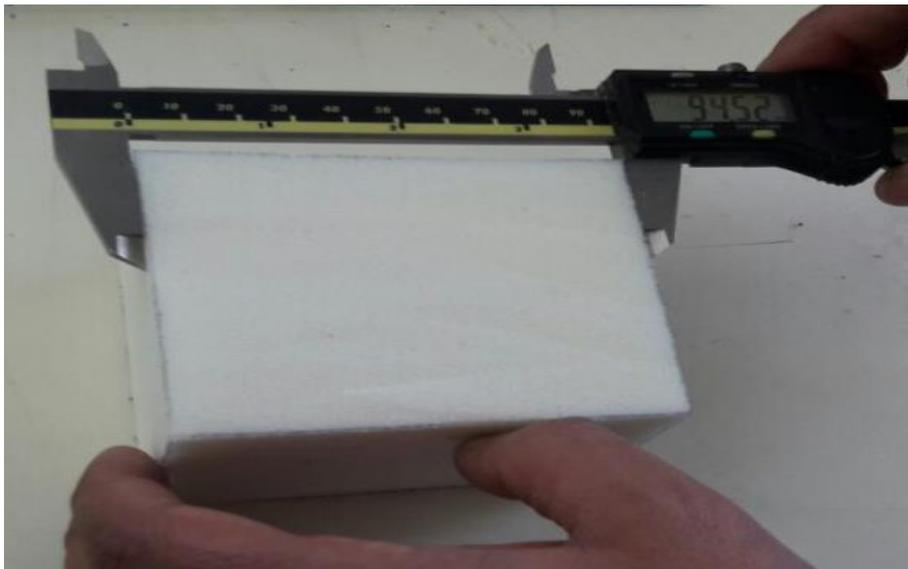


Fig. 78. Determinación de la densidad de almohada 600x400x140 inyectada según parámetros de simulación. Elaborado por: Pablo Sandoval, María Silva

Al comparar los resultados obtenidos de las pruebas físicas se puede hacer las siguientes observaciones:

- Existe una diferencia de 79,6 gramos entre la cantidad de material que se parametriza en la máquina de inyección (Fig. 72) y el peso de la almohada (Fig. 76) al ser retirada del molde.

Se debe tomar en cuenta que a través de las ventilas dispuestas en el molde fluye poliuretano una vez que este ha llenado la cavidad por completo y la presión interna se ha elevado.

Esta cantidad de material puede determinar pesándolo. Para este caso la cantidad de material depositado en las ventilas es de 24,3 gramos, lo que deja un faltante de 55,3 gramos.

Si se sabe que uno de los componentes del poliuretano es el polioliol y este posee como parte de su composición química al agua que al mezclarse con el isocianato producen CO₂ como agente de expansión de la espuma [17], por lo tanto se podía decir que parte de este peso perdido es el fruto de la reacción química del material, sin dejar de lado posibles pérdidas producidas en la máquina inyectora.

- Los atrapamientos de aire de tamaños entre 30 y 60 mm encontrados en la prueba física (Fig. 77) pueden ser eliminados creando en la cavidad del molde salidas de aire adicionales; sin embargo, corresponden a los resultados arrojados en la simulación, la gran mayoría de estos atrapamientos están en el rango de 1 a 13 mm y no representan un mayor problema al momento de evaluar la calidad de la parte.
- La densidad obtenida en la prueba física (Fig. 78) es de 59,09 kg/m³, que comparada con la densidad referencial de 60 kg/m³ da una diferencia del 1,52 % (0,91 kg/m³).

Esta diferencia está relacionada con las pérdidas de material en las ventilas y en la máquina debido a que, a menor cantidad de material depositado en el producto la densidad se verá reducida, Ec.3.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE COSTOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Análisis de costos

En Ecuador en las fábricas de partes de poliuretano el diseño del molde lo realiza un ingeniero que es el encargado de definir los diferentes requerimientos que un molde debe cumplir, tales como la forma y dimensiones de la cavidad.

Este proceso se lo realiza considerando los siguientes parámetros:

- Diseño de la parte.
- Porcentajes de contracción.
- Ubicación de ventilas para desalojo de aire.
- Patrones de regado dentro de la cavidad.
- Cantidad de material a inyectarse basándose en la especificación de densidad de la espuma y peso total.

Todo esto con el fin de obtener una pieza completa, sin defectos y de acuerdo a requerimientos del cliente final.

