

ESTUDIO TEÓRICO- PRACTICO DEL SISTEMA DE MOLDEO CERRADO
POR INFUSIÓN CON VACÍO Y CONTRAMOLDE FLEXIBLE DE SILICONA ,
PARA LA FABRICACIÓN DE PIEZAS EN POLIESTER REFORZADO CON
FIBRA DE VIDRIO

ANDRÉS FELIPE ANAYA ALFARO

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2006

ESTUDIO TEÓRICO- PRACTICO DEL SISTEMA DE MOLDEO CERRADO
POR INFUSIÓN CON VACÍO Y CONTRAMOLDE FLEXIBLE DE SILICONA ,
PARA LA FABRICACIÓN DE PIEZAS EN POLIESTER REFORZADO CON
FIBRA DE VIDRIO

por:

Andrés Felipe Anaya Alfaro

Trabajo de grado para optar por el
Título de
Ingeniero Mecánico

Asesor Principal
Juan Santiago Villegas López.
Ingeniero Mecánico.

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE PLÁSTICOS
MEDELLÍN
2006

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Mecánico Juan Santiago Villegas López por la asesoría prestada para el desarrollo de este proyecto.

A la gerencia y el personal administrativo del área de Ingeniería de la fábrica de botes de Eduardoño S.A. por ser parte activa en la formulación y ejecución del proyecto.

A los integrantes del área técnica de la línea de Poliéster Insaturado de Andercol S.A., por suministrarme información y experiencias que fueron muy valiosas para la ejecución del proyecto.

Finalmente a todas aquellas personas que me han sido un apoyo fundamental en la formación personal, académica y laboral.

TABLA DE CONTENIDO

1	PRESENTACIÓN	17
2	ANTECEDENTES	19
3	OBJETO DE ESTUDIO	21
4	JUSTIFICACIÓN	22
5	IMPORTANCIA.....	23
6	OBJETIVO GENERAL.....	24
7	OBJETIVOS ESPECIFICOS	25
8	BENEFICIARIO DIRECTO	26
9	TECNICAS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICO REFORZADO	27
9.1	CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS DE TRANSFORMACIÓN SEGÚN MOLDE.	27
9.1.1..	Procesos de transformación por moldeo abierto.....	28
9.1.2.	Procesos de transformación por moldeo cerrado.....	30
9.2	¿POR QUÉ CAMBIAR A SISTEMAS DE MOLDEO CERRADO ?.....	37
9.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MOLDEO CERRADO	40

10	SISTEMAS DE MOLDEO A TRABAJAR.....	45
10.1	MOLDEO POR CONTACTO A MANO.	45
10.2.	MOLDEO CERRADO CCBM.....	55
10.2	MOLDEO CERRADO VACUUM ASISTED RESIN TRANSFER MOULDING (VARTM).....	81
11	ENSAYOS REALIZADOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MOLDEO CERRADO CCBM	91
11.1	ENSAYOS REALIZADOS A LA RESINA POLIÉSTER.	92
11.1.1	Exotermia a diferentes porcentajes de catalización.	93
11.1.2	Exotermia para diferentes relaciones de MEK-AAP.....	96
11.2	ENSAYOS REALIZADOS A LA SILICONA PARA LA FABRICACIÓN DEL CONTRAMOLDE.	99
11.2.1	Descripción del procedimiento.	99
11.2.2	Resultados obtenidos y conclusiones.	100
12	PIEZAS FABRICADAS EN P.R.F.V.	103
12.1	PIEZA PROTOTIPO.	103
12.2	PIEZAS FABRICADAS POR EL SISTEMA DE MOLDEO CERRADO CCBM.....	104
12.2.1	Descripción del procedimiento.	105
12.2.2	Resultados obtenidos.	105
12.2.3	Conclusiones del proceso.....	111
12.2.4	Simulaciones realizadas del sistema de moldeo cerrado CCBM.	114

12.3	PIEZAS FABRICADAS POR EL SISTEMA DE MOLDEO CERRADO	
VARTM.....		118
12.3.1	Descripción del procedimiento.....	118
12.3.2	Resultados obtenidos.....	118
12.3.3	Conclusiones del proceso.....	120
12.4	PIEZA FABRICADA POR EL SISTEMA DE MOLDEO ABIERTO POR	
CONTACTO A MANO.....		121
12.4.1	Resultados obtenidos.....	121
13	ANALISIS DE COSTOS	123
13.1	SISTEMA DE MOLDEO CERRADO CCBM.....	123
13.1.1	Costo de la adecuación de la pestaña del molde.....	123
13.1.2	Costo del contramolde.....	124
13.1.3	Costo marco para sello.....	125
13.1.4	Inversión requerida.....	126
13.1.5	Costo por pieza fabricada.....	127
13.2	SISTEMA DE MOLDEO CERRADO VARTM.....	128
13.2.1	Inversión requerida.....	128
13.2.2	Costo por pieza fabricada.....	129
13.3	SISTEMA DE MOLDEO POR CONTACTO A MANO.....	129
13.3.1	Costo por pieza fabricada.....	130
13.4	COMPARACIÓN DE COSTOS PARA FABRICACIÓN DE PIEZA	
PROTOTIPO		130
13.5	RELACIONES PARA ESTABLECER LOS COSTOS SEGÚN LA	
GEOMETRÍA DE LA PIEZA A FABRICAR.....		133

13.5.1	Sistema de moldeo cerrado CCBM.....	133
13.5.2	Sistema de moldeo cerrado VARTM.....	134
13.5.3	Sistema de moldeo abierto por contacto a mano.....	135
14	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	136
15	BIBLIOGRAFIA.....	138
15.1	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS TOMADAS DE LIBROS	138
15.2	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS DIGITALES.....	139

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Sistema de moldeo por contacto a mano.....	29
Ilustración 2 Sistema de moldeo por proyección simultanea.....	29
Ilustración 3 Sistema de moldeo por enrollamiento de filamentos	30
Ilustración 4 Sistema de moldeo por centrifugado	30
Ilustración 5 Moldeo por transferencia de reina (RTM)	32
Ilustración 6 Sistema de moldeo RTM-Light.....	33
Ilustración 7 Moldeo a presión y temperatura	33
Ilustración 8 Moldeo por prensado en frío	34
Ilustración 9 Moldeo por bolsa de vacío	34
Ilustración 10 Moldeo por extrusión ó pultrusión	35
Ilustración 11 Moldeo con autoclave	36
Ilustración 12 Moldeo CCBM.....	36
Ilustración 13 Moldeo Vacuum Asisted Resin Transfer Moulding (VARTM).....	37
Ilustración 14 Sistema de moldeo cerrado	41
Ilustración 15 Flujo de proceso del sistema de moldeo por contacto a mano	46
Ilustración 16 Fabricación modelo.....	47
Ilustración 17 Brillada modelo	47
Ilustración 18 Aplicación de Tooling gel-coat	48
Ilustración 19 Laminación molde	49
Ilustración 20 Estructura molde.....	50
Ilustración 21 Molde casco	51
Ilustración 22 Aplicación gel-coat.....	52
Ilustración 23 Ubicación tejido de refuerzo moldeo por contacto a mano	53
Ilustración 24 Diagrama de flujo sistema de moldeo cerrado CCBM	56

Ilustración 25 Disposición de cera calibrada	58
Ilustración 26 Sellado unión de secciones de cera calibrada aplicada.....	59
Ilustración 27 Aplicación primera capa de silicona del contramolde empleado en el sistema de moldeo CCBM.....	60
Ilustración 28 Aplicación silicona para la fabricación del contramolde empleado en el sistema de moldeo CCBM	61
Ilustración 29 Contramolde fabricado para el sistema de moldeo CCBM	62
Ilustración 30 Fabricación puntos de infusión de resina sobre el contramolde en el sistema de moldeo CCBM.....	64
Ilustración 31 Perfil del marco para el sello y cierre de los moldes en el sistema de moldeo CCBM.....	65
Ilustración 32 Fabricación del marco el moldeo CCBM.....	66
Ilustración 33 Empaques marco para sello en moldeo CCBM	67
Ilustración 34 Acople para conexión de vacío en moldeo CCBM.....	68
Ilustración 35 Preforma tejido de refuerzo en moldeo CCBM	69
Ilustración 36 Material de núcleo para sistemas de moldeo cerrado.....	70
Ilustración 37 Exceso de resina poliéster al interior de la cavidad que forman los empaques del marco en el moldeo CCBM	72
Ilustración 38 Peso tejido de refuerzo	72
Ilustración 39 Ubicación del contramolde en moldeo CCBM.....	73
Ilustración 40 Disposición de puentes de vacío en moldeo CCBM	74
Ilustración 41 Ubicación adecuada de puentes de vacío en moldeo CCBM	75
Ilustración 42 Sello del sistema en moldeo CCBM.....	76
Ilustración 43 Conexión y verificación de vacío en moldeo CCBM	77
Ilustración 44 Infusión de resina poliéster en sistema de moldeo CCBM.....	79
Ilustración 45 Cierre suministro de resina poliéster en moldeo CCBM	80
Ilustración 46 Pieza fabricada por moldeo CCBM.....	81
Ilustración 47 Diagrama de flujo del proceso de moldeo VARTM	82

Ilustración 48 Disposición sistema de transferencia de resina para moldeo VARTM.....	84
Ilustración 49 Sello sistema de moldeo VARTM	86
Ilustración 50 Membrana en nylon empleada en moldeo VARTM	87
Ilustración 51 Punto de infusión d resina en el moldeo VARTM.....	87
Ilustración 52 Verificación de vacío en el moldeo VARTM	88
Ilustración 53 Proceso de infusión de resina en el moldeo VARTM.....	89
Ilustración 54 Resultados obtenidos en ensayos de exotermia a diferentes porcentajes de catalización en resina para procesos de infusión.	95
Ilustración 55 Resultados obtenidos en ensayos de exotermia a diferentes relaciones de mezcla de peróxidos MEK-AAP	98
Ilustración 56 Molde pieza prototipo.....	104
Ilustración 57 Aplicación masilla en moldeo CCBM	113
Ilustración 58 Resultados simulación 1 moldeo CCBM con Sowtware Pam RTM	116
Ilustración 59 Resultados simulación 2 moldeo CCBM con Software Pam RTM	117
Ilustración 60 Costo unitario de pieza prototipo en función de las unidades producidas.....	132

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Caracterización de sistemas de moldeo cerrado	44
Tabla 2 Propiedades resina poliéster para procesos de infusión	92
Tabla 3 Condiciones en las que se realizaron los ensayos de exotermia a diferentes porcentajes de catalización	94
Tabla 4 Resultados obtenidos en ensayos de exotermia a diferentes porcentajes de catalización	94
Tabla 5 Condiciones en las que se realizaron los ensayos de exotermia a diferentes relaciones de mezcla de peróxidos MEK-AAP	97
Tabla 6 Resultados obtenidos en ensayos de exotermia a diferentes relaciones de mezcla de peróxidos MEK-AAP	97
Tabla 7 Resultados de ensayos a siliconas	101
Tabla 8 Resultados obtenidos de la fabricación de pieza prototipo por moldeo CCBM.....	106
Tabla 9 Resultados obtenidos de la fabricación de pieza prototipo por moldeo CCBM.....	107
Tabla 10 Resultados obtenidos de la fabricación de pieza prototipo por moldeo CCBM.....	108
Tabla 11 Resultados obtenidos de la fabricación de pieza prototipo por moldeo CCBM.....	109
Tabla 12 Resultados obtenidos de la fabricación de pieza prototipo por moldeo CCBM.....	110
Tabla 13 Resultados pieza prototipo fabricada por VARTM.....	119
Tabla 14 Resultados pieza prototipo fabricada por moldeo por contacto a mano	122

Tabla 15 Costos para la adecuación de la pestaña del molde de la pieza prototipo para moldeo CCBM.....	124
Tabla 16 Costos del contramolde de la pieza prototipo por moldeo CCBM	125
Tabla 17 Costo marco para sello de la pieza prototipo en moldeo CCBM	126
Tabla 18 Inversión requerida para la implementación del moldeo CCBM.....	127
Tabla 19 Costo de pieza prototipo fabricada por moldeo CCBM	127
Tabla 20 Inversión requerida para la implementación del moldeo VARTM.....	128
Tabla 21 Costo de pieza prototipo fabricada por moldeo VARTM	129
Tabla 22 Costo de pieza prototipo fabricada por moldeo por contacto a mano ..	130
Tabla 23 Costo unitario de pieza prototipo en función de las unidades producidas.....	131

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Relación para calcular el área para el sello del sistema en el moldeo CCBM.....	65
Ecuación 2 Relación para el calculo del costo de la adecuación de la pestaña en el moldeo CCBM	133
Ecuación 3 Relación para el calculo del costo del contramolde en el moldeo CCBM.....	134
Ecuación 4 Relación para el calculo del costo del marco para el sello del sistema en el moldeo CCBM.....	134
Ecuación 5 Relación para el calculo del costo por pieza fabricada en el moldeo CCBM.....	134
Ecuación 6 Relación para el calculo del costo por pieza fabricada en el moldeo VARTM.....	135
Ecuación 7 Relación para el calculo del costo por pieza fabricada en el moldeo por contacto a mano.....	135

1 PRESENTACIÓN

En la actualidad, existen una gran variedad de materiales plásticos y de nuevas aplicaciones, lo que convierte a este tipo de materiales en una opción para la sustitución de materiales tradicionales debido a sus ventajas en la manufactura, a sus propiedades mecánicas y su durabilidad por características químicas.

Los materiales plásticos se clasifican en dos grandes grupos, los termoplásticos y los termofijos. Los materiales termoplásticos como su nombre lo indica, son aquellos que cambian su forma o estado físico por medio de calor, y en algunos casos se requiere de presión para lograr este cambio, pudiendo volver a su estado original por medio de una nueva aplicación de calor (proceso reversible).

Los plásticos termofijos son aquellos que endurecen por medio de calor siendo necesario en algunos casos el empleo de presión para ser moldeados, pero a diferencia de los termoplásticos, los plásticos termofijos no son regenerables (proceso irreversible).

Una de las alternativas que presentan los materiales plásticos, es la fabricación de plásticos reforzados. Estos están constituidos por materiales termoplásticos ó termofijos reforzados con fibras continuas o discontinuas durante el proceso de transformación ó moldeo, el refuerzo mejora las propiedades mecánicas del plástico, generando una ventaja comparativa en algunas aplicaciones sobre materiales tradicionales, pues poseen menor peso.

Dentro de los plásticos reforzados, se encuentra el P.R.F.V.¹. Este plástico reforzado presenta gran variedad de aplicaciones por las excelentes propiedades mecánicas, físicas y químicas que se pueden obtener, sustituyendo a materiales tradicionales como el acero y la madera, en industrias, como la naval para la fabricación de embarcaciones. El P.R.F.V., está compuesto por una resina poliéster insaturada, que pertenece al grupo de los plásticos termofijos, y es reforzada con tejido de fibra de vidrio.

¹ P.R.F.V.: Poliéster reforzado con fibra de vidrio.

2 ANTECEDENTES

El sistema de moldeo cerrado CCBM² para la fabricación de piezas en P.R.F.V. es una nueva alternativa en la industria del plástico reforzado. Este método ha sido implementado en industrias de plástico Brasileñas, Norteamericanas y Europeas con muy buenos resultados. En la actualidad en Colombia este proceso no es empleado, utilizándose sistemas de moldeo abierto convencionales. (Memorias Seminario. MOLDEO CERRADO: DISEÑO DE MOLDES Y TECNICAS DE FABRICACIÓN DE PRODUCTOS. 2005)

Debido a que el método es novedoso y presenta grandes ventajas sobre métodos convencionales, se hace necesario el estudio para la posible implementación de este, con el fin de optimizar los procesos productivos en la planta de fabricación de botes de Eduardoño S.A.

Los resultados arrojados por la implementación del método de moldeo cerrado CCBM, serán comparados con métodos de moldeo tradicional, como el sistema de moldeo abierto por contacto a mano y el sistema de moldeo cerrado VARTM³. El moldeo por contacto a mano, es empleado actualmente dentro del proceso productivo de Eduardoño S.A., por esto se cuenta con información real acerca de consumos de materia prima, mano de obra y equipos requeridos para la ejecución de este sistema de moldeo.

² CCBM: (Closed Cavity Bag Moulding) Sistema de moldeo cerrado que emplea vacío para la infusión de resina poliéster y el contramolde es fabricado en una membrana de silicona.

³ VARTM: (Vaccum Asisted Resin Transfer Moulding) Sistema de moldeo cerrado que emplea vacío para la infusión de resina poliéster y el contramolde es fabricado en una membrana de nylon.

El sistema de moldeo cerrado VARTM no es empleado actualmente en la industria del plástico reforzado colombiana, pero se cuenta con suficiente información técnica y experiencias documentadas, que permiten tener un correcto conocimiento de este, con el fin de implementarlo a nivel practico en la fabricación de una pieza en P.R.F.V..

3 OBJETO DE ESTUDIO

La evaluación teórica y validación práctica del nuevo método de moldeo cerrado de plástico reforzado, denominado CCBM en un producto de la fabrica de botes de Eduardoño S.A., con el fin de realizar un estudio comparativo con sistemas de moldeo convencionales como el moldeo por contacto a mano y el VARTM. El estudio comparativo parte de los resultados obtenidos de la implementación del método de moldeo CCBM estableciendo ventajas, desventajas y relación costo beneficio.

4 JUSTIFICACIÓN

Debido a la necesidad de fabricar productos de alta calidad a un bajo costo, es necesario buscar procesos alternativos que permitan mejorar continuamente el proceso productivo de una empresa. Para el caso de los materiales compuestos, específicamente en la fabricación de piezas en P.R.F.V., se cuenta con diferentes procesos de fabricación que permiten tener una amplia gama de posibilidades. El proceso de transformación adecuado se puede elegir de acuerdo a las especificaciones del producto a fabricar, a la capacidad instalada de la empresa y a la demanda del mercado. A pesar de la existencia de esta gran cantidad de posibilidades, la necesidad del mejoramiento continuo de las empresas productoras de piezas en materiales compuestos, genera una búsqueda continua para la implementación de nuevos métodos de fabricación que permitan reducir costos, sin afectar las propiedades y características de las piezas fabricadas. Esta búsqueda de nuevos procesos de fabricación, da origen al método de moldeo cerrado denominado CCBM. Este método permite la fabricación de piezas en P.R.F.V., de similares propiedades mecánicas a las que se consiguen con el método de moldeo a mano, reduciendo considerablemente los tiempos de fabricación y permitiendo aumentar la productividad en la empresa.

Para identificar las ventajas que genera la implementación de nuevos métodos para la fabricación de piezas en P.R.F.V. como el CCBM, es necesario realizar un estudio comparativo entre este método con sistemas de moldeo convencionales como el moldeo por contacto a mano y VARTM, con el fin de identificar ventajas y desventajas de cada método, y poder establecer una relación costo beneficio, que permita tomar una decisión acerca de que método debe ser empleado en el proceso productivo de la empresa.

5 IMPORTANCIA

Los materiales compuestos tienen una gran variedad de aplicaciones en diferentes áreas de ingeniería, son de fácil manejo y permiten la fabricación de piezas con excelentes propiedades mecánicas y químicas. Debido a la versatilidad de estos materiales y al posicionamiento que se va afianzando día a día en la industria, es necesario estudiar diferentes métodos de transformación para este tipo de materiales.

El estudio de los diferentes sistemas de moldeo para la transformación de materiales compuestos, permite establecer la viabilidad para su implementación en la industria, según las condiciones particulares de cada sector.

Para el caso particular de Eduardoño S.A., se busca realizar un estudio que permita identificar a partir de métodos de transformación convencionales y no convencionales, cuál es el más apropiado para la fabricación de botes y piezas en P.R.F.V., teniendo en cuenta que el método de transformación elegido, debe ser aquel que permita la fabricación de botes y piezas con excelentes propiedades mecánicas y acabados superficiales.

6 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el proceso de moldeo cerrado de infusión de resina poliéster catalizada⁴ por vacío y contramolde flexible en silicona denominado CCBM para la fabricación de piezas en poliéster reforzado con fibra de vidrio y compararlo con sistemas de moldeo tradicionales como el moldeo abierto por contacto a mano y el moldeo cerrado VARTM.

⁴ Resina poliéster catalizada: Resina poliéster a la que se le adiciona catalizador con el fin de promover el proceso de polimerización ó endurecimiento.

7 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Describir los principios fundamentales de los procesos de transformación de materiales compuestos por moldeo abierto como el moldeo por contacto a mano y de moldeo cerrado como el VARTM y el moldeo de infusión de resina poliéster catalizada por vacío y contramolde flexible en silicona denominado CCBM.
2. Evaluar teóricamente y validar en la práctica el proceso de transformación de materiales compuestos por moldeo cerrado de infusión de resina poliéster catalizada por vacío y contramolde flexible en silicona denominado CCBM, para la fabricación de una pieza prototipo, en la fabrica de botes dentro del proceso productivo de Eduardoño S.A.
3. Fabricar una pieza prototipo en P.R.F.V., utilizando el sistema de moldeo cerrado VARTM y el sistema de moldeo abierto por contacto a mano.
4. Realizar un análisis comparativo entre los diferentes métodos de fabricación validados.
5. Concluir cual de los métodos es el más adecuado para las necesidades de fabricación de la fabrica de botes de Eduardoño S.A.. Realizar recomendaciones y proponer nuevas líneas de trabajo.

8 BENEFICIARIO DIRECTO

El beneficiario directo con el proyecto será EDUADOÑO S.A., ya que con su desarrollo se establece la viabilidad para la posible implementación del sistema de moldeo cerrado de infusión de resina poliéster catalizada por vacío y contramolde flexible en silicona denominado CCBM para la fabricación de piezas en P.R.F.V..

La evaluación para la posible implementación, se hará comparando el método de moldeo tradicional empleado en la fabrica de botes de Eduardoño S.A., denominado moldeo por contacto a mano, con diferentes métodos de moldeo cerrado como el VARTM y el moldeo CCBM.

9 TÉCNICAS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICO REFORZADO

Para producir materiales de plástico reforzado, la mayoría de las técnicas pueden ser empleadas con sistemas de matrices termoestables ó termoplásticas. Las técnicas se encuentran asociadas con un moldeo conformado por tres etapas.

- Impregnación del refuerzo por parte de la resina.
- Adaptabilidad del material a las formas y dimensiones requeridas, utilizando un molde.
- Endurecimiento del material y desmolde final de la pieza.

Dentro del proceso de selección de una técnica de transformación se debe analizar consideraciones de costo, forma, tamaño, número de piezas a fabricar, características mecánicas a obtener, acabado superficial y calidad del producto. (BJOORKSTEN, J, 1976, p. 52).

Actualmente las técnicas de transformación varían desde las más simples, con niveles de inversión bajos como las técnicas de moldeo manual, hasta aquellas que requieren de altas inversiones para producir productos en serie. como el RTM⁵, y el moldeo por extrusión.

9.1 CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS DE TRANSFORMACIÓN SEGÚN MOLDE.

En el proceso de transformación del plástico reforzado para la fabricación de piezas un elemento fundamental es el molde, este define la geometría de la pieza

⁵ RTM (Resin Transfer Moulding): Sistema de moldeo cerrado para la transformación del plástico reforzado.

a fabricar y le otorga propiedades de acabado superficial. Según el tipo de molde a emplear en el proceso de transformación se pueden clasificar los diferentes procesos en dos grandes grupos.

9.1.1.. Procesos de transformación por moldeo abierto.

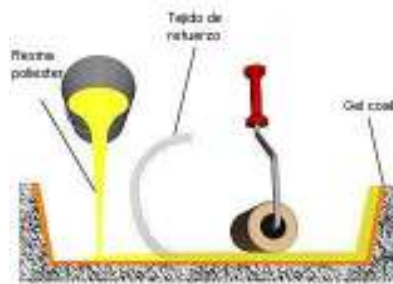
En esta categoría, se encuentran procesos que presentan un bajo costo de inversión y operación. Una característica importante es que son empleados en procesos productivos de baja escala y donde se emplean moldes de gran tamaño.

En este grupo se clasifican todos aquellos procesos de transformación, que cuentan con un molde como único elemento para la fabricación de la pieza. En este proceso de transformación, tanto el gel-coat⁶ como la resina quedan expuestos directamente a la atmósfera, en esta categoría se encuentran los siguientes procesos. (PARRILLA, 1993, p. 60)

- Moldeo por contacto a mano (Hand Lay Up): Proceso de moldeo manual, en el que el tejido de refuerzo impregnado con resina poliéster catalizada es asentado a la superficie del molde con el uso de rodillos, esto permite extraer el aire ocluido entre la resina y el tejido de refuerzo. Por este sistema de moldeo se pueden obtener piezas de gran tamaño y diversas formas como cascos de botes, cabinas de vehículos, etc. (PARRILLA, 1993, p. 62)

⁶ gel- coat: Resina poliéster empleada para darle resistencia a agentes químicos a la pieza, además le otorga acabados superficiales. Puede ser Incoloro ó pigmentado.

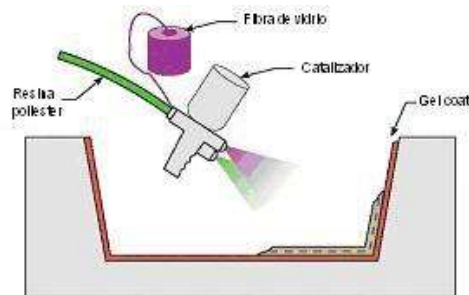
Ilustración 1 Sistema de moldeo por contacto a mano



jjmechanic@

- Moldeo por proyección simultánea (Spray Up): Es un proceso de moldeo similar al que se ejecuta por contacto a mano, la diferencia es que un equipo es el encargado de disponer sobre la superficie del molde resina políéster catalizada y secciones de fibra de vidrio de 5 cm. de longitud aproximadamente. Por este sistema de moldeo se pueden obtener diversas piezas como tanques por rolado, pozos sépticos, etc. (PARRILLA, 1993, p. 68)

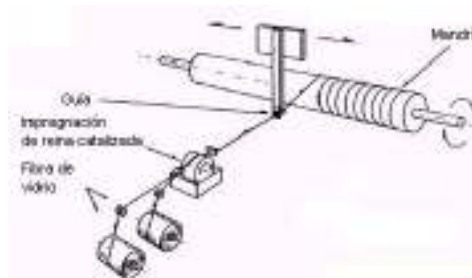
Ilustración 2 Sistema de moldeo por proyección simultánea



turkcadcam@

- Moldeo por enrollamiento de filamentos (Filament Winding): Este proceso es empleado para la fabricación de productos cilíndricos. Consiste en enrollar material de refuerzo impregnado con resina políéster catalizada en un eje o mandril que actúa como molde. Este sistema de moldeo es empleado para fabricar tanques y tubería sometida a presión. (PARRILLA, 1993, p. 89)

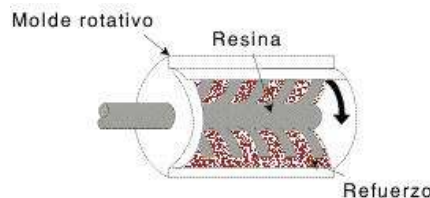
Ilustración 3 Sistema de moldeo por enrollamiento de filamentos



tifac@

- Moldeo por centrifugado: Proceso empleado para la fabricación de productos cilíndricos, en este se ubica el material de refuerzo seco sobre la superficie del molde, luego se somete a velocidades de 1000 a 1800 revoluciones por minuto y se deposita en su interior resina catalizada con el fin de impregnar el tejido de refuerzo. Este sistema es empleado para la fabricación de tanques y tuberías. (PARRILLA, 1993, p. 92)

Ilustración 4 Sistema de moldeo por centrifugado



owenscorning@

9.1.2. Procesos de transformación por moldeo cerrado.

En este grupo se clasifican todos aquellos procesos de transformación que cuentan con un molde y un contramolde como elementos para la fabricación de piezas. El molde es fabricado en materiales rígidos, mientras que el contramolde puede ser fabricado en materiales rígidos, semirígidos ó flexibles..

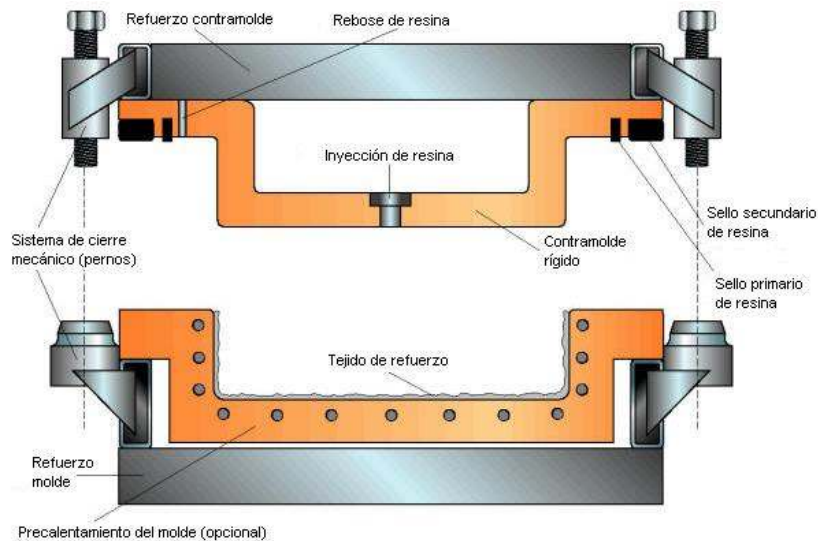
Estos procesos de transformación tienen la particularidad que entre el molde y contramolde se presenta una cámara completamente aislada al ambiente, evitando el contacto directo entre el laminado de la pieza y el ambiente.

Los procesos de transformación de materiales compuestos que emplean sistemas de moldeo cerrado permiten la obtención de una mayor cantidad de piezas fabricadas en un tiempo determinado. La elección del tipo de sistema de moldeo cerrado que debe emplearse en determinado proceso productivo depende de diferentes factores como los requisitos de acabado superficial de la pieza, la capacidad instalada de la planta, la inversión requerida, los costos de operación, la cantidad de piezas a fabricar y la tecnología necesaria para la operación.

Los diferentes procesos de transformación de plástico reforzado que emplean sistemas de moldeo cerrado son:

- Moldeo por transferencia de resina (RTM): en este proceso se introduce el tejido de refuerzo sin impregnar sobre el molde, después se ubica el contramolde y se asegura al molde por medio de pernos ó actuadores. Una vez estos se encuentren asegurados, se inyecta resina catalizada a presión al interior de la cavidad generada por el molde y contramolde. Por este sistema de moldeo se obtienen piezas con excelente acabado superficial por las dos superficies como cabinas de teléfono y sillas. (PARRILLA, 1993, p. 86)

Ilustración 5 Moldeo por transferencia de resina (RTM)

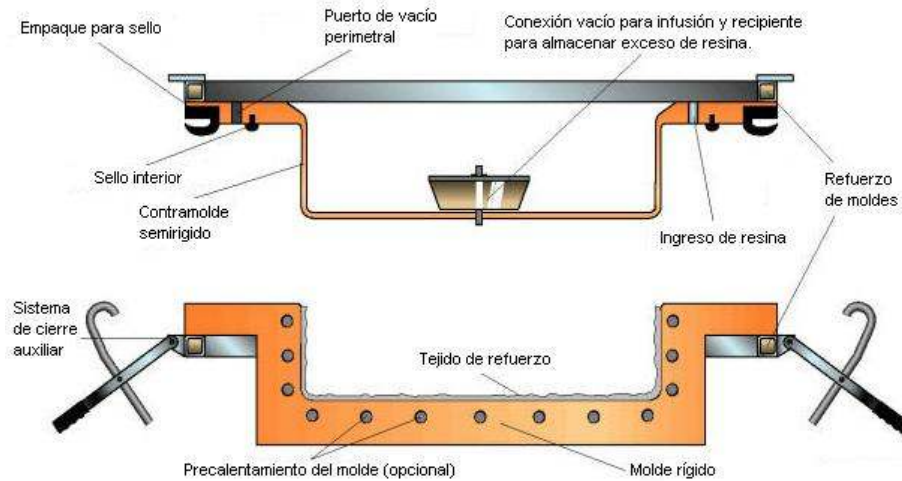


plastech@

- RTM- Light: Este proceso es similar al RTM, la diferencia es que la resina no es inyectada a presión si no que se realiza un proceso de infusión con vacío⁷. Adicionalmente presenta otra diferencia con respecto al RTM y es que el sistema de cierre del molde y contramolde no se realiza con elementos mecánicos como pernos o actuadores, si no que se realiza con vacío. Al igual que el RTM por este sistema de moldeo se obtienen piezas con excelente acabado superficial por ambas superficies en contacto con el molde y contramolde respectivamente como sillas y autopartes. (PARRILLA, 1993, p. 86)

⁷ Proceso de infusión con vacío: Consiste en aplicar vacío a la cavidad que generan el molde y contramolde, este permite extraer el aire atrapado y succiona resina poliéster catalizada al interior de la cavidad.

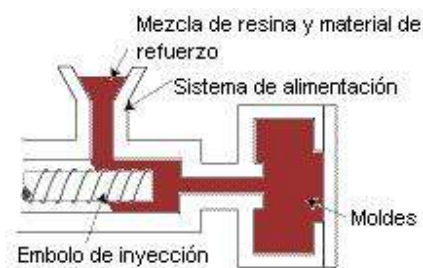
Ilustración 6 Sistema de moldeo RTM-Light



plastech@

- Moldeo a presión y temperatura: en este proceso se mezcla la resina catalizada con material de refuerzo picado a una temperatura controlada. Esta mezcla se inyecta a la cámara que se genera entre el molde y el contramolde. Es un método empleado para la fabricación de piezas de pequeño tamaño con acabado superficial por las dos caras de la pieza, como bandejas para el transporte de alimentos en restaurantes. (PARRILLA, 1993, p. 82)

Ilustración 7 Moldeo a presión y temperatura

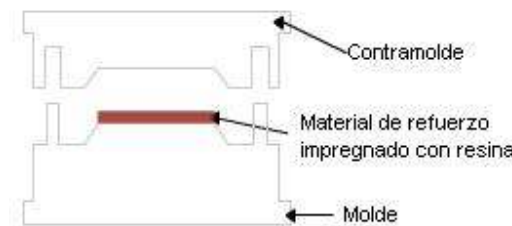


owenscorning@

- Moldeo por prensado en frío: en este método se deposita el refuerzo al interior del molde y se impregna con resina catalizada. Después se ubica el contramolde

a presión sobre el molde y se deja curar a temperatura ambiente. Es un sistema de moldeo empleado para la fabricación de autopartes. (PARRILLA 1993, p. 84)

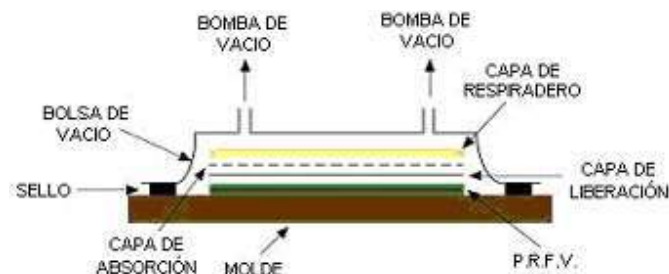
Ilustración 8 Moldeo por prensado en frío



owenscorning@

- Moldeo por bolsa de vacío (Vacuum Bagging): se ubica el material de refuerzo impregnado con resina poliéster catalizada sobre la superficie del molde, después se ubica sobre el laminado una serie de capas que permiten la extracción del exceso de resina catalizada. Luego de ubicar estas capas se coloca una membrana de nylon que actúa como contramolde en este sistema de moldeo y se sella contra la superficie del molde. Se aplica vacío al interior de la membrana, con el fin de eliminar cámaras de aire atrapadas en el laminado y extraer los excesos de resina. Este sistema de moldeo es muy empleado para la fabricación de piezas pequeñas, de buenas propiedades mecánicas y bajo peso como cascos para los motociclistas. (jjmechanic@)

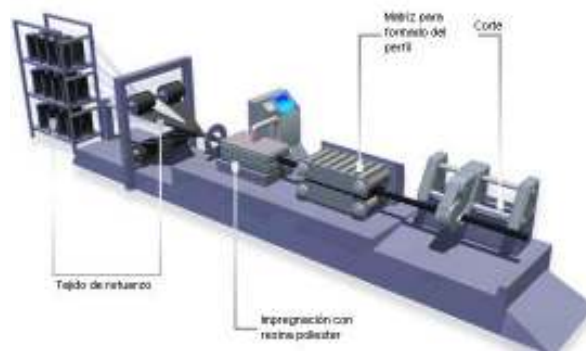
Ilustración 9 Moldeo por bolsa de vacío



jjmechanic@

- Moldeo por extrusión (Pultrusion): El proceso consiste en la impregnación del material de refuerzo con resina poliéster catalizada. El material impregnado se hace pasar por una matriz o dado que lo preforma. Este sistema de moldeo es muy empleado para la fabricación de perfilería con buenas propiedades mecánicas empleadas en el sector de la construcción como vigas, canaletas y tubos. (ale@)

Ilustración 10 Moldeo por extrusión ó pultrusión



ale@

- Moldeo con autoclave: Es un sistema de moldeo en el que se combina el moldeo a presión y bolsa de vacío. Consiste en disponer sobre la superficie del molde tejido de refuerzo impregnado con resina poliéster catalizada, luego al igual que en el sistema de moldeo por prensado el contramolde se ubica a presión sobre el molde y se aplica vacío al interior de la cavidad generada por los moldes, este vacío ayuda a extraer el aire atrapado y los excesos de resina. Durante el proceso de curado de la pieza los moldes son sometidos a un ambiente de temperatura controlada con el fin de acelerar el proceso de curado. Este sistema de moldeo es empleado para la fabricación de piezas con excelentes propiedades mecánicas, empleadas en industrias especiales como la aeroespacial. (turkcam@)

Ilustración 11 Moldeo con autoclave



ale@

- Moldeo CCBM: Sistema de moldeo cerrado que emplea un molde rígido y un contramolde flexible para la fabricación de piezas en materiales compuestos. Sobre el molde rígido se ubica el tejido de refuerzo sin impregnar, posteriormente se monta el contramolde que es fabricado en silicona y sobre el perímetro de los moldes se ubica un marco para producir un sello. Después se procede a realizar la infusión de resina catalizada al interior de la cavidad generada por los moldes con la ayuda de vacío. Esta técnica para la transformación del plástico reforzado puede ser aplicada para la fabricación de diversas piezas como autopartes, cascos y piezas para botes , y cabinas para vehículos. (Memorias Seminario. MOLDEO CERRADO: DISEÑO DE MOLDES Y TECNICAS DE FABRICACIÓN DE PRODUCTOS. 2005)

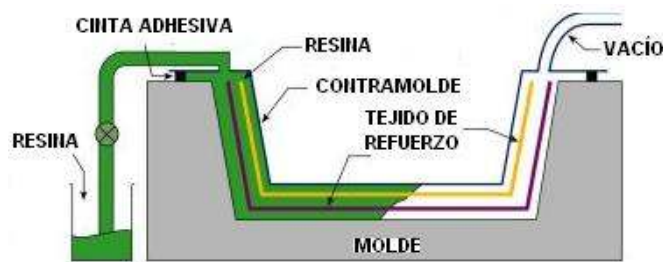
Ilustración 12 Moldeo CCBM



Memorias Seminario. MOLDEO CERRADO: DISEÑO DE MOLDES Y TECNICAS DE FABRICACIÓN DE PRODUCTOS

- VARTM (Vacuum Asisted Resin Transfer Moulding) : Sistema de moldeo cerrado que emplea un molde rígido y un contramolde flexible fabricado en nylon. El proceso consiste en disponer sobre la superficie del molde tejido de refuerzo seco, luego se cubre con el contramolde que es fabricado en una membrana en nylon y se sella sobre el perímetro del molde con una cinta adhesiva. Una vez la membrana ha sido pegada a la superficie del molde, se produce vacío al interior de la cavidad con el fin de promover el ingreso de resina catalizada para la impregnación del tejido de refuerzo. El vacío al interior de la cavidad permite extraer el aire atrapado y contribuye al proceso de infusión de la resina. Este sistema de moldeo es muy empleado para la fabricación de piezas de gran tamaño y de diversas formas como cascos para botes y cabinas de vehículos. (turkcam@)

Ilustración 13 Moldeo Vacuum Asisted Resin Transfer Moulding (VARTM)



netcomposites@

9.2 ¿POR QUÉ CAMBIAR A SISTEMAS DE MOLDEO CERRADO ?

Debido a la necesidad de sustituir materiales tradicionales como el acero en diferentes sectores de la industria, se han desarrollado nuevos materiales como el plástico reforzado con diferentes tejidos. Estos nuevos materiales se han posicionado en el mercado debido a su versatilidad de usos, facilidad de transformación y bajo peso.

Un problema del plástico reforzado es que durante el proceso de transformación de la resina poliéster⁸ se generan vapores orgánicos volátiles (VOC) como el estireno, que en grandes proporciones pueden ser perjudiciales para las personas expuestas. Actualmente los esfuerzos de la industria se han dirigido hacia la reducción de la generación de este tipo de subproductos mediante un mayor control en el proceso, en los equipos empleados y en el desarrollo de nuevas técnicas de transformación. (RUTZ, p. 3)

Actualmente en algunas regiones del mundo como Estados Unidos, México y países Europeos existen leyes que buscan regular las emisiones de vapores volátiles como el estireno, estas regulaciones condicionan a la industria en el tipo de tecnología que se debe emplear para la transformación del plástico reforzado. Por esta razón los sistemas de moldeo cerrado, se constituyen en una alternativa para la transformación de plástico reforzado en las industrias de los países desarrollados ó en vía de desarrollo ya que reducen las emisiones, debido a que el laminado durante el proceso de fabricación está completamente aislado al ambiente. Además de la reducción de emisiones, los sistemas de moldeo cerrado tienen grandes ventajas sobre los sistemas de moldeo abierto, como: (RUTZ, p. 3)

- Calidad: En sistemas de moldeo cerrado una característica de las piezas fabricadas es la repetitividad. Esta consiste en obtener piezas en serie idénticas, condición que es difícil obtener en piezas fabricada en sistemas de moldeo abierto, ya que en este tipo de procesos es directamente el operario quien fabrica el laminado mientras que en los sistemas de moldeo cerrado este no influye directamente sobre el laminado y su función es controlar el proceso.

⁸ El proceso de transformación de la resina poliéster es el cambio de estado líquido a estado sólido. Este proceso es conocido como polimerización. La transformación se da después de la adición de catalizador a la resina.