Este diseño pasa por un proceso en el cual se deben considerar dos realidades:

- Una parte formada en un software de diseño, en donde como resultado se obtiene planos, sólidos tridimensionales y plantillas que son utilizadas por el modelador o por el operador de una máquina de control numérico para la construcción y verificación del molde.
- Una parte física que es entregada al modelador para que a partir de esta se realice un proceso de endurecido por medio de resinas y posterior fundido del molde, cabe indicar que este proceso es únicamente utilizado si el molde es fabricado con resinas epóxicas.

En cualquiera de los casos posterior a la obtención del molde se deben realizar pruebas en planta para la verificación de las características de la parte obtenida y validación del proceso de fabricación.

Es aquí en donde la simulación por medio de un software especializado tiene una gran importancia y por esta razón se realizará un cuadro de costos en donde se contrapongan las dos opciones, por un lado, el método tradicional utilizado en las empresas ecuatorianas y por otro la simulación del llenado del molde valiéndose de un software.

Como datos necesarios para la estimación de costos se toman los siguientes:

Tabla 9
PARÁMETROS PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS

Ítem	Costo	Costo Hora
Máquina inyectora de alta presión (und)	160704	16,74
Ingeniero (mes)	1200	7,5
Operador (mes)	600	3,75
Materia prima (kg.)	4,3	-

Con los valores antes mencionados y tomando en cuenta que en el proceso actual se realizan al menos 15 pruebas hasta tener una pieza con las especificaciones requeridas se tiene:

Tabla 10
 RESULTADOS DE CÁLCULO DE COSTOS PARA PROCESO ACTUAL, SIN SIMULACIÓN.

Proceso / Tiempo	Diseño, y tratamiento de solido 3D	Pruebas de funcionamiento de molde y definición del proceso	Total [USD]
Tiempo Ingeniería [horas]	8	24	\$240
Tiempo Operadores [horas]	0	48	\$180
Tiempo Máquina [horas]	0	8	\$133,92
Cantidad de materia Prima [kg]	0	26,1	\$112,23-
TOTAL			\$666,15

De acuerdo con el nuevo proceso planteado en donde se van a realizar máximo 5 pruebas en planta hasta obtener una pieza con las especificaciones requeridas gracias a la implementación de simulaciones previas con la ayuda de un software de especializado se tiene:

Tabla 11
 RESULTADOS DE CÁLCULO DE COSTOS PARA PROCESO UTILIZANDO UN SIMULADOR EN LA FASE DE DISEÑO.

Proceso / Tiempo	Diseño, tratamiento de solido 3D e ingreso de parámetros Moldex3D	Pruebas de funcionamiento de molde y definición del proceso	Total [USD]
Tiempo Ingeniería [horas]	8	4	\$90
Tiempo Operadores [horas]	0	8	\$30
Tiempo Máquina [horas]	0	4	\$66,96
Cantidad de materia Prima [kg]	0	8,7	\$37,41
TOTAL			\$224,37

Se debe considerar que en un año estos costos se multiplican por todos los moldes que se realicen, estableciendo que se fabrican en promedio en un año 20 moldes, entonces:

Tabla 12
TOTAL DE AHORRO POR AÑO UTILIZANDO UN SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Costo de proceso actual (USD)	\$666,15
Costo de proceso con simulación (USD)	\$224,37
Total de ahorro en un año (USD)	\$8835,60

Si el costo aproximado del software es de 35000 USD por una licencia básica y si adicionalmente se debe considerar un costo de mantenimiento anual de 10000 USD que incluye la posibilidad de tener las últimas actualizaciones y soporte técnico.

Se puede concluir sin entrar en análisis detallados, que es más conveniente subcontratar el proceso de simulación, en donde el poliuretano será una pequeña parte del total de uso del software.

Esto considerando adicionalmente que la industria del poliuretano en el Ecuador tiene un volumen de producción escaso y muy fluctuante en comparación con otros mercados a nivel mundial.