Esta repetitividad es importante en piezas fabricadas que requieren buen nivel de precisión. (RUTZ, p. 16)

- Productividad: En los sistemas de moldeo cerrado una sola persona puede fabricar varias piezas de manera simultánea, contribuyendo a que el nivel de productividad sea mucho mayor y más eficiente. (RUTZ, p. 16)

- Relación Fibra - Resina: En los sistemas de moldeo cerrado la relación fibra-resina en el laminado es controlable, mientras que en los sistemas de moldeo abierto es difícil de controlar. Esta relación es muy importante debido a que está directamente relacionada con las propiedades mecánicas y peso final del laminado. Como esta relación es controlable en los sistemas de moldeo cerrado, los laminados que se obtienen por estos métodos presentan mejores propiedades mecánicas y menor peso que un laminado de espesor equivalente obtenido por un sistema de moldeo abierto. Las propiedades mecánicas y el peso final del laminado obtenido son factores determinantes a la hora de seleccionar un material para diferentes aplicaciones. (RUTZ, p. 16)

- Acabado: Algunos sistemas de moldeo cerrado como el RTM, RTM- Light, prensado y extrusión , permiten obtener piezas con excelente acabado superficial por ambas superficies del laminado. Mientras que en los sistemas de moldeo abierto solo se obtiene excelente acabado sobre la superficie que se encuentra en contacto con el molde. (RUTZ, p. 17)

- Costo por unidad producida: En procesos productivos donde se producen piezas en serie que emplean sistemas de moldeo cerrado, el costo por unidad producida es menor que el costo por producir una unidad equivalente por un sistema de moldeo abierto. Debido a que son sistemas tecnificados, eficientes y el nivel de producción es mayor.

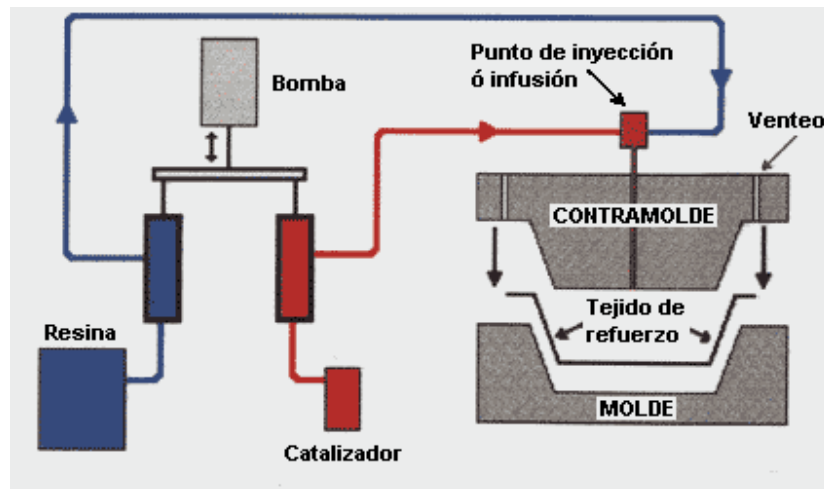
9.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MOLDEO CERRADO

A pesar de la similitud entre los diferentes sistemas de moldeo cerrado es necesario hacer una caracterización que permita establecer las particularidades de cada uno. Esta caracterización se realiza definiendo cinco variables que influyen dentro del proceso y estableciendo como se presentan en cada método. Las variables son:

9.3.1. Diferencial de presión entre el interior de la cavidad que forman los moldes y el ambiente.

El Diferencial de presión entre el interior de la cavidad que forman los moldes y el ambiente es el que genera que la resina catalizada fluya impregnando el tejido de refuerzo. Este diferencial de presión puede tomar valores positivos en casos donde la resina sea inyectada a presión al interior de la cavidad ó valores negativos cuando se emplee vacío para generar la extracción del aire al interior de la cavidad y producir la succión de la resina. El diferencial de presión debe ser caracterizado por dos palabras, la primera describe la condición del punto de infusión o inyección de la resina catalizada y la segunda describe la condición del punto de venteo. De acuerdo a esto puede ser descrito así: Presión a Vacío, Presión a Atmósfera, Atmósfera a vacío. (RUTZ, p. 4)

Ilustración 14 Sistema de moldeo cerrado



ale@

9.3.2. Sistema de transferencia de resina.

El sistema de transferencia de resina consiste en la descripción del camino empleado para que la resina llegue al tejido de refuerzo antes de impregnarlo. El primer camino y el más empleado es el puerto discreto, en este la resina es introducida a la cavidad que genera el molde y el contramolde en puntos específicos denominados puntos de inyección ó infusión. El segundo camino es la alimentación perimetral de resina, este consiste en un camino libre ubicado sobre todo el perímetro del molde por donde fluye la resina catalizada. Una vez el camino se llena de resina esta se rebosa y comienza a fluir hacia el tejido de refuerzo. El tercer camino es el de superficie, este es un sistema complejo empleado en piezas de gran tamaño. Este camino consiste básicamente en un sistema de canales intercomunicados que están ubicados en la parte superior del tejido de refuerzo. A través de estos canales se impregna el tejido de refuerzo con resina poliéster catalizada. (RUTZ, p. 4)

9.3.3. Tipo de contramolde.

Existen dos categorías de contramolde, en la primera se encuentran los contramoldes flexibles que pueden ser desechables fabricados en nylon ó reutilizables fabricados en silicona. En la segunda categoría, se encuentran los contramoldes rígidos ó semirígidos, estos pueden ser fabricados en diferentes materiales como P.R.F.V., yeso, madera ó materiales metálicos. (RUTZ, p. 5)

9.3.4. Sistema de cierre.

Es el sistema empleado para el cierre del molde y contramolde además permite mantenerlos unidos durante el proceso de inyección ó infusión. Existen cuatro sistemas de cierre: (RUTZ, p. 5)

- a. Cierre por vacío: Consiste en poner en contacto dos moldes con un sello entre ellos. Los moldes forman una cavidad aislada al ambiente que al aplicársele vacío la presión atmosférica ejerce una fuerza que evita que se separen, la magnitud de la fuerza la determina el área de la cavidad y el vacío aplicado. Este sistema permite reducir los tiempos de puesta a punto para la fabricación de una pieza.
- b. Cierre Mecánico: El cierre mecánico consiste en unir los moldes con la ayuda de pernos ó prensas ubicados sobre el perímetro, este sistema eleva los tiempos requeridos de puesta a punto para la fabricación de una pieza.
- c. Cierre Neumático: Consiste en emplear actuadores neumáticos para el cierre del molde y contramolde, este sistema es empleado en procesos productivos automatizados y donde se fabriquen piezas pequeñas, ya que piezas grandes requieren altas fuerzas de cierre que no se pueden obtener con actuadores neumáticos.
- d. Cierre Hidráulico: Consiste en emplear actuadores hidráulicos para el cierre del molde y contramolde, este sistema al igual que el neumático es empleado en procesos productivos automatizados, la

diferencia es que permite obtener grandes fuerzas de cierre. Por este motivo puede ser empleado para la fabricación de piezas de gran tamaño.

e. Cierre con cinta adhesiva: Este sistema es empleado para procesos de moldeo cerrado que usan contramoldes flexibles desechables. El cierre se realiza con una cinta adhesiva por ambas caras, una de estas se pega al molde y la otra al contramolde. El cierre debe quedar hermético para evitar entradas de aire a la cavidad formada por los moldes.

9.3.5. Sistema de manipulación.

El sistema de manipulación consiste en la forma como opera el proceso, desde la ubicación del tejido de refuerzo sobre la superficie del molde hasta la extracción de la pieza final. El sistema de manipulación esta directamente relacionado con el nivel de producción, el tamaño de las piezas que se fabrican y la capacidad instalada de la planta. (RUTZ, p. 5)

La tabla 1. resume la caracterización de cada sistema de moldeo cerrado según las variables descritas.

Tabla 1 Caracterización de sistemas de moldeo cerrado

MÉTODOS	VARIABLES				
	Diferencial de presión	Sistema de transferencia de resina	Tipo de contramolde	Sistema de cierre	Sistema de manipulación
RTM	Presión - Atmósfera	Puerto discreto	Rígido	Mecánico	Depende de capacidad instalada, tamaño y cantidad de piezas fabricadas
RTM- Light	Atmósfera - Vacío	Perimetral	Semirigido	Vacío y/o Mecánico	
Moldeo a presión y temperatura	Presión - Atmósfera	Puerto discreto	Rígido	Mecánico	
Moldeo por prensado en frío	N/A	N/A	Rígido	Mecánico	
Moldeo por bolsa de vacío	N/A	N/A	Flexible Desechable	Cinta adhesiva	
Moldeo por extrusión	Presión-Atmósfera	Puerto discreto	Rígido	Mecánico	
Moldeo con autoclave	N/A	N/A	Rígido	Mecánico	
CCBM	Atmósfera - Vacío	Puerto discreto ó Perimetral	Flexible Reutilizable	Vacío y/o Mecánico	
VARTM	Atmósfera - Vacío	Perimetral ó de Superficie	Flexible Desechable	Cinta adhesiva	

En los sistemas de moldeo con bolsa de vacío, autoclave y prensado en frío, no aplican las variables correspondientes a la fuerza motriz y sistema de transferencia de resina, debido a que en estos sistemas de moldeo la resina no ingresa a la cavidad que generan el molde y contramolde por presión ó vacío, sino que antes de ubicar el tejido de refuerzo sobre el molde se impregna con resina catalizada.

10 SISTEMAS DE MOLDEO A TRABAJAR

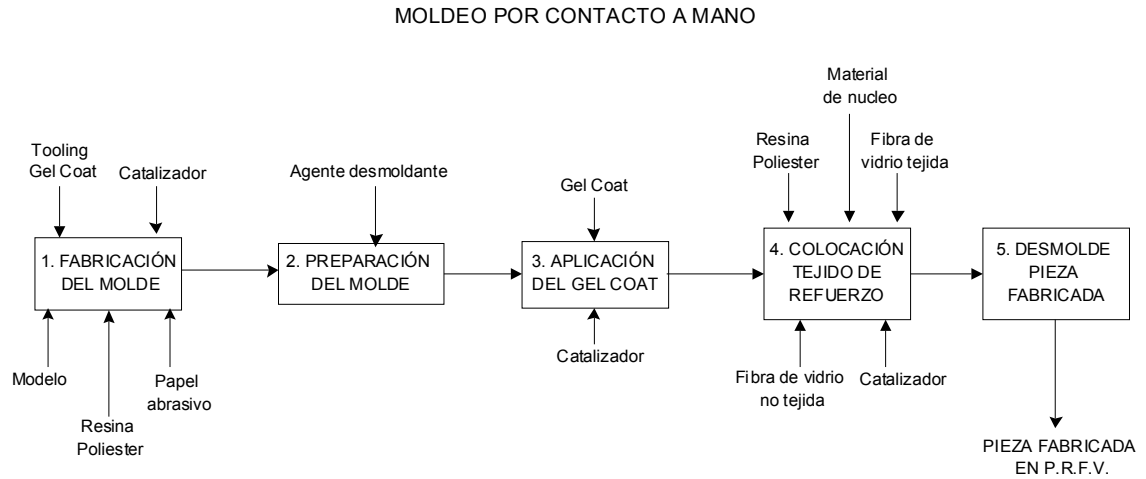
Para estudiar la viabilidad de la transformación tecnológica en la industria es importante realizar un análisis comparativo entre el sistema de laminación abierta empleado actualmente para el proceso de fabricación de botes en la fabrica de Eduardoño S.A., que es el moldeo por contacto a mano con dos sistemas de moldeo cerrado, el VARTM y el CCBM.

10.1 MOLDEO POR CONTACTO A MANO.

Es la técnica más antigua para la transformación del plástico reforzado, en esta se trabaja a presión atmosférica y a temperatura ambiente, es un método muy empleado en series de pequeña producción, piezas de gran superficie y de diversas formas.

El moldeo por contacto a mano es un proceso sencillo que se realiza por etapas y de forma continua. A continuación se ilustra el diagrama de flujo de este sistema y se describe cada una de las etapas.

Ilustración 15 Flujo de proceso del sistema de moldeo por contacto a mano



10.1.1. Fabricación del molde.

Para fabricar una pieza en plástico reforzado se requiere de un molde que es el encargado de darle la forma y el acabado superficial a la pieza. Los cuidados que se tengan con el molde y la forma como se opere dentro del proceso productivo influye en la calidad de las piezas que se obtengan de este. (PARRILLA, 1993, p 52)

La primer etapa en la fabricación del molde consiste en la fabricación de un modelo a escala real, que puede ser construido en diversos materiales como madera, yeso, metales ó P.R.F.V.. La construcción del modelo se debe realizar a partir de planos de la pieza que se desea obtener teniendo en cuenta factores importantes durante el diseño como las formas finales y los ángulos de desmolde⁹. La fabricación del modelo es un proceso artesanal y de gran importancia ya que define la geometría final del molde de donde se obtienen las piezas. Al modelo

⁹ El ángulo de desmolde es el que se requiere para el proceso de desmolde de la pieza.

construido se le debe fabricar una pestaña sobre todo el perímetro, su función es contribuir al desmolde la pieza fabricada. (PARRILLA, 1993, p. 53)

Ilustración 16 Fabricación modelo



Eduardoño S.A.

Para obtener un buen acabado superficial en el modelo se debe emplear papel abrasivo de grano fino con el fin de disminuir las rugosidades sobre la superficie. Una vez se aplica el papel abrasivo se le debe dar brillo a la superficie del modelo, si este ha sido fabricado con P.R.F.V. se puede emplear ceras abrasivas para obtener el brillo deseado. (PARRILLA, 1993, p. 58)

Ilustración 17 Brillada modelo



Eduardoño S.A.

Una vez finalizada la construcción del modelo a escala real, se debe aplicar sobre la superficie de este un agente desmoldante, con el fin de que cuando se fabrique el molde no haya adherencia con el modelo.

Una vez aplicado el agente desmoldante se procede a pintar el modelo con Tooling gel-coat¹⁰, este tiene características especiales respecto a dureza y brillo, además de que el color debe ser de contraste con el gel-coat empleado en la fabricación de la pieza final, con el fin de identificar zonas sobre la superficie del molde pobres de pintura (gel-coat). Se debe controlar el espesor de la capa de Tooling gel-coat con un calibrador de película húmeda, este espesor debe ser de 16 mils. a 20 mils. y se debe obtener con la aplicación de al menos dos capas, con el fin de disminuir porosidades sobre la superficie. (PARRILLA, 1993, p. 60)

Ilustración 18 Aplicación de Tooling gel-coat



Eduardoño S.A.

Cuando el Tooling gel-coat aplicado con el espesor correcto haya curado, se procede a fabricar la laminación en P.R.F.V. del molde. Esta laminación se debe realizar teniendo en cuenta el espesor final deseado. Es conveniente que la

¹⁰ Tooling gel-coat: Resina poliéster Isofáltica pigmentada empleada en la fabricación de moldes en P.R.F.V.

primera capa de la laminación sea fabricada con velo como tejido de refuerzo, ya que este tiene la característica de que absorbe gran cantidad de resina. La función del velo es contribuir al acabado superficial del molde, debido a que copia fielmente la geometría del modelo y evita que los demás tejidos de refuerzo empleados en la laminación del molde se marquen sobre la superficie de acabado. Durante el proceso de laminación del molde no es conveniente que se apliquen capas de tejido de refuerzo de manera simultánea ya que a mayor cantidad de capas aplicadas mayor cantidad de resina poliéster se requiere y es mayor la temperatura de exotermia¹¹ que se obtiene durante el proceso de polimerización de la resina. Una temperatura de exotermia elevada puede generar una deformación permanente en el molde ó en el modelo, además que puede generar que los tejidos de refuerzo queden marcados sobre la superficie de acabado del molde. (PARRILLA, 1993, p 60)

Ilustración 19 Laminación molde



Eduardoño S.A.

Después de realizar el proceso de laminación del molde de acuerdo al espesor final deseado se debe esperar que la resina poliéster empleada haya curado. Antes de realizar la separación del molde y el modelo, se debe reforzar

¹¹ Temperatura de exotermia: Valor máximo de temperatura que alcanza la resina poliéster durante el proceso de polimerización.

estructuralmente el molde, con el fin de que no se deforme durante la manipulación y operación dentro del proceso productivo. El tipo de refuerzo estructural empleado depende directamente del tamaño del molde, para moldes de gran tamaño es conveniente emplear como refuerzo una estructura fabricada en tubería de acero doblada que se ajuste a la superficie del molde. Para piezas de menor tamaño se puede reforzar el molde estructuralmente con una estructura de madera que se pega al molde con P.R.F.V.. (PARRILLA, 1993, p 61)

Ilustración 20 Estructura molde



Eduardoño S.A.

Una vez el molde ha sido reforzado estructuralmente se puede realizar la separación del molde y modelo. Con el molde separado se realiza una inspección para identificar defectos como porosidades. Si el molde presenta algún defecto se debe corregir y darle el correcto acabado superficial con papel abrasivo de grano fino. Una vez obtenido el acabado deseado se debe garantizar que el molde este bien curado antes de fabricar la primera pieza, ya que la resina empleada para la fabricación del molde ó el Tooling gel-coat mal curado se puede ablandar con la exotermia de la resina poliéster empleada en el laminado de la pieza, liberando monómero de estireno¹² sin reaccionar, lo que favorece al agarre entre la pieza y

¹² monómero de estireno: Componente de la resina poliéster que permite que se realice en enlace entre moléculas.

el molde, produciendo desprendimientos del molde durante el desmolde de la pieza. (PARRILLA, 1993, p 61)

Ilustración 21 Molde casco



Eduardoño S.A.

10.1.2. Preparación del molde.

Esta etapa consiste en aplicar un agente desmoldante sobre la superficie del molde completamente curado. La función de este agente es evitar la adhesión entre la pieza y el molde. Existen tres tipos de agentes desmoldantes que se clasifican así: (PARRILLA, 1993, p 58)

a. Soluciones: Generalmente acuosas de Alcohol Polivinílico ó Metil Celulosa, en las que al evaporarse el disolvente se forma una película continua que impide el contacto directo del gel-coat de la pieza y el molde. Este tipo de agente desmoldante debe ser aplicado cada que se vaya a fabricar una pieza, al aplicarlo se debe dejar secar la solución sobre la superficie del molde antes de proceder con la fabricación de la pieza.

b. Ceras: Agente desmoldante fabricado a base de cera, que se debe aplicar con un trapo de algodón. El exceso de cera aplicada debe ser removida de la

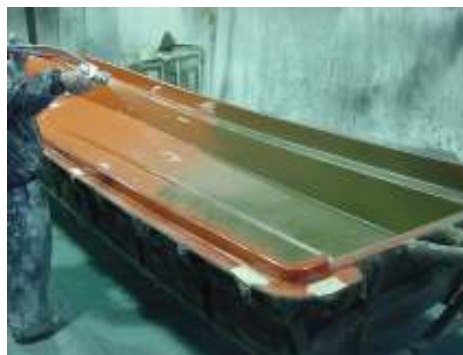
superficie del molde con estopa y de forma manual. Existen ceras que permiten fabricar más de una pieza por una sola capa aplicada.

c. Películas: En esta clasificación se encuentran algunos materiales como el celofán, mylar y teflón. Estos agentes desmoldantes se emplean para la fabricación de laminas y para recubrir dados ó matrices empleados en sistemas de moldeo por extrusión. Dependiendo del cuidado en el proceso productivo se pueden fabricar más de una pieza con una sola aplicación.

10.1.3. Aplicación del gel-coat.

En esta etapa del proceso se aplica gel-coat sobre la superficie del molde previamente preparada con un agente desmoldante, este puede ser aplicado con un equipo atomizador o con brocha. Durante la aplicación se debe controlar el espesor de la capa aplicada con un calibrador de película húmeda obteniendo espesores de 10 mils a 12 mils. Es importante controlar la cantidad de catalizador que se mezcla con el gel-coat con el fin de garantizar sus propiedades. La capa de gel-coat es muy importante para la pieza ya que le otorga color, acabado superficial, resistencia química y al intemperismo, y contribuye a las propiedades mecánicas. (PARRILLA, 1993, p 60)

Ilustración 22 Aplicación gel-coat



Eduardoño S.A.

10.1.4. Ubicación del tejido refuerzo.

En esta etapa se depositan las capas de tejido de refuerzo (fibra de vidrio) y se impregnan manualmente con resina poliéster catalizada. La distribución de las primeras capas se debe realizar con precaución para no desplazar las películas de gel-coat y de agente desmoldante. Se adicionan capas de tejido de refuerzo y resina poliéster catalizada, hasta lograr el espesor deseado de la pieza. (PARRILLA, 1993, p 62)

Las capas de resina poliéster catalizada y de tejido de refuerzo son asentadas a la superficie del molde usando rodillos de felpa o de aluminio con el fin de eliminar las cámaras de aire que quedan atrapadas entre las capas de resina poliéster reforzada y la superficie del molde. Cuando se esta colocando el tejido de refuerzo es importante que la primera capa del laminado sea fibra de vidrio no tejida, ya que contribuye a que el acabado superficial de la pieza sea bueno, pues evita que se marque sobre la superficie de acabado de la pieza la fibra de vidrio tejida que puede ser empleada en capas posteriores. (PARRILLA, 1993, p 60)

Ilustración 23 Ubicación tejido de refuerzo moldeo por contacto a mano



Eduardoño S.A.

Frecuentemente las medidas comerciales de los tejidos de refuerzo no bastan para cubrir el molde en su totalidad. En estos casos es recomendable traslapar el tejido. Este traslape debe ser de aproximadamente 5 cms. (PARRILLA, 1993, p 67)

Durante la ubicación del tejido de refuerzo en ocasiones se deben emplear en el laminado de la pieza más de una capa fibra de vidrio tejida, en estos casos es recomendable que esta siempre quede ubicada en medio de dos fibras de vidrio no tejidas. (PARRILLA, 1993, p 67)

En medio de las capas de tejido de refuerzo puede emplearse material de núcleo¹³ en aplicaciones donde se requiera obtener un laminado rígido. En caso que las dimensiones del material de núcleo no cubran toda la superficie del laminado se deben unir secciones de este material. Esta unión debe realizarse a tope.

Es importante evitar la ubicación de varias capas de tejido de refuerzo de manera simultanea durante la fabricación del laminado, ya que se requiere gran cantidad de resina poliéster catalizada para su impregnación generando una temperatura de exotermia elevada durante el proceso de polimerización. Una alta temperatura de exotermia durante el proceso de fabricación de una pieza puede generarle deformaciones permanentes debido a las contracciones que puede sufrir la resina durante el proceso de polimerización, además esta alta temperatura afecta directamente la integridad del molde, pues puede ocasionarle deformaciones permanentes en el caso que la temperatura de exotermia alcanzada sea mayor que el HDT¹⁴ del Tooling gel-coat ó de la resina poliéster empleada para la fabricación del molde.

¹³ Material empleado para darle rigidez a un laminado

¹⁴ HDT (High Distorsion Temperature): Temperatura de deformación de una resina poliéster completamente curada.

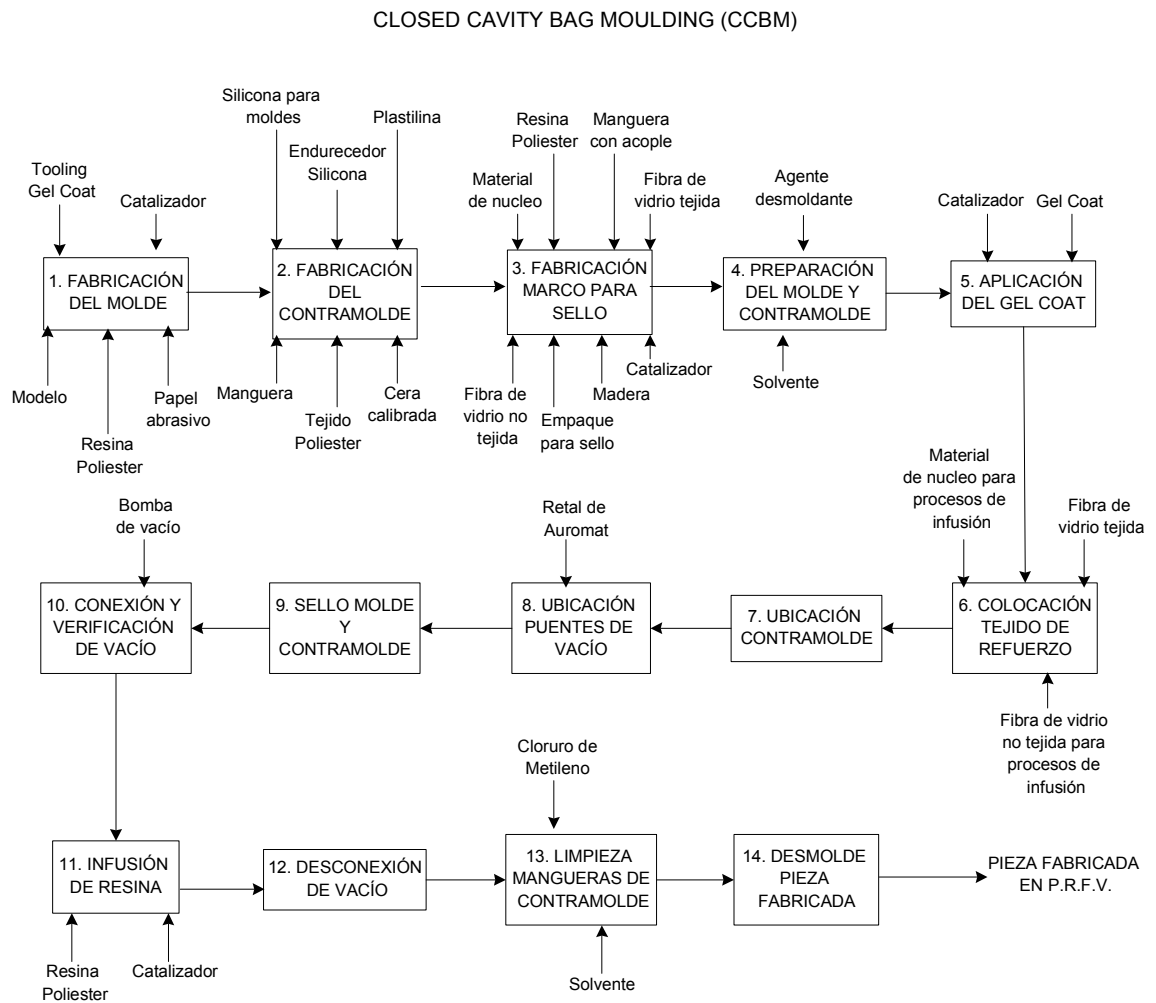
10.1.5. Desmolde.

El desmolde de la pieza fabricada en P.R.F.V., puede ser ejecutado cuando el proceso de polimerización de la resina poliéster empleada para la fabricación de pieza este completo. El proceso de desmolde debe ejecutarse con elementos que no afecten la integridad del molde como cuñas en madera, poleas y polipastos, aire comprimido ó agua. Es importante que la pieza no sea sometida a esfuerzos luego de ser desmoldada ya que la resina no ha curado completamente y se puede generar deformaciones permanentes. (PARRILLA, 1993, p 61)

10.2. MOLDEO CERRADO CCBM

Es un proceso de transformación simple, con tiempos cortos de puesta a punto y con el que se pueden fabricar piezas en P.R.F.V. de diversas formas. Este proceso de moldeo cerrado, emplea un molde rígido y un contramolde flexible fabricado en silicona, donde la resina poliéster catalizada ingresa a la cavidad formada por los moldes con ayuda de vacío. Al igual que el sistema de moldeo por contacto a mano el CCBM es un proceso continuo que se divide por etapas. A continuación se ilustra el diagrama de flujo del proceso y se describen cada una de las etapas.

Ilustración 24 Diagrama de flujo sistema de moldeo cerrado CCBM



10.2.1. Fabricación del molde

El proceso de fabricación del molde para el sistema de moldeo cerrado CCBM, es igual al proceso de fabricación del molde en el proceso de moldeo por contacto a mano. El único factor adicional que se debe considerar durante la construcción, es que se requiere una pestaña de mayor área que la que se construye en un molde empleado para el proceso de laminación por contacto a mano, debido a que sobre esta se realiza el sello y cierre del molde y contramolde. Este sello ó sistema de

cierre se realiza con vacío, por tal motivo la fuerza de cierre depende del área y del valor del vacío aplicado. La pestaña del molde para el sistema de moldeo cerrado CCBM debe ser plana, para evitar que se presenten entradas de aire al sistema durante el proceso de fabricación de una pieza.

El sistema de moldeo cerrado CCBM puede convertirse en una alternativa para pasar de un sistema de moldeo abierto por contacto a mano a un sistema de moldeo cerrado, ya que si se dispone del molde para la fabricación de piezas con el sistema de moldeo abierto por contacto a mano, solo se requiere realizarle una modificación a la pestaña del molde para poder realizar el cambio tecnológico.

10.2.2. Fabricación del contramolde.

Para la fabricación del contramolde se requiere de los siguientes materiales:

- Molde: Se debe disponer del molde para la fabricación de la pieza, con la pestaña adecuada para este sistema de moldeo.
- Silicona para la fabricación de moldes: Silicona empleada para la fabricación de moldes, debe soportar monómero de estireno.
- Tejido poliéster: Tejido a base de poliéster empleado como refuerzo del contramolde para evitar el desgarramiento de la silicona durante la operación.
- Cera calibrada: Lamina de cera de espesor constante con adhesivo por una de sus superficies, es empleada para obtener el espesor final de la pieza sobre la superficie del molde.
- Tramo de manguera: Con esta se fabrica el punto por donde ingresa la resina poliéster catalizada al interior de la cavidad formada por los moldes. Es recomendable que sea transparente para tener control visual durante el proceso de infusión y que soporte solventes para la limpieza de la resina poliéster como el Cloruro de Metileno.
- Plastilina: Empleada para sellar los empates de secciones de cera calibrada.

La fabricación del contramolde se divide en etapas, que se describen a continuación:

- Disposición de la cera calibrada: De acuerdo al espesor de la pieza a fabricar, se dispone sobre la superficie del molde capas de cera calibrada equivalente al espesor final de la pieza a fabricar. La disposición de la cera calibrada sobre la superficie del molde debe realizarse por capas y las uniones que se hagan de diferentes secciones de una misma capa deben hacerse a tope evitando que queden separadas. Para superficies con geometrías complejas se recomienda que la disposición de la cera calibrada se realice en pequeñas secciones, ya que permiten una mejor adaptabilidad a las superficies evitando que la cera aplicada se deforme durante el proceso de disposición. Se debe garantizar un espesor homogéneo sobre toda la superficie de la cera calibrada aplicada. La cera calibrada solo debe aplicarse en la superficie del molde de donde se obtenga la pieza.

Ilustración 25 Disposición de cera calibrada



Eduardoño S.A.

Para piezas de gran tamaño donde es necesario realizar traslapes de tejido de refuerzo para la fabricación del laminado, se debe tener en cuenta que en la zona

donde queden ubicados los traslapes el espesor final de la pieza es mayor. Este espesor se debe considerar durante la disposición de la cera calibrada para la fabricación del contramolde, ubicando en estas zonas una mayor cantidad de capas de cera calibrada que en el resto de la pieza hasta obtener el espesor final deseado. (RUTZ, p. 3)

Una vez aplicadas todas las capas de cera equivalentes al espesor final de la pieza a obtener, se deben sellar las líneas de unión de las diferentes secciones de la última capa aplicada, esto con el fin que cuando se aplique la silicona no se vayan a producir filtraciones de material sobre las uniones. Este procedimiento puede realizarse con plastilina que debe ser asentada correctamente con el fin de garantizar un espesor homogéneo.

Ilustración 26 Sellado unión de secciones de cera calibrada aplicada



Eduardoño S.A.

Si después de aplicar la cera calibrada queda una escala con el molde ó entre capas sucesivas, se debe reducir con un cordón de plastilina continuo, para que el contramolde no quede con un ángulo pronunciado si no con un pequeño radio.

- Aplicación de la silicona: Luego de finalizar la disposición de las capas de cera calibrada, se procede con la aplicación de la silicona para fabricar el contramolde. Antes de comenzar con la aplicación se debe limpiar toda la superficie del molde, un vez limpia se determinan los límites del contramolde, estos indican el límite

para la aplicación de la silicona que debe cubrir toda la superficie del molde de donde se obtiene la pieza y a la que previamente se le aplicó cera calibrada. Adicionalmente debe cubrir de manera parcial la pestaña del molde, pues debe quedar en medio de los dos empaques empleados para el cierre y sello de los moldes. Más adelante se explicará en detalle como es el empaque y su ubicación.

Una vez determinado el límite del contramolde, se puede proceder a aplicar la primera capa de silicona. Antes de la aplicación se debe determinar el área de la superficie del molde de donde se obtiene el contramolde con el fin de preparar el material requerido, teniendo en cuenta que para cubrir $1m^2$ se requiere preparar 400 gr. de silicona aproximadamente. Según esta relación se prepara la cantidad requerida y se mezcla con el endurecedor en el caso de que la silicona empleada sea de dos componentes y se agita hasta obtener una mezcla homogénea. Una vez mezclada la silicona y el endurecedor se aplica sobre la superficie del molde, la aplicación puede realizarse con espátula o brocha. Para superficies planas es conveniente emplear espátula, para superficies con geometrías complejas debe aplicarse con brocha. Durante la aplicación de la primera capa de silicona, se debe garantizar que toda el área del molde quede correctamente cubierta.

Ilustración 27 Aplicación primera capa de silicona del contramolde empleado en el sistema de moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

Después que la primera capa aplicada haya endurecido, se puede proceder a aplicar la segunda capa. Antes de la aplicación, se debe disponer sobre la primera capa de silicona un tejido poliéster. Su función es mejorar la resistencia al desgarramiento del contramolde evitando que falle durante los procesos de fabricación de piezas en P.R.F.V. Este tejido debe ser cortado a la medida según el área que se requiera cubrir, una vez cortado se ubica correctamente sobre la superficie del molde, y se prepara una mezcla de silicona y endurecedor correspondientes a la segunda capa. La cantidad de silicona a preparar puede variar según el tipo de tejido poliéster que se use, se recomienda comenzar preparando poca cantidad (200 gramos). Una vez preparada la mezcla de silicona y endurecedor se procede a aplicarla, al igual que en la primera capa la aplicación puede realizarse con brocha o espátula de acuerdo a la geometría del molde y debe aplicarse de tal manera que cubra todo el tejido poliéster empleado para reforzar el contramolde. Después de realizar esta aplicación se debe preparar silicona para aplicar sobre toda la superficie con el fin de cubrir la totalidad del tejido poliéster de refuerzo. Entre aplicaciones sucesivas de silicona se debe esperar que la capa anterior haya endurecido.

Ilustración 28 Aplicación silicona para la fabricación del contramolde empleado en el sistema de moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

Una vez aplicada y endurecida toda la silicona del contramolde, se despega y se corta el material sobrante que se encuentra ubicado sobre el contorno, este corte puede realizarse con tijeras o bisturí.

Ilustración 29 Contramolde fabricado para el sistema de moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

Una vez ha sido fabricado el contramolde en silicona se debe adaptar el punto de infusión de resina, este es por donde ingresa la resina poliéster catalizada durante el proceso de fabricación de una pieza en P.R.F.V.. Primero se debe identificar en que punto debe ir ubicado, esto se puede determinar empleando un Software de elementos finitos que simula el flujo de la resina al interior de la cavidad que forman el molde y contramolde. Este establece cual es el punto óptimo para la ubicación del puerto de ingreso de la resina según la geometría de la pieza. Si no se cuenta con el Software es necesario estimar como se puede presentar el flujo de resina durante el proceso de infusión.

En caso que la ubicación de este punto se realice de manera estimativa, es probable que las piezas fabricadas tengan zonas secas donde la resina catalizada no impregne correctamente el tejido de refuerzo. En estos casos se debe trasladar el punto de infusión con el fin de evitar que se presente este fenómeno. Si la

ubicación del punto de infusión es de manera estimativa, se debe tener en cuenta que para una pieza simétrica lo recomendable es ubicar el punto de infusión en su centro geométrico. Para piezas asimétricas, se debe tener en cuenta las áreas que debe cubrir la resina en diferentes direcciones luego que ingresa a la cavidad formada por el molde y contramolde.

Una vez definido el punto de infusión de la resina, se debe proceder a instalar una manguera que debe resistir solventes empleados para la limpieza de la resina poliéster como Cloruro de Metileno, según su diámetro exterior se perfora el contramolde en el punto establecido y se introduce un tramo de 20 centímetros aproximadamente de tal manera que el extremo en contacto con el contramolde quede coplanar con la superficie donde está ubicada. Con la manguera ubicada en el contramolde, se prepara un poco de silicona y se pega al contramolde. Esta pega debe realizarse teniendo en cuenta que no se pueden presentar filtraciones de aire por el punto de unión.

Luego que la silicona empleada para la unión haya endurecido se ubica un tramo de tejido poliéster sobre la manguera y la silicona en el punto de unión. Sobre el tejido se aplica silicona para adherirlo al contramolde. La función del tejido es reforzar la zona de la unión con el fin de evitar un posible desgarramiento del contramolde.

Ilustración 30 Fabricación puntos de infusión de resina sobre el contramolde en el sistema de moldeo CCBM



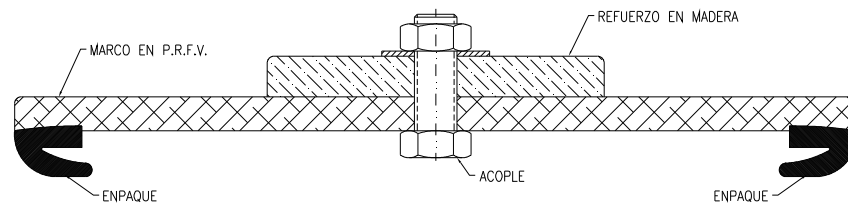
Eduardoño S.A.

10.2.3. Fabricación marco para el sello.

En esta etapa se debe fabricar el marco empleado para el sistema de cierre y sello de los moldes durante el proceso de infusión de la resina para la fabricación de la pieza en P.R.F.V.. Para la fabricación del marco para el sello se requiere de los siguientes materiales:

- P.R.F.V.: Empleado para la fabricación del marco que se obtiene de la pestaña del molde.
- Madera: Empleada para fabricar una estructura que rigidiza el marco en P.R.F.V.
- Empaques: Empleados para producir el sello de los moldes, van pegados en la superficie inferior del marco.
- Acople: A este se conecta la fuente de vacío que sella el molde y contramolde, va ubicado en la superficie superior del marco.
- Adhesivo: Empleado para pegar los empaques al marco y para cubrir la unión del acople y el marco, con el fin de evitar el ingreso de aire al sistema durante la fabricación de una pieza en P.R.F.V..

Ilustración 31 Perfil del marco para el sello y cierre de los moldes en el sistema de moldeo CCBM



Lo primero que se debe considerar antes de fabricar el marco es calcular el área efectiva para el sello de la cavidad generada por los moldes. Esta área se calcula teniendo en cuenta que el vacío aplicado para el sello de los moldes y para la infusión de la resina es de -0.2 bar (2.9 psi) a -0.6 bar (8.7 psi).. Además se debe considerar la magnitud de la fuerza de cierre deseada, de acuerdo a esto se puede proceder a calcular el área requerida según la relación: (woodweb@)

Ecuación 1 Relación para calcular el área para el sello del sistema en el moldeo CCBM

$$A = \frac{F}{P}$$

Donde, F: Magnitud de la fuerza de cierre.

P: Vacío aplicado (-0.2 bar a -0.6 bar)

Luego de haber determinado el área que se requiere se procede a fabricar el marco para el sello. Es importante tener en cuenta que el área calculada es la que forma el marco en la zona entre los dos empaques para el sello de los moldes. Después de haber calculado el área efectiva se divide está por la longitud del perímetro de la pestaña de la pieza, con el fin de establecer el ancho correspondiente del área efectiva. Una vez establecido este ancho se le adiciona el ancho de los dos empaques para el sello de los moldes que se pegan al marco. Estos empaques deben tener un perfil igual al de la ilustración 31. De esta forma se determina el ancho total requerido.

De acuerdo a la medida establecida se procede a fabricar el marco, este se debe fabricar en P.R.F.V. y se obtiene de la pestaña del molde. La laminación empleada para su fabricación dependerá del espesor deseado teniendo en cuenta que debe ser rígido, es recomendable que se emplee material de núcleo en la laminación. El marco debe fabricarse de la pestaña del molde como una pieza única, no es recomendable que se unan laminas en P.R.F.V. que lo formen, ya que esta discontinuidad afectará su rigidez.

Una vez fabricado el marco, se debe fabricar un marco en madera empleado como refuerzo. Este se fabrica para que al pegarlo al marco en P.R.F.V. no se presenten deformaciones durante la manipulación y operación dentro del proceso de fabricación de la pieza, pues si se presenta una deformación considerable se dificulta la puesta a punto del sistema y se puede hacer imposible producir vacío para el sello y cierre de la cavidad formada por los moldes. El marco en madera se debe pegar al que se fabricó de la pestaña de la pieza con P.R.F.V.

Ilustración 32 Fabricación del marco el moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

Luego de fabricar el marco y haberlo reforzado con el de madera, se desmolda de la pestaña del molde para pegarle a la superficie inferior dos empaques empleados para el sello de los moldes. Estos empaques se pegan de tal manera que la distancia entre ellos sea igual al ancho efectivo calculado. Los empaques deben quedar orientados según la ilustración 31, la pega de estos y los empates

que se realicen tanto del empaque interior como el exterior, se debe realizar con un adhesivo, con el fin de evitar el ingreso de aire al sistema durante la aplicación del vacío. Una vez pegados se verifica que la cámara que se genera en medio de los dos empaques quede hermética, es decir que no se presenten zonas de potenciales entradas de aire al sistema durante la fabricación de una pieza en P.R.F.V..

Ilustración 33 Empaques marco para sello en moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

Después de instalar los dos empaques al marco se le instala sobre la superficie exterior un acople al que se conecta el vacío durante el proceso para la fabricación de una pieza en P.R.F.V.. Este acople se debe instalar en medio de los dos empaques empleados para el sello de los moldes, para su instalación se debe perforar el marco según su diámetro exterior. El acople debe quedar ubicado en una zona donde los empaques para el sello de los moldes no presenten curvas, se debe tener en cuenta durante la instalación que debe quedar correctamente ensamblado al marco y que en el punto de unión no puede haber espacio por donde ingrese aire al sistema, ya que al conectarse el vacío al marco se debe generar una cámara completamente hermética entre el molde y contramolde, una entrada de aire no permite que se produzca el vacío adecuado para el sello de los moldes y para el proceso de infusión de la resina. Para prevenir una potencial entrada de aire al sistema es recomendable aplicar en el punto de unión del acople y el marco un adhesivo.

Ilustración 34 Acople para conexión de vacío en moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

10.2.4. Preparación del molde y contramolde.

Luego de fabricar el contramolde y el marco para el sello de los moldes, se procede a preparar el molde y contramolde. La preparación del molde se realiza de la misma forma que en el sistema de moldeo abierto por contacto a mano y consiste en la aplicación de un agente desmoldante.

El proceso de preparación del contramolde, consiste en realizar una inspección visual para verificar que se encuentre en correcto estado y que la unión entre la manguera empleada para la infusión de la resina y la membrana de silicona no presente perforaciones. Si hay algún defecto se debe corregir preparando silicona y aplicándola en el punto del defecto. Si la membrana de silicona se encuentra en buenas condiciones para la fabricación de la pieza, se debe limpiar con un solvente con el fin de evitar que se contamine la pieza que se fabrique en P.R.F.V. de impurezas.