4.2. Conclusiones y recomendaciones

4.2.1. Conclusiones

- El proceso de simulación de llenado del molde no solo tiene como ventaja la reducción del costo de fabricación de una parte en un 297 % sino también se lo puede traducir en la posibilidad de la toma de decisiones de manera oportuna en la etapa de diseño al hacer que estos tiempos se reduzcan en un 25%. La reducción de tiempo de validación hace posible que la atención del diseñador se centre en el afinamiento de otros parámetros o facilidades que pueden llegar a detectar piezas defectuosas en el proceso de fabricación en serie.
- Como resultado de la simulación del llenado del molde se obtiene un modelo optimizado que tiene como parámetros el regado del material en toda la base de la cavidad, una inclinación del molde de 10 grados con respecto a la horizontal y la colocación de ventilas para salida de aire en la parte frontal de la tapa superior del molde.
- Para obtener una parte con la cantidad de material requerido se debe considerar que existe una diferencia del 4,57 % entre la cantidad que se parametriza en la máquina de inyección y el peso de la almohada al ser retirada del molde. Se hace necesario aplicar este porcentaje de corrección a la cantidad de material a ser dosificado por la máquina para obtener partes con el peso y densidad dentro de especificaciones.
- Por los escasos volúmenes de producción y por tratarse de una variedad de productos poco desarrollados en el mercado ecuatoriano, no cabe la opción de la adquisición de un software de la calidad de Moldex3D ya que representaría un valor de 35000 dólares por una licencia y 10000 dólares anuales por mantenimiento y actualizaciones, esto contrastado con un ahorro de 8835 dólares en el caso de que solo se lo utiliza en la inyección de poliuretano.

- Considerar que la utilización de un software para simulación de procesos reduce significativamente el tiempo utilizado para la validación de resultados en un 25 % y permite a una organización elevar sus estándares de calidad.

4.2.2. Recomendaciones

- Es importante conocer el proceso productivo y los parámetros de trabajo para dar al programa la mayor cantidad de datos reales y así obtener una simulación con resultados confiables.
- Este proyecto de investigación ha sido logrado por medio de alianzas estratégicas con empresas tanto nacionales como extranjeras, se recomienda no cerrar las puertas a estas opciones que pueden resultar valiosas al momento de investigar sobre un tema poco desarrollado como lo es el poliuretano.
- Por medio de la incorporación del método de elementos finitos se logra determinar el comportamiento de parámetros tales como temperatura, viscosidad, presión, densidad, etc. Se recomienda poner especial cuidado en la elaboración del mallado de la parte, ya que se puede llegar a desestimar resultados o tener una precisión muy baja en la simulación.
- El software Moldex3D es capaz de modelar una gran variedad de procesos de inyección de plásticos a más del proceso de poliuretano, es recomendable su uso en la industria de inyección de plástico en donde existe un gran volumen de desarrollo de productos.

Referencias

- [1] Educarchile, «educarchile.cl,» 03 Octubre 2007. [En línea]. Available: <http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=136400>. [Último acceso: 28 Abril 2017].
- [2] P. Educativo, «portaleducativo,» 03 Julio 2015. [En línea]. Available: <https://www.portaleducativo.net/cuarto-medio/9/clasificacion-de-los-polimeros>. [Último acceso: 28 Abril 2017].
- [3] J. McMurry, Organic Chemistry, Belmont: Brooks/Cole, 2011.
- [4] M. F. Sonnenschein, Polyurethanes, New Jersey: Wiley, 2014.
- [5] J. y. L.-S. T. Xu, « Microcellular Injection Molding,» de *Microcellular Injection Molding*, Pennsylvania, Wiley, 2010, p. 190.
- [6] DECO-MOL BDN, S. L., «decomol.cat,» 18 Julio 2013. [En línea]. Available: <http://decomol.cat/servicios/moldes-para-inyeccion-de-poliuretano-inyeccion-piezas-poliuretano/>. [Último acceso: 18 Mayo 2017].
- [7] Moldes y matrices, «MOLDES y MATRICES,» MOLDESYMATRICES.COM, 14 Mayo 2016. [En línea]. Available: <http://www.moldesymatrices.com/Gazechim-resinas-con-carga-Al.htm>. [Último acceso: 18 Mayo 2017].
- [8] POLICAM Poliuretanos Camarasa SL, «Policam,» Poliuretanos Camarasa SL, 20 Junio 2011. [En línea]. Available: <http://policam.es/index.php?idioma=es&loc=aplicaciones>. [Último acceso: 18 Mayo 2017].
- [9] Alejandro Cruz Santos, «unam.mx,» UNAM, 27 Marzo 2017. [En línea]. Available: <http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/mecsol/Tema7.pdf>. [Último acceso: 13 Enero 2018].
- [10] Universidad Pontificia Comillas Madrid, «COMILLAS.EDU,» COMILLAS.EDU, [En línea]. Available: https://www.iit.comillas.edu/carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf. [Último acceso: 13 Enero 2018].
- [11] Consorci De Serveis Universitaris De Catalunya, «tdx.cat,» Carme Monserrat i Termes, 20 Abril 2017. [En línea]. Available:

- <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6294/06Efv06de23.pdf;sequence=6>. [Último acceso: 13 Enero 2018].
- [12] Universidad de las Americas-Puebla, «Home – Universidad de las Américas Puebla (UDLAP),» 28 Diciembre 2017. [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/jimenez_p_a/capitulo2.pdf. [Último acceso: 29 Enero 2018].
- [13] F. Beltrán, «De Mecánica. Principal,» Septiembre 1999. [En línea]. Available: <http://www.demecanica.com/TeoriaEst/archivos/TeoriaMEF.pdf>. [Último acceso: 01 Febrero 2018].
- [14] A. D. MORCILLO, «Universidad Politécnica de Cartagena,» Febrero 2000. [En línea]. Available: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/772/adm.pdf;jsessionid=D6F146C8BB5218F1CBB3BFA4D55E8A07?sequence=1>. [Último acceso: 01 Febrero 2018].
- [15] S. Frost, «Reaction Injection Molding (RIM) Company | RIM Manufacturing,» 12 Mayo 2013. [En línea]. Available: <http://www.reactioninjectionmolding.com/rim-process/>. [Último acceso: 01 Febrero 2018].
- [16] CoreTech System, «Moldex3D Help,» 4 Septiembre 2017. [En línea]. Available: http://support.moldex3d.com/r15/en/index.html?modelpreparation_moldex3d_designer.html. [Último acceso: 29 Enero 2018].
- [17] P. Michael Szycher, Szycher'S handbook of Polyurethanes, Segunda Edición ed., Boca Raton Florida: CRC Press, 2013.
- [18] J. C. Campoverde, Interviewee, *Ingeniero*. [Entrevista]. 30 Enero 2018.
- [19] W. Pamela, «Digital Engineering,» 1 Febrero 2017. [En línea]. Available: <http://www.digitaleng.news/de/what-injection-molding-simulation-software-can-do-for-you/>. [Último acceso: 26 Febrero 2018].
- [20] D. M. S. Maier, «SlideShare,» 07 Julio 2009. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/guestd5c119/polimeros-1694095>. [Último acceso: 28 Abril 2017].

- [21] P. Quimicos, «Blogspot.com,» 23 Marzo 2008. [En línea]. Available: <http://polimerosquimicos.blogspot.com/2008/03/clasificacin-de-los-polmeros.html>. [Último acceso: 28 Abril 2017].
- [22] L. Simon, «ISOPA,» 04 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.polyurethanes.org/es/que-es/composicion-y-produccion>. [Último acceso: 29 Abril 2017].
- [23] WebNode, «WebNode,» [En línea]. Available: <http://kary0.webnode.mx/poliuretano/estructura-quimica/>. [Último acceso: 29 Abril 2017].
- [24] Javier, Pajón, «uhu.es,» 10 Octubre 2009. [En línea]. Available: <http://www.uhu.es/javier.pajon/apuntes/finitos.pdf>. [Último acceso: 22 Enero 2018].
- [25] O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor, El Método de los Elementos Finitos Vol. 1, Barcelona: McGraw-Hill, 1994.
- [26] Altia Consultores S.a., «UC3M,» 29 Diciembre 2011. [En línea]. Available: http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/Capitulo_9.-Introduccion_al_metodo_de_los_elementos_finitos.pdf. [Último acceso: 29 Enero 2018].
- [27] M. K. D. L. M. J. K. Pavel Ferkl, «Multi-scale modelling of expanding polyurethane foams: Coupling macro- and bubble-scales,» *Chemical Engineering Science*, nº 12, pp. 56-57, 2016.
- [28] D. S. A. L. O. A. S. Ganiyu Kayode Latinwo, «Evaluation and Modelling of the Dynamics of Filled Flexible,» *Nature and Science*, nº 8, pp. 642-649, 1994.
- [29] C. Defonseka, Practical Guide to Flexible Polyurethane Foams, Shawbury: Smithers Rapra Technology Ltd., 2013.
- [30] Moldes Saltillo, «Moldes Saltillo, Moldes fundidos en aluminio para la inyección de poliuretano.,» 02 Enero 2008. [En línea]. Available: <http://moldessaltillo.com/servicios/>. [Último acceso: 18 Mayo 2017].