10.2.5. Aplicación de gel-coat.

En esta etapa se aplica el gel-coat sobre la superficie del molde, su aplicación se realiza de la misma forma que en el sistema de moldeo abierto por contacto a mano.

En el sistema de moldeo cerrado CCBM no se pueden obtener piezas con acabado superficial de gel-coat sobre la superficie en contacto con el contramolde, ya que a pesar que la silicona es autodesmoldante¹⁵, en caso de aplicarlo es difícil ubicar el contramolde correctamente sobre el tejido de refuerzo.

10.2.6. Colocación del tejido de refuerzo.

Esta etapa del proceso consiste en disponer sobre la superficie del molde al que se le aplicó el agente desmoldante y el gel-coat las capas de tejido de refuerzo que conforman el laminado final de la pieza. La cantidad de capas que se dispongan sobre el molde depende del espesor final deseado de la pieza. Las capas de refuerzo se deben disponer secas y se deben preformar con las geometrías del molde, este preforma se obtiene ubicando el tejido de refuerzo sobre el molde y aplicando presión sobre las aristas.

Ilustración 35 Preforma tejido de refuerzo en moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

En los sistemas de moldeo cerrado se deben emplear tejidos de refuerzo especiales, estos están compuestos por dos capas de fibra de vidrio no tejida que en medio tienen capa de tejido sintético, este tejido es empleado como medio para

¹⁵ Autodesmoldante: no es necesario aplicar un agente desmoldante para evitar la adhesión con el laminado.

la correcta humectación del material de refuerzo durante el proceso de infusión ó inyección de la resina poliéster catalizada. Si se requiere ubicar en el laminado de la pieza una capa de fibra de vidrio tejida, esta se debe ubicar sobre una capa del tejido especial para sistemas de moldeo cerrado. Si se requieren laminados rígidos y de bajo peso, se recomienda emplear material de núcleo en el laminado, los materiales de núcleo empleados en sistemas de moldeo cerrado son diferentes a los que se emplean en sistemas de moldeo abierto por contacto a mano, la particularidad de estos es que deben tener canales intercomunicados entre sí, que permitan el flujo de la resina poliéster catalizada al interior de la cavidad formada por los moldes.

Ilustración 36 Material de núcleo para sistemas de moldeo cerrado



Eduardoño S.A.

Si el laminado de la pieza tiene dimensiones que no se pueden cubrir con una sola capa del tejido de refuerzo, se deben realizar traslapes teniendo en cuenta que la ubicación de estos debe corresponder con la ubicación definida para la fabricación del contramolde. Para realizar estos traslapes se debe tener en cuenta las recomendaciones que se realizaron en el proceso de colocación del tejido de refuerzo en el sistema de moldeo abierto por contacto a mano.

Si la pieza que se desea fabricar por este sistema de moldeo cerrado requiere de gran cantidad de capas de tejido de refuerzo, es recomendable que el laminado no se realice en una sola infusión, si no que se divida para realizarlo en al menos dos infusiones, esto debido a que un laminado que requiera gran cantidad de capas de tejido de refuerzo requiere bastante resina poliéster para su humectación y a mayor cantidad de resina empleada, la temperatura de exotermia alcanzada durante la fabricación de la pieza será elevada, poniendo en riesgo la integridad de los moldes y de la pieza, pues se pueden generar deformaciones permanentes. Para evitar este fenómeno se puede fabricar el laminado de la pieza empleando varias infusiones, es decir, se realiza una infusión inicial no con la totalidad de las capas de tejido de refuerzo, si no con las necesarias para evitar que la temperatura de exotermia que alcance la resina poliéster no afecte la integridad de los moldes y de la pieza. Luego de realizar esta infusión, se debe esperar a que la resina poliéster empleada después de alcanzar su pico exotérmico, disminuya hasta un valor cercano a la temperatura ambiente. Después se procede a realizar una segunda infusión, en esta se disponen las capas de tejido de refuerzo seco que faltan para la fabricación del laminado de la pieza sobre el laminado que se obtuvo en la primera infusión y se procede a realizar el proceso de la misma manera que se realizó en la primera infusión. Lo importante es que entre capas sucesivas realizadas en diferentes infusiones la resina poliéster empleada no haya curado en su totalidad con el fin de garantizar que se presente una adhesión química entre las diferentes capas del laminado.

Es importante garantizar que la superficie del molde que cubre el tejido de refuerzo corresponda a la superficie del molde que se le aplicó las capas de cera calibrada durante el proceso de fabricación del contramolde, ya que si el tejido de refuerzo cubre zonas que no se consideraron como parte de la pieza a fabricar es posible que durante el proceso de infusión de la resina poliéster catalizada, esta fluya hacia la pestaña del molde a la zona empleada para el sello y cierre de los moldes. Este exceso de resina dificulta el desmolde final de la pieza y aumenta los

tiempos para la puesta a punto del sistema, debido a que es necesario limpiar el molde, el marco y los empaques.

Ilustración 37 Exceso de resina poliéster al interior de la cavidad que forman los empaques del marco en el moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

Se debe pesar el tejido de refuerzo que se emplee para la fabricación del laminado de la pieza, ya que este será empleado para calcular la cantidad de resina requerida para su humectación

Ilustración 38 Peso tejido de refuerzo



Eduardoño S.A.

10.2.7. Ubicación del contramolde.

Esta etapa del proceso consiste en disponer sobre la superficie del molde que contiene las capas de tejido de refuerzo secas el contramolde, este se debe ubicar

sobre el tejido de refuerzo correctamente con el fin que las formas se adapten a la geometría del molde. Luego de disponer el contramolde sobre el molde, se debe retirar los filamentos de fibra de vidrio ubicados sobre la pestaña del molde y que se encuentran en contacto con la superficie inferior del contramolde, estos filamentos se pueden convertir en potenciales entradas de aire al sistema durante la fabricación de una pieza en P.R.F.V., ó pueden permitir el paso de la resina poliéster catalizada hacia el marco empleado para el sello y cierre de los moldes.

Ilustración 39 Ubicación del contramolde en moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

10.2.8. Ubicación puentes de vacío.

Esta etapa del proceso consiste en ubicar sobre la pestaña del molde tramos de Auromat¹⁶ empleados para permitir la succión de la resina poliéster catalizada al interior de la cavidad formada por los moldes.

Debido a que la fuente de vacío se conecta al marco con el fin de producir el sello y cierre de los moldes, es necesario que la cámara donde se produce el vacío delimitada por los dos empaques se comuniquen con la cavidad donde se

¹⁶ Auromat: Nombre comercial de material de núcleo empleado en sistemas de moldeo abierto.

encuentra el tejido de refuerzo seco, con el fin de permitir que el vacío succione la resina poliéster catalizada. Esta comunicación se obtiene con retales de Auromat que se disponen sobre todo el perímetro del moldes, se deben disponer tramos por lo menos en cada esquina del molde que garanticen que el vacío se produce perimetralmente al interior de la cavidad, permitiendo que la resina poliéster catalizada fluya en todas las direcciones una vez ingresa al sistema.

Ilustración 40 Disposición de puentes de vacío en moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

Los tramos de Auromat deben ser de 5 centímetros de ancho aproximadamente y deben disponerse en medio del tejido de refuerzo seco y el contramolde, la zona de contacto del Auromat con el tejido de refuerzo se recomienda que sea de 2 centímetros de longitud. La longitud del Auromat está definida por la ubicación de los empaques del marco empleado para el sello del sistema, debido a que debe finalizar en medio de estos. Lo importante es que debe sobresalir del contramolde, es decir, no debe quedar completamente cubierto por este.

Ilustración 41 Ubicación adecuada de puentes de vacío en moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

Si la pieza a fabricar tiene zonas con geometrías complejas que dificulten el flujo de la resina poliéster catalizada, es necesario que se dispongan allí más tramos de Auromat, con el fin de aumentar los canales de comunicación entre la zona de vacío que se genera en el marco y la cavidad, mejorando el flujo de resina.

10.2.9. Sello molde y contramolde.

Esta etapa del proceso consiste en ubicar sobre el molde y contramolde el marco que se fabrica para el sello y cierre del sistema. Este marco debe ubicarse de tal forma que el contorno del contramolde quede ubicado en medio de los dos empaques del marco. Luego de haberlo ubicado se debe verificar que los tramos de Auromat empleados como puentes de vacío en el sistema estén correctamente ubicados, pues deben sobresalir del contorno del contramolde, pero no deben cubrir el área definida por los dos empaques empleados para el sello del sistema, si no que deben finalizar en medio de estos.

Ilustración 42 Sello del sistema en moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

10.2.10. Conexión y verificación de vacío.

Esta etapa del proceso consiste en la conexión de la fuente de vacío al sistema y la verificación de que la cámara que generan los moldes se encuentra aislada al ambiente.

Inicialmente se debe estrangular la manguera ubicada en el contramolde por donde ingresa la resina catalizada al sistema, después se debe conectar la fuente de vacío al acople ubicado en el marco, se debe producir un vacío de 0.2 bar a 0.6 bar. Luego de conectarla se ejerce presión sobre el marco con el fin que el vacío produzca el sello del sistema, luego que el vacío selle el marco al molde se retira la presión y se verifica si el vacío se sostiene, en caso que el vacío no se sostenga, se deben emplear sistemas mecánicos como prensas con el fin de unir el marco al molde. Un molde con la pestaña adecuada y un marco con los sellos correctos, no requiere el uso de accesorios adicionales para producir el sello del sistema, solo con vacío se puede obtener.

Ilustración 43 Conexión y verificación de vacío en moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

Luego que se logra formar una cavidad aislada al ambiente, se debe verificar que los retales de Auromat empleados como puentes de vacío permitan el paso del vacío de la cámara generada por los empaques del marco a la cavidad que forman los moldes donde se encuentra ubicado el tejido de refuerzo seco, con el fin de garantizar que el vacío pueda succionar la resina poliéster catalizada. Esta verificación se realiza retirando la estrangulación de la manguera ubicada en el contramolde, luego se pone un dedo sobre el extremo libre de la manguera y se sostiene, si el vacío es correcto se debe observar como este ejerce succión sobre el dedo, adicionalmente al ir aumentando el vacío en la cavidad mientras el dedo se sostiene sobre el extremo libre de la manguera, el contramolde se debe ir ajustando a la geometría del molde debido al vacío generado. Es recomendable que se verifique constantemente el vacío suministrado por la bomba durante toda esta etapa del proceso, pues se debe garantizar un vacío constante en el tiempo, para evitar inconvenientes durante el proceso de fabricación de una pieza en P.R.F.V..

Si no se puede obtener vacío al interior de la cavidad generada por los moldes donde se encuentra el tejido de refuerzo seco, se debe realizar un chequeo a todo el sistema, con el fin de establecer la causa. Las causas que pueden generar que no se produzca el vacío adecuado son: entradas de aire al sistema por el marco ó

por el contramolde, mala ubicación de los puentes de vacío, presión excesiva sobre el marco producida por elementos mecánicos como prensas que estrangulan los puentes de vacío evitando que pase de la cavidad generada por los sellos del marco a la cámara generada por los moldes.

10.2.11. Infusión de resina.

Esta etapa del proceso consiste en el ingreso de resina poliéster catalizada a la cámara que generan los moldes donde se encuentra el tejido de refuerzo seco.

Una vez se ha obtenido el vacío adecuado en el sistema, se puede proceder con la infusión de la resina. Durante este proceso es importante que no se presenten entradas de aire al sistema. Primero se debe conectar un tramo de manguera a la que tiene el contramolde por donde ingresa la resina, la longitud de esta depende de la ubicación del recipiente de alimentación de resina poliéster catalizada. Una vez conectada la manguera esta se debe estrangular con el fin de sostener el vacío al interior de la cavidad de los moldes.

Una vez se tiene la manguera adecuada para el proceso de infusión, se debe preparar la resina poliéster que se emplea para la impregnación del tejido de refuerzo. Según el peso del tejido de refuerzo que se dispuso sobre el molde, se prepara la cantidad de resina de acuerdo a la relación fibra-resina deseada, el primer número de esta relación indica el porcentaje del peso final de la pieza que corresponde al peso del tejido de refuerzo y el segundo número indica el porcentaje del peso de la resina sobre el peso total de la pieza. De esta forma si se desea una relación 40-60, indica que del peso final de la pieza el 40% corresponde al peso del tejido de refuerzo y el 60% del peso corresponde a la resina poliéster empleada. Según la relación se establece la cantidad de resina que se debe preparar, a esta se le debe adicionar los desperdicios que se generan por la resina que queda atrapada en la manguera por donde ingresa al sistema,

además debe sobrar un poco en el recipiente que alimenta el sistema, ya que si se acaba durante el proceso de infusión puede generar entradas de aire produciéndose una pieza defectuosa pues el aire queda atrapado en el laminado.

Una vez pesada la cantidad de resina requerida, se le adiciona el catalizador con el fin de comenzar el proceso de polimerización, la cantidad de catalizador debe corresponder a lo sugerido por el fabricante de la resina poliéster, luego de adicionar el catalizador se agita la mezcla y se introduce en el recipiente la manguera por donde ingresa la resina, después se retira el accesorio que estrangula la manguera y la resina debe comenzar a fluir hacia el sistema debido a la succión generada por el vacío de la cavidad de los moldes. La manguera por donde ingresa la resina no debe tomar aire durante el proceso de infusión.

Ilustración 44 Infusión de resina poliéster en sistema de moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

Una vez se esta acabando la resina poliéster en el recipiente de alimentación ó cuando el sistema no permite el ingreso de más resina, se estrangula la manguera y se sostiene el vacío.

Ilustración 45 Cierre suministro de resina poliéster en moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

10.2.12. Desconexión de vacío.

Después de realizar el proceso de infusión de resina poliéster catalizada, se debe sostener el vacío hasta que la resina poliéster empleada haya gelado¹⁷, luego se puede interrumpir el vacío. Es importante dejar el contramolde mientras la resina poliéster termina el proceso de transformación, ya que de esta forma no se emiten vapores orgánicos volátiles como el estireno al ambiente.

10.2.13. Limpieza manguera contramolde.

Luego de desconectar el suministro de vacío al sistema, se remueve el tramo de manguera que se le instalo al contramolde para el proceso de infusión de resina y se limpia con solventes para limpieza de poliéster como Cloruro de Metileno, esto con el fin de remover la resina poliéster que queda atrapada en la manguera. Este procedimiento debe realizarse antes de que la resina endurezca totalmente, ya que si esto ocurre se dificulta su remoción.

¹⁷ Se refiere al punto en el que se presenta el cambio de estado de la resina poliéster.

10.2.14. Desmolde de la pieza fabricada: En esta etapa del proceso se debe desmoldar la pieza del molde, este procedimiento se realiza igual que en el sistema de moldeo por contacto a mano. Antes de realizar el desmolde de la pieza, se debe retirar el marco y el contramolde.

Ilustración 46 Pieza fabricada por moldeo CCBM

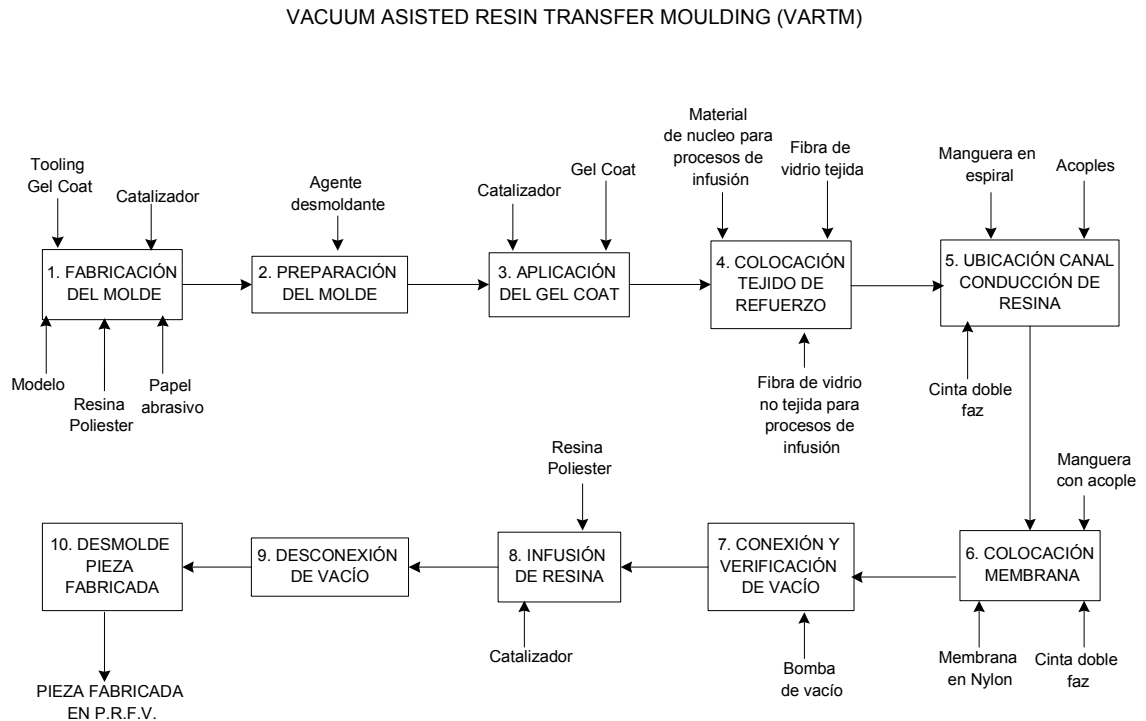


Eduardoño S.A.

10.2 MOLDEO CERRADO VACUUM ASISTED RESIN TRANSFER MOULDING (VARTM)

Este sistema de moldeo cerrado es muy empleado para la fabricación de piezas de gran tamaño y diversas formas, el tiempo de puesta a punto para la fabricación de una pieza es elevado en comparación con el CCBM. Este proceso de moldeo cerrado, emplea un molde rígido y un contramolde flexible desechable fabricado en una membrana en nylon, donde la resina poliéster catalizada ingresa a la cavidad formada por los moldes con ayuda de vacío. Al igual que los sistemas de moldeo expuestos anteriormente el VARTM es un proceso continuo que se divide por etapas. A continuación se ilustra el diagrama de flujo del proceso y se describen cada una de las etapas.

Ilustración 47 Diagrama de flujo del proceso de moldeo VARTM



10.3.1. Fabricación del molde.

La etapa de fabricación del molde en el sistema de moldeo cerrado VARTM se ejecuta de la misma forma que en el sistema de moldeo abierto por contacto a mano. Si se cuenta con el molde fabricado para el sistema de moldeo abierto por contacto a mano ó para CCBM, no se requiere realizar ningún ajuste para que sea empleado en este tipo de sistema de moldeo.

10.3.2. Preparación del molde.

Esta etapa del proceso se ejecuta igual que en el sistema de moldeo abierto por contacto a mano, consiste en la aplicación de un agente desmoldante a la superficie del molde, con el fin de evitar la adhesión entre la capa de gel-coat de la pieza y el molde.

10.3.3. Aplicación del gel-coat.

En esta etapa del proceso se aplica una capa de gel-coat sobre la superficie del molde. La forma como se debe aplicar y el control que se debe tener en el proceso se debe realizar de la misma forma que en el sistema de moldeo abierto por contacto a mano. En este sistema de moldeo cerrado al igual que en el CCBM, no se puede obtener acabado superficial sobre la superficie del laminado que queda en contacto con el contramolde.

10.3.4. Colocación del tejido de refuerzo.

Después de haber aplicado una capa de gel-coat sobre la superficie del molde, se procede a disponer sobre este las capas de tejido de refuerzo seco. La disposición de estas capas y los tejidos de refuerzo empleados deben ser iguales que en el sistema de moldeo cerrado CCBM.

En el sistema de moldeo cerrado CCBM, el tejido de refuerzo se disponía únicamente sobre la superficie del molde donde se aplicó la cera calibrada, en este sistema de moldeo cerrado no se requiere la aplicación de cera calibrada para la fabricación del contramolde, pero se debe considerar cuando se disponga el tejido de refuerzo que debe quedar un área libre sobre el perímetro del molde, donde se ubica una cinta doble faz empleada para el sello de los moldes y una manguera en espiral empleada como sistema de transferencia de la resina poliéster para la impregnación del tejido de refuerzo.

10.3.5. Ubicación canal de conducción de resina.

En esta etapa del proceso se realiza el montaje del sistema de transferencia de resina para la impregnación del tejido de refuerzo.

El sistema de transferencia que se usa en el moldeo cerrado VARTM, puede ser de alimentación perimetral, de superficie ó una combinación de ambos y se elige de acuerdo a factores como el tamaño de la pieza, la velocidad de impregnación del tejido de refuerzo por parte de la resina y las formas del molde.

De acuerdo al sistema de transferencia a emplear se debe instalar el conducto por donde fluye la resina durante el proceso, para la construcción de este se puede emplear manguera plástica en espiral, esta una vez se aplica el vacío al interior de la cavidad formada por los moldes, genera un camino libre de restricciones por donde fluye la resina. A medida que circula a través de los conductos sale de la manguera por los espacios libres del espiral, impregnando el tejido de refuerzo y fluyendo hacia el punto donde se encuentra aplicado el vacío.

Ilustración 48 Disposición sistema de transferencia de resina para moldeo VARTM



Eduardoño S.A.

Para el diseño del sistema de transferencia se puede emplear un Software de elementos finitos que simula el flujo de resina poliéster para una distribución deseada, si en la simulación se obtienen zonas donde la resina no impregna el tejido de refuerzo, se deben redistribuir los canales de distribución y/o los puntos donde se aplica vacío en el sistema. Si no se cuenta con un Software para el proceso de simulación se deben realizar ensayos reales sobre la pieza, con el fin

de definir la distribución adecuada de los conductos que conforman el sistema de transferencia de resina y la ubicación del vacío.

El sistema de transferencia debe tener instalado un acople que permita el ingreso de la resina catalizada a los conductos, comúnmente se emplean acoples plásticos en “T”.

Es importante destacar que los accesorios empleados en el sistema de transferencia de resina para la fabricación de una pieza por este sistema de moldeo cerrado como acoples y mangueras en espiral se deben desechar una vez se ha fabricado la pieza, debido a que quedan impregnados de resina poliéster en estado sólido.

10.3.6. Colocación de la membrana.

En esta etapa del proceso se dispone sobre la superficie del molde que tiene el tejido de refuerzo seco y los conductos que conforman el sistema de transferencia de resina, una membrana en nylon que es empleada como contramolde, esta se debe pegar al molde con una cinta doble faz¹⁸.

Inicialmente se debe cortar la membrana de nylon que se requiere para la fabricación de la pieza, teniendo en cuenta que esta se debe ajustar a las geometrías del molde cuando se le aplica vacío al sistema, pues en las zonas donde no exista el ajuste adecuado quedarán excesos de resina en el laminado de la pieza. En caso que la medida en la que viene la membrana no cubra la superficie del molde se deben realizar empates con cinta adhesiva y garantizar que no queden entradas de aire al sistema.

¹⁸ Cinta empleada para el sello de los moldes, presenta adhesivo por las dos caras.

Una vez cortada la membrana, se pega sobre todo el perímetro del molde tramos de cinta doble faz, al interior de la región delimitada por la cinta deben quedar el tejido de refuerzo seco correspondiente al laminado de la pieza y los conductos que componen el sistema de transferencia de resina. Después de pegar la cinta, se le retira el papel que tiene en la parte superior y se le pegan tramos de cinta adicionales que serán empleados para producir pliegues en la membrana de nylon, que contribuyen a la generación de vacío al interior de la cavidad y a que la membrana se adapte a la geometría del molde. Después de pegar la cinta y los tramos para generar los pliegues, se procede a pegarle a esta la membrana de nylon previamente cortada.

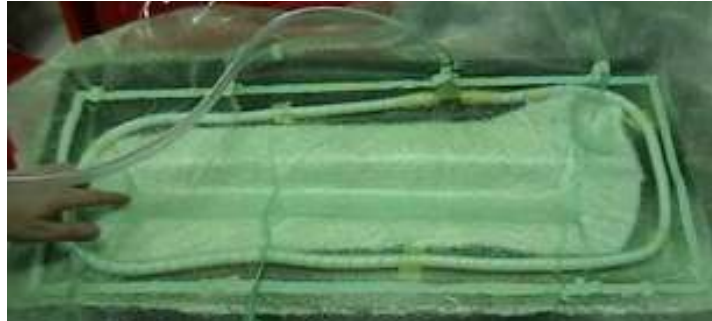
Ilustración 49 Sello sistema de moldeo VARTM



Eduardoño S.A.

Durante el proceso del pegado de la membrana al molde, se debe tener en cuenta que el acople por donde ingresa la resina al sistema no puede quedar atrapado en el interior de la cavidad que forman los moldes. El punto por donde sale el acople de la membrana se debe sellar correctamente con el fin que no se presenten entradas de aire durante el proceso de fabricación de la pieza en P.R.F.V..

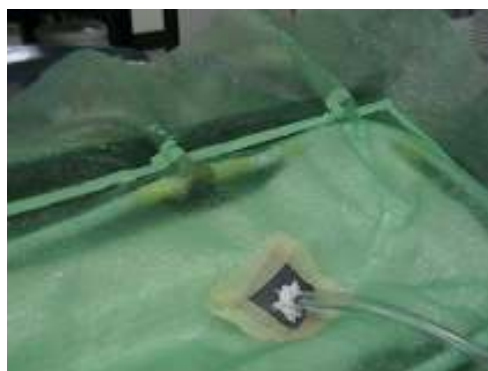
Ilustración 50 Membrana en nylon empleada en moldeo VARTM



Eduardoño S.A.

Después de pegar la membrana de nylon al molde y de ajustar el acople por donde ingresa la resina poliéster catalizada al sistema de transferencia, se debe perforar la membrana para pegar un tramo de manguera por donde se aplicará vacío al sistema. Es importante que la unión entre la membrana y la manguera no presente puntos que sean potenciales entradas de aire, se recomienda que se aplique un cordón de cinta doble faz sobre la unión de estos elementos. Para establecer el punto adecuado donde se aplicará vacío al sistema se puede emplear un Software para simular el proceso de infusión para puntos de vacío y sistemas de transferencia de resina determinados, en caso de que no se cuente con un Software este punto se debe ubicar de manera estimativa.

Ilustración 51 Punto de infusión d resina en el moldeo VARTM



Eduardoño S.A.

Una ventaja de este sistema de moldeo es que la membrana de nylon permite observar como se presenta el flujo de resina al interior de la cavidad formada por los moldes durante el proceso de infusión, de acuerdo a esto se puede identificar el punto de aplicación de vacío adecuado después de la fabricación de la primera pieza.

10.3.7. Conexión y verificación de vacío.

En esta etapa del proceso se conecta la fuente de vacío al sistema y se verifica que no se presenten entradas de aire al sistema.

Se conecta la fuente al punto donde se desea aplicar el vacío del sistema, después se conecta un tramo de manguera al acople por donde ingresa la resina poliéster catalizada al sistema de transferencia, la longitud de esta manguera depende de la ubicación del sistema de alimentación de resina, esta manguera instalada se estrangula y se verifica que el vacío aplicado ajuste correctamente la membrana de nylon a la superficie del molde. Si esta no se ajusta se debe realizar un chequeo al sello de los moldes con el fin de identificar entradas de aire al sistema que dificulten la generación de vacío al interior de la cavidad.

Ilustración 52 Verificación de vacío en el moldeo VARTM



Eduardoño S.A.

Una vez chequeado el vacío en el sistema, es recomendable verificar que no se presenten pequeñas entradas de aire, esta verificación puede realizarse con un detector de fugas por ultrasonido. Las pequeñas entradas de aire permiten la generación del vacío adecuado para el proceso de infusión de la resina poliéster catalizada, el problema es que el aire que ingresa al sistema queda atrapado en el laminado de la pieza.

Para corregir entradas de aire al sistema se puede emplear la misma cinta doble faz que se uso para producir el sello de los moldes.

10.3.8. infusión de resina.

Esta etapa del proceso consiste en ingresar resina poliéster catalizada al sistema a través de los conductos que conforman el sistema de transferencia. El proceso de preparación de resina poliéster y la forma como se alimenta el sistema se ejecuta de la misma forma que en el sistema de moldeo cerrado CCBM.

Ilustración 53 Proceso de infusión de resina en el moldeo VARTM



Eduardoño S.A.

10.3.9. Desconexión de vacío.

En esta etapa del proceso se desconecta la bomba de vacío del sistema. Al igual que en el sistema de moldeo cerrado CCBM, el vacío se puede desconectar luego que la resina poliéster empleada haya gelado. También se recomienda que la membrana de nylon permanezca ubicada sobre el laminado con el fin de evitar la generación de vapores orgánicos volátiles como el estireno.

10.3.10. Desmolde de la pieza fabricada.

En esta etapa del proceso se debe desmoldar la pieza del molde, este procedimiento se realiza igual que en los sistemas de moldeo descritos anteriormente. Antes de realizar el desmolde de la pieza, se debe retirar la membrana de nylon o contramolde y los accesorios que componen el sistema de transferencia de resina poliéster.

11 ENSAYOS REALIZADOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MOLDEO CERRADO CCBM

En los procesos de transformación del plástico reforzado que emplean sistemas de moldeo cerrado, las materias primas empleadas para la fabricación de la pieza deben presentar propiedades especiales. La resina poliéster empleada debe ser de baja viscosidad, con aditivos para promover la humectación del tejido de refuerzo y de baja contracción. Los tejidos de refuerzo deben tener una buena permeabilidad¹⁹.

Teniendo en cuenta la similitud en las propiedades de las materias primas empleadas en los sistemas de moldeo cerrado, es necesario realizar ensayos previos a la fabricación de una pieza, con el fin de establecer el desempeño de las materias primas en las condiciones de trabajo a las que estarán sometidas.

Adicionalmente para la implementación del sistema de moldeo cerrado CCBM es necesario identificar las materias primas adecuadas para la fabricación del contramolde, estas deben ser resistentes a diferentes agentes químicos a los que estará expuesto durante el proceso de fabricación de una pieza en P.R.F.V..

¹⁹ Permeabilidad: Capacidad de humectación del tejido de refuerzo.

11.1 ENSAYOS REALIZADOS A LA RESINA POLIÉSTER.

Para los dos sistemas de moldeo cerrado que son objeto de análisis se emplea resina poliéster “Cristalan-812-LRTM”, suministrada por Andercol S.A. Esta resina es formulada para ser empleada en sistemas de moldeo cerrado debido a sus propiedades.

A continuación se referencia las características técnicas de esta resina según la ficha técnica suministrada por el fabricante.

Tabla 2 Propiedades resina poliéster para procesos de infusión

Característica	Valor
Viscosidad Brookfield (cps) (Aguja 3, 20 rpm, 1 min)	150-200
Porcentaje de sólidos	58-62
Tiempo de gel a 25°C	7-12 min
Temperatura de exotermia [°C]	130-150

Andercol S.A.

El tiempo de gel y la temperatura de exotermia son tomadas de una muestra de 100 gramos catalizada al 1%, el catalizador empleado es MEK²⁰.

²⁰ MEK: Peroxido de Metil Etil Cetona

11.1.1 Exotermia a diferentes porcentajes de catalización.

Empleando como catalizador MEK, se realizan ensayos a diferentes porcentajes de catalización con el fin de establecer como se comporta la resina poliéster en las condiciones de trabajo de la fabrica de botes de Eduardoño S.A.; para identificar el valor adecuado que se debe emplear.

- Descripción del procedimiento: Para cada porcentaje de catalización a evaluar se debe tomar una muestra de 100 gramos de resina poliéster a temperatura ambiente, luego se le adiciona el catalizador según el peso de la muestra. Una vez adicionado se agita la muestra con el fin de homogenizarla, a la muestra agitada se le introduce una termocupla que debe ser previamente encerada con el fin que no se adhiera a la muestra durante el proceso de polimerización. Se debe tomar el tiempo con un cronómetro a partir del momento que se realiza la mezcla de resina poliéster con el catalizador.

Luego de introducir la termocupla a la muestra se registran las lecturas de temperatura en el tiempo, se debe hacer un seguimiento al estado de la resina con el fin de establecer el tiempo de gel de la muestra.

- Presentación de resultados: Se tomaron tres muestras que fueron catalizadas al 1%, 1.25% y 1.5% respectivamente. Estos porcentajes de catalización son sugeridos por el fabricante de la resina,

A continuación se presentan los resultados obtenidos y las condiciones a las que se realizaron los ensayos.

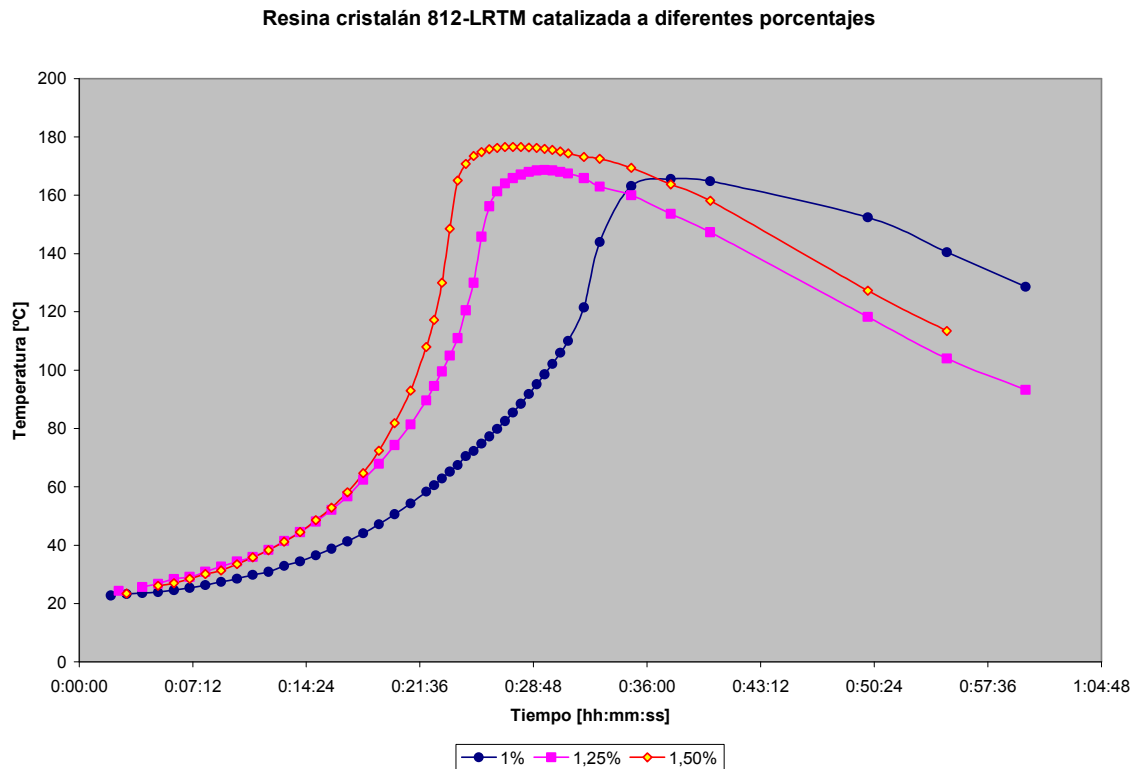
Tabla 3 Condiciones en las que se realizaron los ensayos de exotermia a diferentes porcentajes de catalización

	1%	1.25%	1.50%
Fecha [dia/mes/año]	17/08/2006	17/08/2006	18/08/2006
Hora [hh:min]	11:17	14:30	15:12
Temperatura ambiente [°C]	21.5	22	20.8

Tabla 4 Resultados obtenidos en ensayos de exotermia a diferentes porcentajes de catalización

	1%	1.25%	1.50%
Temperatura de gel [°C]	31.8	32.7	33
Tiempo de gel [mm:ss]	12:26	09:36	09:43
Temperatura de exotermia [°C]	165.6	168.7	176.6
Tiempo de exotermia [mm:ss]	37:30	29:30	27:30

Ilustración 54 Resultados obtenidos en ensayos de exotermia a diferentes porcentajes de catalización en resina para procesos de infusión.



- Conclusiones de los resultados obtenidos: Según los resultados de los ensayos realizados, se puede identificar que a mayor porcentaje de catalización más rápido es el proceso de polimerización de la resina poliéster. Debido a que la pieza prototipo a fabricar por el sistema de moldeo cerrado CCBM y VARTM, es pequeña se puede catalizar la resina poliéster al 1.5% con el fin de reducir los tiempos de operación. Es importante tener en cuenta que los porcentajes de catalización de los ensayos se encuentran en el rango que sugiere el fabricante de la resina (1% al 2%).

11.1.2 Exotermia para diferentes relaciones de MEK-AAP²¹

En los sistemas de moldeo cerrado es posible acelerar el proceso de polimerización de la resina poliéster empleada para la fabricación de una pieza, con el fin de reducir los tiempos de fabricación aumentando el nivel de productividad. Esta aceleración en el proceso se puede obtener con la adición de AAP al MEK. Para determinar la cantidad adecuada que se debe adicionar, se deben realizar ensayos mezclando a diferentes relaciones MEK y AAP para catalizar la resina poliéster que se emplee en el proceso a un porcentaje determinado (1.5%), con el fin de elegir la relación adecuada según las condiciones de operación del proceso.

- Descripción del procedimiento: Se establece la relación de mezcla de MEK y AAP que se desea evaluar, de acuerdo a esta se mezclan los materiales teniendo en cuenta que se debe preparar en base al peso. Una vez se tiene la mezcla se prepara una muestra de resina poliéster de 100 gramos y se le adiciona la mezcla de MEK y AAP al 1.5% en peso de la resina. Se agita la mezcla de resina y catalizador hasta homogenizar y se introduce a la muestra una termocupla a la que previamente se le debe aplicar un agente desmoldante. Se registran las temperaturas de la muestra durante el proceso de polimerización.

- Presentación de resultados: Se realizan 5 ensayos evaluando diferentes relaciones de mezcla de MEK y AAP (50-50, 60-40, 70-30, 80-20 y 90-10). En los ensayos realizados se cataliza 100 gramos de resina poliéster al 1.5% con la mezcla de MEK y AAP preparada.

²¹ AAP (Peroxido de Acetil Acetona): peroxido orgánico de alta reactividad empleado para acelerar el proceso de curado de la resina poliéster.

A continuación se presentan los resultados obtenidos y las condiciones a las que se realizaron los ensayos.

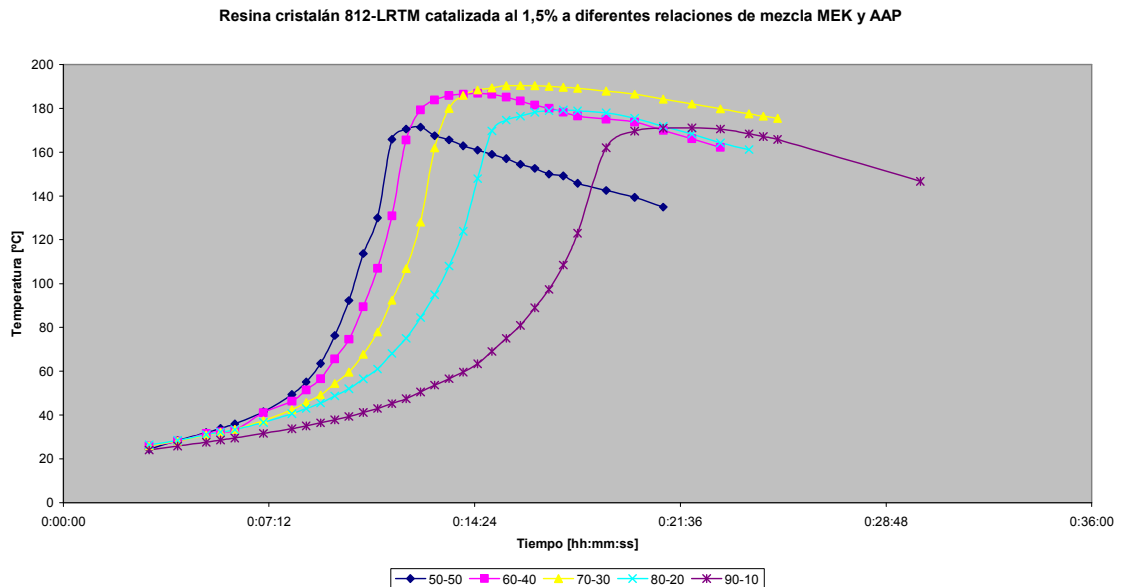
Tabla 5 Condiciones en las que se realizaron los ensayos de exoterminia a diferentes relaciones de mezcla de peróxidos MEK-AAP

	RELACIONES DE MEZCLA MEK-AAP PARA CATALIZACIÓN AL 1.5%				
	50-50	60-40	70-30	80-20	90-10
Fecha [dia/mes/año]	15/08/2006	15/08/2006	15/08/2006	15/08/2006	15/08/2006
Hora [hh:min]	09:39	10:05	10:30	11:00	11:35
Temperatura ambiente [°C]	20.6	21	21.2	21.5	19.8

Tabla 6 Resultados obtenidos en ensayos de exoterminia a diferentes relaciones de mezcla de peróxidos MEK-AAP

	RELACIONES DE MEZCLA MEK-AAP PARA CATALIZACIÓN AL 1.5%				
	50-50	60-40	70-30	80-20	90-10
Temperatura de gel [°C]	30.7	32	32.3	33.3	31.3
Tiempo de gel [mm:ss]	4:40	5:10	5:30	6:00	6:55
Temperatura de exoterminia [°C]	171.4	186.8	190.4	179.3	171
Tiempo de exoterminia [mm:ss]	12:30	14:30	16:00	17:30	21

Ilustración 55 Resultados obtenidos en ensayos de exotermia a diferentes relaciones de mezcla de peróxidos MEK-AAP



- Conclusiones de los resultados obtenidos: Después de establecer que el porcentaje de catalización adecuado para la fabricación de la pieza prototipo²² por los sistemas de moldeo cerrado CCBM y VARTM es del 1.5%, se realizan ensayos con el fin de establecer cual es la relación adecuada para la mezcla de MEK-AAP para la catalización de la resina poliéster. De los resultados obtenidos se concluye que a mayor cantidad de AAP se acelera considerablemente el proceso de polimerización de la resina, de acuerdo a esto se establece que la proporción de mezcla adecuada para el proceso debe ser de 80-20, debido a que si se emplea mayor cantidad es probable que durante el proceso de infusión de la resina esta comience a gelarse antes de impregnar la totalidad del tejido de refuerzo. Es importante que el tiempo de gel sea mayor al tiempo de infusión de la resina con el fin de evitar cualquier inconveniente durante el proceso.

²² Se refiere a la pieza que se fabrica por los diferentes sistemas de moldeo que son objeto de estudio.

11.2 ENSAYOS REALIZADOS A LA SILICONA PARA LA FABRICACIÓN DEL CONTRAMOLDE.

Debido a las condiciones de trabajo del contramolde en el sistema de moldeo cerrado CCBM, se debe emplear materiales para su construcción que resistan la exposición directa a agentes químicos como monómero de estireno y peróxidos orgánicos.

Para la elección de la silicona con la que se fabrica el contramolde para el sistema de moldeo cerrado CCBM, fue necesario realizar una búsqueda de las diferentes alternativas que se encontraban en el mercado local, con el fin de establecer la indicada para este proceso.

En el proceso de selección de la silicona se evaluaron dos tipos. El primero es silicona acética comercial de uso domestico, empleada para la fabricación y reparación de cabinas de baños y ventanas. El segundo tipo de silicona evaluado, es de dos componentes empleada para la fabricación de moldes de figurines²³, la elección de este tipo de silicona se realizó con la ayuda de quienes la distribuyen en Colombia y de acuerdo a la aplicación a la que será sometida.

A los dos tipos de silicona evaluadas se les realizan ensayos para establecer como es su aplicación y si puede soportar las condiciones a las que será sometida durante el proceso de fabricación de piezas en PRFV.

11.2.1 Descripción del procedimiento.

²³ Figurines: muñecos plásticos pequeños.

A los dos tipos de silicona que fueron objetos de evaluación se le realizan dos procedimientos diferentes, con el fin de establecer el comportamiento ante diferentes agentes químicos.

Inicialmente se fabrican dos secciones de silicona reforzadas con tejido poliéster sobre un modelo, con el fin de establecer la forma como debe ser aplicada y sus limitaciones. La forma en que fueron fabricadas estas secciones se ejecuta según el procedimiento descrito para la fabricación del contramolde en el sistema de moldeo cerrado CCBM. A estas secciones de silicona se le realizan los procedimientos, que se describen a continuación:

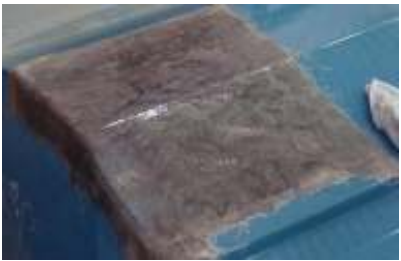
- Sección de silicona expuesta directamente a un laminado: Sobre el modelo del que se obtuvieron las secciones de silicona se dispone tejido de refuerzo impregnado con resina poliéster catalizada, este se asienta a la superficie del modelo a la que previamente se le debe aplicar un agente desmoldante, con el uso de rodillos de aluminio o felpa. Luego que el laminado está correctamente asentado se dispone sobre este la sección de silicona fabricada, que se debe mantener en contacto directo con el laminado durante el proceso de polimerización y curado de la resina poliéster.

- Sección de silicona en recipiente con peróxido orgánico (MEK): De las secciones de silicona fabricadas se corta un tramo y se introduce a un recipiente que contiene peróxido orgánico MEK. Este procedimiento se realiza para establecer el comportamiento de la silicona y el tejido poliéster empleado como refuerzo ante el peróxido.

11.2.2 Resultados obtenidos y conclusiones.

- Sección de silicona expuesta directamente a un laminado: A continuación se ilustra las condiciones finales del laminado y de la silicona después de realizar este procedimiento.

Tabla 7 Resultados de ensayos a siliconas

	Apariencia final del laminado	Apariencia final de la sección de silicona
Silicona Acética		
Silicona para moldes		

De los resultados obtenidos se concluye:

A. La silicona acética presenta una degradación sobre la superficie que se encuentra en contacto con el laminado, ya que en algunas zonas se observa una reducción en el espesor de película, adicionalmente se observa un cambio físico pues hay una reducción en el brillo de la superficie y se presentan zonas opacas.

B. La silicona para moldes no presenta cambios físico-químicos después de la ejecución del procedimiento.

C. Durante el proceso de aplicación de las siliconas se identifica que la acética es de alta viscosidad, lo que dificulta el proceso de aplicación, generando una película irregular. La silicona para moldes puede ser aplicada con brocha ó espátula y se adapta correctamente a las formas donde es aplicada.

- Sección de silicona en recipiente con peróxido orgánico (MEK): Después de someter las secciones de silicona que son objeto de análisis al peróxido orgánico MEK, se observa que no presentan descomposición físico-química, solo hay descomposición del tejido poliéster empleado como refuerzo, que no está completamente cubierto con silicona.

12 PIEZAS FABRICADAS EN P.R.F.V.

12.1 PIEZA PROTOTIPO.

Para la implementación del sistema de moldeo cerrado CCBM y para la comparación de este con sistemas de moldeo tradicionales como el VARTM y el moldeo por contacto a mano, es necesario seleccionar una pieza en P.R.F.V. pequeña, asimétrica y con geometrías complejas. Estos criterios de selección surgen debido a que no se han fabricado piezas en P.R.F.V. por sistemas de moldeo cerrado como el CCBM en el proceso productivo de la fabrica de botes de Eduardoño S.A. y una pieza pequeña permite tener un mejor control sobre las variables que influyen en el proceso, además la asimetría y la complejidad de las formas se constituye en un factor determinante en el diseño del contramolde pues influye en la ubicación del punto por donde ingresa la resina al sistema y en la ubicación de los puentes de vacío en el sistema de moldeo cerrado CCBM.

Debido a estas condiciones la pieza seleccionada sobre la que se realizan los ensayos es el soporte izquierdo para el motor de la moto de agua que se fabrica en Eduardoño S.A. referencia XL700B. Un factor decisivo para la selección de esta pieza además del tamaño, la asimetría y las formas, es que presenta una pestaña adecuada para el sello y cierre de los moldes, no se requiere adecuar el molde que se emplea para la fabricación del soporte motor por el sistema de moldeo abierto por contacto a mano.

Ilustración 56 Molde pieza prototipo



Eduardoño S.A.

12.2 PIEZAS FABRICADAS POR EL SISTEMA DE MOLDEO CERRADO CCBM.

Una vez seleccionada la pieza prototipo a fabricar, se deben construir los elementos que se requieren para la implementación del sistema de moldeo cerrado CCBM, como marco para sello y contramolde. Estos se deben fabricar siguiendo el procedimiento correspondiente descrito anteriormente.

Luego de haber fabricado los elementos requeridos, se puede proceder con la fabricación de piezas en P.R.F.V. Las piezas son fabricadas según el porcentaje de catalización y a la relación de mezcla de peróxidos (MEK-AAP), establecidas anteriormente. En cada pieza fabricada se realizan cambios de una de las variables que influyen en el proceso como valor de vacío aplicado, ubicación de los puentes de vacío, ubicación del punto de infusión, capas de tejido de refuerzo empleadas, aplicación de gel-coat sobre la superficie del molde y tipos de tejido de refuerzo empleados. Estos cambios controlados sobre las variables que influyen en el proceso se realizan con el fin de establecer la configuración adecuada de cada una de las variables para este proceso.

12.2.1 Descripción del procedimiento.

Antes de comenzar a fabricar las piezas por el sistema de moldeo cerrado se establecen las variables a controlar durante el proceso y como pueden ser registradas. De acuerdo a las variables a controlar, se considera cual de estas se cambia para la fabricación de una pieza, con el fin de identificar como influye sobre el proceso. Inicialmente se deben cambiar variables del proceso como vacío aplicado, ubicación de puentes de vacío y ubicación de punto de infusión, de acuerdo a los resultados obtenidos se establece la configuración adecuada de las variables del proceso. Una vez definida esta configuración, se realizan cambios en variables de materias primas en el proceso referentes a número de capas de tejido de refuerzo y tipos de tejidos de refuerzo empleados. Estos cambios en cada una de las variables tanto del proceso como de los materiales, permiten tener un conocimiento adecuado del sistema de moldeo cerrado CCBM.

El procedimiento para la fabricación de cada pieza por el sistema de moldeo cerrado CCBM, se realiza de la manera en que se describió anteriormente.

12.2.2 Resultados obtenidos.

Luego de fabricar la totalidad de las piezas por el sistema de moldeo cerrado CCBM de acuerdo a las variables del proceso y de materias primas que se desea cambiar para la fabricación de cada pieza, se realiza un registro de los resultados obtenidos.

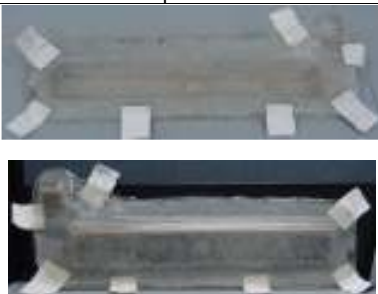
Tabla 8 Resultados obtenidos de la fabricación de pieza prototipo por moldeo CCBM

		1	2	3
% Catalización		1,50%	1,50%	1,50%
Relación mezcla Catalizador	MEK	80	80	80
	AAP	20	20	20
Secuencia de Laminación		(Ti)	(Ti)	(Ti)
Peso tela [gr]	Ti ²⁴	122,5	123	124
	WR8 ²⁵	N/A	N/A	N/A
Tiempo gel [mm:ss]		08:30	08:04	9:00
Vacío aplicado [bar]		0,6	0,2	0,4
Tiempo infusión [mm:ss]		0:40	1:35	3:57
Tiempo de vacío [mm:ss]		35:34	13:00	25:00
Espesor promedio pieza [mm]		2,2	2,4	2,24
Peso final de la pieza [gr]		408,93	402,5	406,4
Relación fibra-resina		30-70	30-70	30-70
Variable que cambia		Vacío aplicado	Vacío aplicado	Vacío aplicado
Imágenes pieza fabricada				
Comentarios		- La pieza fue desmoldada a 1:20 [hh:mm]. - Se prepararon 350 gr de resina. - Temp. ambiente: 24°C	- La pieza fue desmoldada a 1:20 [hh:mm]. - Se prepararon 350 gr de resina. - Temp. ambiente: 24.5°C	- La pieza fue desmoldada a 1:40 [hh:mm]. - Se prepararon 350 gr de resina. - Temp. ambiente: 25°C.

²⁴ Ti: Abreviación de tejido de refuerzo especial para proceso de infusión.

²⁵ WR8: Abreviación de fibra de vidrio tejido (Woven Roving 800)

Tabla 9 Resultados obtenidos de la fabricación de pieza prototipo por moldeo CCBM

		4	5	6
% Catalización		1,50%	1,50%	1,50%
Relación mezcla Catalizador	MEK	80	80	80
	AAP	20	20	20
Secuencia de Laminación		(Ti)	(Ti)	(Ti)
Peso tela [gr]	Ti	122	122	124,5
	WR8	N/A	N/A	N/A
Tiempo gel [mm:ss]		6:55	7:00	8:10
Vacío aplicado [bar]		0,45	0,35	0,4
Tiempo infusión [mm:ss]		2:30	1:11	3:35
Tiempo de vacío [mm:ss]		20:00	22:00	28:00
Espesor promedio pieza [mm]		2,83	2,35	2,3
Peso final de la pieza [gr]		388,75	418,62	390
Relación fibra-resina		31,5-68,5	29,4-70,6	32-68
Variable que cambia		Vacío aplicado	Puentes de vacío	Ubicación punto de infusión
Imágenes pieza fabricada				
Comentarios		- Se aplicó amina ²⁶ al 0,15% - La pieza fue desmoldada a 0:45 [hh:mm].	- La pieza fue desmoldada a 1:20 [hh:mm]. - Se prepararon 350 gr de resina.	- La pieza fue desmoldada a 1:10 [hh:mm]. - Se prepararon 350 gr de resina.

²⁶ Amina: compuesto que al adicionarlo a la resina poliéster acelera el proceso de polimerización.

Tabla 10 Resultados obtenidos de la fabricación de pieza prototipo por moldeo CCBM

		7	8	9
% Catalización		1,50%	1,50%	1,50%
Relación mezcla Catalizador	MEK	80	80	80
	AAP	20	20	20
Secuencia de Laminación		(Ti)	(Ti)(Ti)	(Ti)(Ti)
Peso tela [gr]	Ti	124	212,5	223,1
	WR8	N/A	N/A	N/A
Tiempo gel [mm:ss]		7:00	8:20	6:40
Vacío aplicado [bar]		0,35	0,4 bar	0,4
Tiempo infusión [mm:ss]		5:00	3:30	3:10
Tiempo de vacío [mm:ss]		27:00	15:00	25:00
Espesor promedio pieza [mm]		2,8	4,9	4,2
Peso final de la pieza [gr]		368,29	811,07	701,85
Relación fibra-resina		34-66	26,2-73,8	31,8-68,2
Variable que cambia		Puentes de vacío	Número de capas de tejido de refuerzo	Número de capas de tejido de refuerzo
Imágenes pieza fabricada				
				
Comentarios		- La pieza fue desmoldada a 2:19 [hh:mm]. - Se prepararon 350 gr de resina. - Temp. ambiente: 26°C.	- La pieza fue desmoldada a 1:40 [hh:mm]. - Se prepararon 720 gr de resina. - Temp. ambiente: 24°C.	- La pieza fue desmoldada a 1:45 [hh:mm]. - Se prepararon 640 gr de resina. - Temp. ambiente: 25°C.

Tabla 11 Resultados obtenidos de la fabricación de pieza prototipo por moldeo CCBM

		10	11	12
% Catalización		1,50%	1,50%	1,50%
Relación mezcla Catalizador	MEK	80	80	80
	AAP	20	20	20
Secuencia de Laminación		(Ti)(Ti)	(Ti)(Ti)	(Ti)(WR8)
Peso tela [gr]	Ti	234,7	235,7	132,02
	WR8	N/A	N/A	103
Tiempo gel [mm:ss]		7:40	7:05	8:05
Vacío aplicado [bar]		0,5	0,45	0,45
Tiempo infusión [mm:ss]		5:10	3:30	3:40
Tiempo de vacío [mm:ss]		27:00	22:00	15:00
Espesor promedio pieza [mm]		5	5	3,8
Peso final de la pieza [gr]		884,58	1044,24	704,14
Relación fibra-resina		26,5-73,5	22,6-77,4	33,4-66,6
Variable que cambia		Posición de los puentes de vacío	Aplicación de gel coat sobre el molde	Tipo de tejido de refuerzo empleado
Imágenes pieza fabricada				
				
Comentarios		- La pieza fue desmoldada a 1:50 [hh:mm]. - Se prepararon 700 gr de resina. - Temp. ambiente: 24°C.	- Se aplicó gel-coat blanco y pintura de contraste sobre el molde con atomizador. - Se prepararon 750 gr de resina. - Temp. ambiente: 23°C.	- Se aplicó gel-coat blanco y pintura de contraste sobre el molde con atomizador. - Se prepararon 600 gr de resina. - Temp. ambiente: 23°C.

Tabla 12 Resultados obtenidos de la fabricación de pieza prototipo por moldeo CCBM

		13	14
% Catalización		1,50%	1,50%
Relación mezcla Catalizador	MEK	80	80
	AAP	20	20
Secuencia de Laminación		(Ti)(WR8)(Ti)(WR8)	(Ti)(MNi)(Ti)
Peso tela [gr]	Ti	249,6	247,81
	WR8	242,55	N/A
Tiempo gel [mm:ss]		7:55	8:10
Vacío aplicado [bar]		0,45	0,45
Tiempo infusión [mm:ss]		6:40	7:00
Tiempo de vacío [mm:ss]		20:00	27:00
Espesor promedio pieza [mm]		6,1	4,92
Peso final de la pieza [gr]		1327	968,06
Relación fibra-resina		37-63	28-72
Variable que cambia		Cantidad y tipo de tejido de refuerzo	Material de núcleo para procesos de infusión
Imágenes pieza fabricada			
Comentarios		- Se aplicó gel-coat sobre el molde con brocha. - Se prepararon 978 gr de resina. - Temp. ambiente: 26°C.	- Se aplicó gel-coat sobre el molde con atomizador. - Se usó material de núcleo para infusión (53 cms x 6 cms). - Se prepararon 800 gr de resina.

12.2.3 Conclusiones del proceso.

Según las piezas fabricadas se pueden establecer conclusiones sobre el sistema de moldeo cerrado CCBM, con el fin de establecer las fortalezas y debilidades de este sistema a la hora de seleccionarlo para un proceso productivo determinado. Las conclusiones del proceso son:

- Durante el proceso de infusión de la resina poliéster, el vacío al interior de la cavidad de los moldes genera una compresión ejercida por el contramolde de silicona sobre el tejido de refuerzo, esta afecta la velocidad de llenado del sistema debido a la restricción al flujo de la resina al interior de la cavidad. Para evitar que este fenómeno afecte el proceso se deben emplear tejidos de refuerzo para infusión. Adicionalmente es conveniente que durante el proceso de infusión se levante el punto del contramolde por donde ingresa la resina catalizada al sistema, esto disminuye la restricción que genera la silicona en la zona de ingreso de la resina acelerando el proceso de infusión.
- Durante la fabricación de la pieza, no es necesario mantener el vacío al interior de la cavidad generada por los moldes por mucho tiempo, solo se debe mantener hasta que la resina poliéster empleada haya gelado. El tiempo de mantenimiento de vacío es importante en sistemas de producción donde se fabriquen diferentes piezas por procesos de infusión y se cuenten con pocas fuentes para la generación de vacío.
- Los puentes de vacío son empleados para permitir el paso de este hacia la cavidad generada por los moldes. Para cualquier pieza se deben disponer puentes de vacío en cada esquina y en zonas con geometrías complejas, para promover la succión de la resina poliéster con el fin de impregnar la totalidad del tejido de refuerzo.

- Los puentes de vacío son fabricados en retales de Auromat, el ancho debe ser de 5 centímetros aproximadamente y el largo, lo suficiente para que la zona que está en contacto con el tejido de refuerzo tenga 2 centímetros de longitud. Si el tramo de Auromat no está apoyado correctamente sobre el tejido de refuerzo, este no permite el paso del vacío hacia la cavidad formada por los moldes, ocasionando una zona del tejido sin impregnar durante el proceso de fabricación.
- Si el marco del molde para producir el sello y cierre del sistema no tiene el área adecuada, es necesario emplear elementos mecánicos como prensas para permitir que se produzca el sello. Si estos elementos mecánicos ejercen una presión considerable sobre el marco, es probable que esta ocasione una disminución en el espesor del puente de vacío, lo que puede generar que el vacío no se transfiera al interior de la cavidad formada por los moldes, quedando atrapado sobre la cámara formada por los empaques. Para evitar este fenómeno se pueden disponer como puentes de vacío dos tramos de Auromat superpuestos, con el fin de garantizar un mayor espesor, pues al momento que se ejerza presión sobre el marco, estos se comprimen pero no lo suficiente para evitar el paso del vacío al interior de la cavidad.
- Es importante realizar una revisión al sistema con el fin de garantizar que la cámara que generan los moldes quede completamente hermética. Esta revisión se debe ejecutar aplicándole vacío y verificando que no se presenten entradas de aire por la membrana de silicona o por la manguera y acoples empleados para la alimentación de resina poliéster catalizada. Una entrada de aire al sistema por pequeña que sea genera aire atrapado en el laminado final de la pieza.
- La adición de materiales para la aceleración del proceso de polimerización de resina poliéster como la amina en sistemas de moldeo cerrado, debe realizarse de manera controlada, ya que puede incrementar la temperatura de exotermia de la

resina poliéster, poniendo en riesgo la integridad de los moldes y de la pieza fabricada.

- Cuando se fabrican piezas por sistemas de moldeo cerrado, es necesario preformar el tejido de refuerzo a la geometría del molde. Si el molde presenta aristas con pequeños radios y no se le aplica gel-coat para la fabricación de la pieza, es necesario aplicar masilla²⁷ para cubrir estas aristas, ya que el tejido de refuerzo no hace contacto con la arista del molde y la pieza fabricada en caso de no aplicarle masilla queda rica en resina sobre esta zona. En caso que al molde se le aplique gel-coat no es necesario aplicar la masilla sobre la arista, debido a que el tejido de refuerzo seco durante el proceso de preforma se adhiere al gel-coat aplicado sobre el molde haciendo un contacto adecuado con la arista del molde.

Ilustración 57 Aplicación masilla en moldeo CCBM



Eduardoño S.A.

- Para la fabricación del contramolde para la pieza prototipo, se aplicó cera calibrada sobre el molde con el fin de obtener un espesor final de pieza de 5 milímetros. En los ensayos realizados se obtuvieron espesores de 2.2 milímetros

²⁷ Masilla: material compuesto por gel-coat, fibra de vidrio picada y cargas. Es empleado para evitar que quede aire atrapado en el laminado ó zonas ricas en resina.

hasta de 6.1 milímetros, lo que indica que para este sistema de moldeo la separación entre moldes que se debe tener en cuenta durante la fabricación del contramolde no debe corresponder al espesor final de la pieza. En este sistema de moldeo el espesor final de la pieza depende de variables como el vacío aplicado y el tipo de tejido de la última capa del laminado que se encuentra en contacto con el contramolde, ya que si el tejido de la última capa es fibra de vidrio tejida, este no tiene la capacidad de retener excesos de resina poliéster durante el proceso de infusión, mientras que si la última capa es fibra de vidrio no tejida especial para proceso de infusión, esta retiene excesos de resina durante el proceso, produciendo una pieza de mayor espesor.

- Durante la acomodación del contramolde sobre el tejido de refuerzo seco en el proceso de fabricación de una pieza, se debe evitar que el contramolde no quede correctamente ajustado a las geometrías del molde o que presente arrugas en algunas zonas, debido a que estas irregularidades generan acumulaciones superficiales de resina poliéster en el laminado de la pieza.

- En sistemas de moldeo cerrado con contramolde flexible como el CCBM, se pueden obtener mejores relaciones fibra-resina en comparación con el sistema de moldeo abierto por contacto a mano. A pesar que la relación obtenida es mejor, es difícil controlarla como una variable del proceso, ya que depende de variables como el vacío aplicado al interior de la cavidad de los moldes, la ubicación y dimensión de los puentes de vacío, el tipo de tejido de la capa de laminado en contacto con el contramolde, el levantamiento de la zona del contramolde por donde ingresa la resina al sistema durante el proceso de infusión y las irregularidades sobre el contramolde generadas por una mala ubicación sobre el tejido de refuerzo durante el proceso de fabricación de una pieza.

12.2.4 Simulaciones realizadas del sistema de moldeo cerrado CCBM.

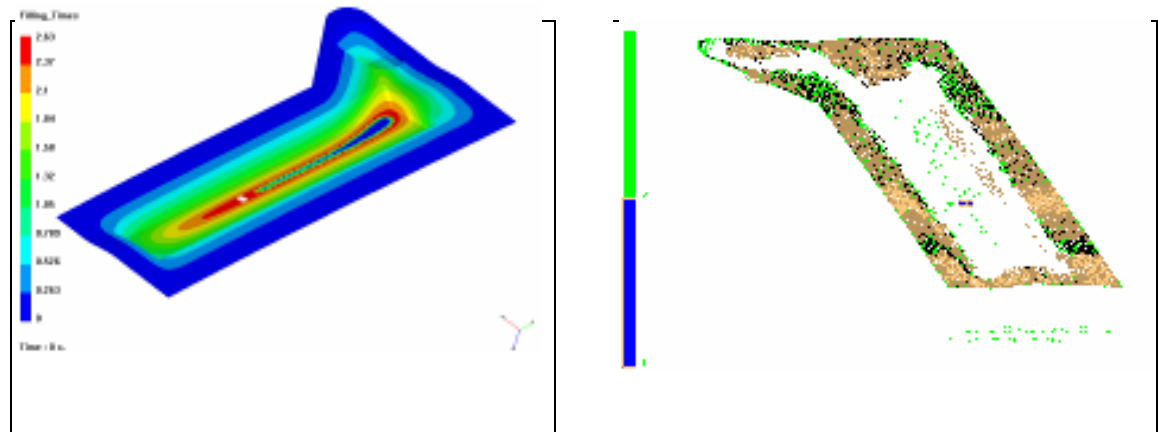
A partir de la geometría de la pieza a fabricar se pueden realizar simulaciones del sistema de moldeo cerrado, para la identificación de la ubicación adecuada del punto de aplicación de vacío al interior de la cavidad de los moldes y el punto por donde ingresa la resina al sistema, la simulación se realiza con un Software de elementos finitos. Los resultados obtenidos si las condiciones de frontera y la simulación se hace de manera adecuada, permiten tener herramientas de decisión para la ubicación de los puntos de aplicación de vacío e infusión de resina Durante el diseño y fabricación de los moldes. Este Software pueden ser empleado para simular diferentes sistemas de moldeo cerrado como el RTM, RTM-Light, CCBM, VARTM y autoclave.

Después de fabricar la pieza prototipo por el sistema de moldeo cerrado CCBM se identifica la configuración adecuada del sistema, de acuerdo a esta se realiza una simulación en el Software "Pam-RTM", este fue adquirido para un proyecto de investigación que se encuentra actualmente en curso y que es ejecutado por Andercol S.A. y el Instituto del plástico.

Los resultados obtenidos en la simulación se ajustan a los alcanzados durante la fabricación de la pieza prototipo por el sistema de moldeo cerrado CCBM.

- Sistema de transferencia de resina perimetral y aplicación de vacío central

Ilustración 58 Resultados simulación 1 moldeo CCBM con Sowtware Pam RTM

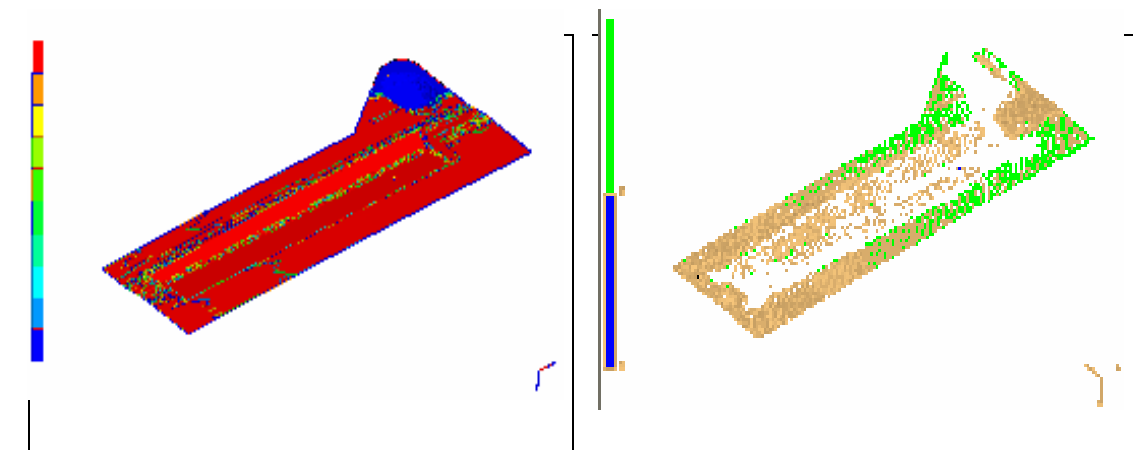


Instituto del Plástico.

En esta simulación el sistema de transferencia de resina es perimetral y sobre el centro de la pieza se aplica vacío. Se puede observar sobre el costado derecho del punto donde es aplicado el vacío, que el tejido de refuerzo no es impregnado por la resina poliéster, es decir no se logra extraer el aire en esta zona. Estos resultados indican que no es adecuado ubicar el punto de vacío sobre el centro de la pieza, es necesario desplazarlo hacia la derecha, con el fin de garantizar la correcta humectación del material de refuerzo. A pesar que esta simulación no se ajusta a la forma como se realiza el proceso en el sistema de moldeo cerrado CCBM, los resultados obtenidos son concluyentes pues se ajustan a la ubicación del punto de infusión de resina adecuado en el sistema de moldeo CCBM después de la fabricación de las piezas prototipo.

- Sistema de transferencia de resina por puerto discreto y vacío aplicado en la zona donde se ubicaban los puentes para la fabricación de la pieza prototipo por el sistema de moldeo cerrado CCBM

Ilustración 59 Resultados simulación 2 moldeo CCBM con Software Pam RTM



Instituto del Plástico.

En esta simulación se representa de manera aproximada la configuración óptima establecida para la fabricación de la pieza prototipo por el sistema de moldeo cerrado CCBM. En esta la resina poliéster ingresa al sistema por un punto ubicado sobre el costado derecho de la pieza y el vacío es aplicado sobre el perímetro en los puntos donde se ubicaron los puentes de vacío. A pesar que los resultados obtenidos no se ajustan a la realidad debido a que las piezas fabricadas bajo esta configuración no presentaban zonas de tejido de refuerzo sin impregnar, es importante destacar que la zona que presentó dificultades en las primeras piezas prototipo fabricadas por el sistema de moldeo cerrado CCBM, es la misma que no alcanza a ser llenada por la resina según la simulación realizada.

12.3 PIEZAS FABRICADAS POR EL SISTEMA DE MOLDEO CERRADO VARTM

Después de fabricar las piezas por el sistema de moldeo cerrado CCBM y habiendo identificado la configuración adecuada de las variables que influyen en el proceso se fabrican dos piezas por el sistema de moldeo cerrado con contramolde flexible desechable (VARTM). El vacío aplicado para la fabricación de las piezas por el sistema de moldeo cerrado VARTM es el que se establece como el óptimo para la fabricación de la pieza prototipo por el sistema de moldeo cerrado CCBM.

La fabricación de la pieza prototipo por el sistema de moldeo cerrado VARTM permite obtener juicios para realizar comparaciones con sistemas de moldeo cerrado como el CCBM y sistemas de moldeo abierto tradicional, como el moldeo por contacto a mano.

12.3.1 Descripción del procedimiento.

El proceso para la fabricación de las piezas por el sistema de moldeo cerrado VARTM se debe ejecutar como se describió anteriormente.

Para la fabricación de las piezas por este sistema no se realizan cambios sobre las variables que influyen en el proceso. Los valores de las variables del proceso son establecidos según la configuración adecuada para la fabricación de la pieza prototipo por el sistema de moldeo cerrado CCBM.

12.3.2 Resultados obtenidos.

Después de fabricar las piezas por los sistemas de moldeo cerrado VARTM, se registran los resultados obtenidos y las variables que influyen en el proceso.

Tabla 13 Resultados pieza prototipo fabricada por VARTM

		1	2
% Catalización		1.50%	1.50%
Relación mezcla	MEK	80	80
Catalizador	AAP	20	20
Secuencia de Laminación		(Ti)	(Ti)
Peso tela para infusión [gr]		122.5	124
Tiempo gel [mm:ss]		6:50	6:35
Vacío aplicado [bar]		0.45	0.25
Tiempo infusión [mm:ss]		00:50	01:10
Tiempo de vacío [mm:ss]		8:00	8:15
Espesor promedio pieza [mm]		4.63	4.65
Peso final de la pieza [gr]		660.83	684.34
Relación fibra-resina		18.5-81.5	18.2-81.8
Imágenes pieza fabricada			
Comentarios		- Se aplicó gel-coat sobre el molde con atomizador. - Temp. ambiente: 24.5°C.	- Se aplicó gel-coat sobre el molde con atomizador. - Temp. ambiente: 26°C.

12.3.3 Conclusiones del proceso.

Después de la fabricación de dos piezas por el sistema de moldeo cerrado VARTM, se pueden realizar conclusiones de este proceso:

- Es necesario que la membrana de nylon empleada como contramolde en el sistema de moldeo cerrado VARTM, se ajuste correctamente a la geometría del molde y al tejido de refuerzo seco preformado. Si quedan zonas de la membrana que no hacen contacto directo con el tejido de refuerzo, allí se generan cámaras donde se acumula resina poliéster catalizada durante el proceso de infusión.
- Cuando se genera el vacío en el sistema para el proceso de infusión, la compresión sobre el tejido de refuerzo seco que aplica la membrana de nylon es menor que la que aplica la membrana de silicona en el sistema de moldeo cerrado CCBM, por este motivo la velocidad de infusión para el mismo valor de vacío por este sistema de moldeo es mayor.
- El vacío aplicado en el sistema de moldeo cerrado VARTM no puede permanecer constante en el tiempo. Una vez el tejido de refuerzo es impregnado en su totalidad el vacío debe disminuir, ya que si se mantiene en el valor inicial la resina poliéster fluye hacia el punto donde se aplica el vacío, lo que genera que las primeras zonas del material de refuerzo que fueron impregnadas no queden correctamente humectadas y la zona cercana a la aplicación de vacío presente acumulación de resina.
- El tiempo de puesta a punto del sistema de moldeo cerrado VARTM para la fabricación de una pieza, es mucho más alto que el sistema de moldeo cerrado CCBM, adicionalmente los elementos empleados para la operación del proceso como la membrana en nylon, acoples plásticos y manguera en espiral, se deben desechar después de la fabricación de una pieza.

- Para la fabricación de una pieza por el sistema de moldeo cerrado VARTM, el operador del proceso es el encargado de realizar el sello del sistema aplicando una cinta doble faz sobre el molde y pegando a esta la membrana en nylon. Debido a esta dependencia en el operador es difícil garantizar el correcto sello del sistema. Para evitar este problema se debe revisar la zona del sello con un detector de fugas por ultrasonido.

12.4 PIEZA FABRICADA POR EL SISTEMA DE MOLDEO ABIERTO POR CONTACTO A MANO.

Debido que el sistema de moldeo empleado en la fabrica de botes de Eduardoño S.A. es el sistema de moldeo abierto por contacto a mano, se cuenta con información real acerca de los consumos de materia prima y mano de obra para la fabricación de la pieza prototipo. Esta información permite realizar una comparación entre los diferentes sistemas de moldeo que son objeto de estudio, con el fin de establecer cual es el adecuado para el proceso productivo.

12.4.1 Resultados obtenidos.

Se realizó el registro de una pieza prototipo que se fabricó por el sistema de moldeo por contacto a mano en la fabrica de botes de Eduardoño S.A.. Esta pieza fue fabricada según las especificaciones que define el departamento de Ingeniería. A continuación se registran los resultados obtenidos.

Tabla 14 Resultados pieza prototipo fabricada por moldeo por contacto a mano

		1
% Catalización		1.00%
Relación mezcla	MEK	100
Catalizador	AAP	0
Secuencia de Laminación		(M4)(R6)(M4)(R6)(M4)
Peso de la tela [gr]	M4 ²⁸	276
	R6 ²⁹	220
Tiempo gel [mm:ss]		32:00
Espesor promedio pieza [mm]		4.3
Peso final de la pieza [gr]		1328.61
Relación fibra-resina		38-62
Imágenes pieza fabricada		
Comentarios		- Se aplico gel-coat sobre el molde con atomizador. - Temp. ambiente: 26°C.

²⁸ M4: Abreviación de fibra de vidrio no tejida (Mat 450)

²⁹ R6: Abreviación de fibra de vidrio tejida (Woven Roving 600).

13 ANALISIS DE COSTOS

Para establecer la viabilidad de la transformación tecnológica para cambiar sistemas de moldeo tradicionales como el moldeo por contacto a mano, a sistemas de moldeo cerrado tecnificados como el CCBM y el VARTM, es necesario realizar un análisis de costos de cada método, con el fin de establecer el costo por pieza fabricada, inversión requerida y costo de los elementos que se requieren para la operación del proceso. Estos costos permiten establecer de acuerdo al nivel de producción y a la capacidad financiera, que método es el adecuado para un proceso productivo determinado.

El análisis de costos se realiza de manera individual para cada método, este se calcula a partir de los consumos de materia prima y mano de obra para la fabricación de la pieza prototipo por los diferentes métodos que son objeto de análisis.

13.1 SISTEMA DE MOLDEO CERRADO CCBM.

Para el sistema de moldeo cerrado CCBM se establecen los costos de los elementos requeridos para la fabricación de la pieza prototipo como contramolde y marco para sello, el costo de la adecuación del molde, el costo de la pieza prototipo fabricada y la inversión requerida adicionalmente se establecen relaciones para calcular el costo de manera general de cualquier pieza por el sistema de moldeo cerrado CCBM, estas relaciones quedan en función de la geometría de la pieza a fabricar y del molde.

13.1.1 Costo de la adecuación de la pestaña del molde.

A pesar que para la implementación del sistema de moldeo cerrado CCBM para la fabricación de la pieza prototipo, no fue necesario adecuar la pestaña del molde, se realizó el análisis del costo de la adecuación de la pestaña con el fin de incluirlo como un costo en el que se incurre para la implementación de este sistema de moldeo como alternativa para realizar una transformación tecnológica en la fabrica de botes de Eduardoño S:A:.

A continuación se establece el costo de la adecuación de la pestaña del molde, según el consumo calculado de materias primas y mano de obra requeridas.

Tabla 15 Costos para la adecuación de la pestaña del molde de la pieza prototipo para moldeo CCBM

MATERIAL	COSTO UNITARIO	UNIDAD DE MEDIDA.	CANTIDAD EMPLEADA	COSTO TOTAL
Triplex 19 mm	\$ 31200,0	M^2	0,800	\$ 24960,0
Masilla	\$ 2906,0	Kg	2,000	\$ 5812,0
Mat 450	\$ 4100,0	Kg	2,650	\$ 10865,0
Woven Roving 600	\$ 3605,0	Kg	2,350	\$ 8471,750
Resina poliester	\$ 4673,0	Kg	7,650	\$ 35748,450
Tooling gel-coat	\$ 25075,0	Kg	1,500	\$ 37612,50
MOD aplicación gel-coat	\$ 7378,0	HH	0,500	\$ 3689,0
MOD corte tela	\$ 6062,0	HH	0,250	\$ 1515,50
MOD moldes	\$ 8419,0	HH	10,000	\$ 84190,0
MOD carpinteria	\$ 6396,0	HH	8,000	\$ 51168,0
CIF	\$ 3714,0	UN	18,750	\$ 69637,50
				TOTAL \$ 333669,70

Los costos unitarios son suministrados por Eduardoño S.A.

13.1.2 Costo del contramolde.

Del contramolde fabricado para la implementación del sistema de moldeo cerrado CCBM para la fabricación de la pieza prototipo, se toman consumos reales de

materia prima y mano de obra, con el fin de establecer el costo real del contramolde fabricado.

Tabla 16 Costos del contramolde de la pieza prototipo por moldeo CCBM

MATERIAL	COSTO UNITARIO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD EMPLEADA	COSTO TOTAL
Silicona RTV 7888-20	\$ 40521,0	Kg	0,9	\$ 34442,850
Catalizador Beta 167R	\$ 63750,0	Kg	0,1	\$ 5418,750
Tejido Poliéster	\$ 4000,0	MT	1,0	\$ 4000,0
Manguera plástica Transparente 3/8"	\$ 1000,0	MT	2,5	\$ 2500,0
Acople manguera	\$ 3000,0	UN	1,0	\$ 3000,0
Cera calibrada 12" x 24" x 1.5mm ó 1 mm.	\$ 4100,0	UN	4,0	\$ 16400,0
Plastilina	\$ 2000,0	UN	1,0	\$ 2000,0
MOD aplicación de cera y plastilina	\$ 8419,0	HH	9,0	\$ 75771,0
MOD aplicación silicona	\$ 8419,0	HH	7,0	\$ 58933,0
MOD pegada manguera	\$ 8419,0	HH	2,0	\$ 16838,0
CIF	\$ 3714,0	UN	18,0	\$ 66852,0
			TOTAL	\$ 286155,60

13.1.3 Costo marco para sello.

Los costos del marco para el sello de la pieza prototipo se relacionan a continuación.

Tabla 17 Costo marco para sello de la pieza prototipo en moldeo CCBM

MATERIAL	COSTO UNITARIO	U.de M.	CANTIDAD EMPLEADA	COSTO TOTAL
Resina poliester	\$ 4673,0	Kg	5,6	\$ 26168,80
Mat 450	\$ 4100,0	Kg	1,6	\$ 6355,0
Woven Roving 600	\$ 3605,0	Kg	0,8	\$ 2992,150
Material de nucleo	\$ 11400,0	M^2	0,7	\$ 7866,0
Masilla	\$ 2906,0	Kg	1,2	\$ 3341,90
Marco en madera	\$ 68500,0	UN	0,4	\$ 27400,0
Empaque para moldes CCBM	\$ 3060,0	MT	4,2	\$ 12852,0
Acople	\$ 5000,0	UN	1,0	\$ 5000,0
Manguera plástica Transparente 3/8"	\$ 1000,0	Kg	2,0	\$ 2000,0
Sellante para pega de empaques y acople	\$ 19672,0	UN	0,5	\$ 9836,0
MOD corte tela	\$ 6062,0	HH	0,3	\$ 2020,667
MOD laminación marco	\$ 5301,0	HH	2,0	\$ 10602,0
MOD fabricación marco madera	\$ 6396,0	HH	5,0	\$ 31980,0
MOD pegada marco de madera	\$ 5301,0	HH	1,5	\$ 7951,50
MOD terminaciones marco	\$ 7296,0	HH	0,5	\$ 3648,0
MOD pegada empaque para sello	\$ 6476,0	HH	2,0	\$ 12952,0
MOD pegada acople	\$ 6476,0	HH	1,0	\$ 6476,0
CIF	\$ 3714,0	UN	12,3	\$ 45806,0
				\$
				TOTAL 179442,017

13.1.4 Inversión requerida.

Para la implementación del sistema de moldeo cerrado CCBM en la fabrica de botes de Eduardoño S.A., se requiere adaptar un punto de alimentación de aire a presión para la generación de vacío con el uso de un venturí. Los equipos relacionados son importados y diseñados para sistemas de moldeo cerrado por infusión de resina poliéster para la fabricación de piezas en materiales compuestos. A continuación se relacionan los costos de las inversiones requeridas.

Tabla 18 Inversión requerida para la implementación del moldeo CCBM

MATERIAL	COSTO UNITARIO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD EMPLEADA	COSTO TOTAL
Vacuómetro	\$ 174800,0	UN	1,0	\$ 174800,0
Venturi Airtech	\$ 319200,0	UN	1,0	\$ 319200,0
TOTAL				\$ 494000,0

13.1.5 Costo por pieza fabricada.

Después de fabricar las piezas prototipo por el sistema de moldeo cerrado CCBM, se puede establecer el costo de cada pieza, según los consumos de materia prima y mano de obra. Para efecto de análisis con el fin de realizar una comparación de costos con los demás sistemas de moldeo que son objeto de estudio, se calcula el costo de fabricar una pieza por el sistema de moldeo cerrado CCBM que cumpla con las especificaciones de tipo de tejido de refuerzo y cantidad que establece el área de Ingeniería de la fabrica de botes de Eduardoño S.A.. A continuación se relacionan los costos de la pieza fabricada.

Tabla 19 Costo de pieza prototipo fabricada por moldeo CCBM

MATERIAL	COSTO UNITARIO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD EMPLEADA	COSTO TOTAL
Gel-coat blanco	\$ 10850,0	Kg	0,4	\$ 4340,0
Manta moldeable OC	\$ 19000,0	Kg	0,2	\$ 4446,0
Woven Roving 600	\$ 3605,0	Kg	0,2	\$ 757,050
Resina cristalán 812-LRTM	\$ 7000,0	Kg	0,8	\$ 5457,90
MOD corte tela	\$ 6062,0	HH	0,1	\$ 606,20
MOD aplicación gel-coat	\$ 7378,0	HH	0,2	\$ 1229,667
MOD fabricación pieza	\$ 5301,0	HH	1,0	\$ 5301,0
MOD terminaciones	\$ 7296,0	HH	0,2	\$ 1459,20
CIF	\$ 3714,0	UN	1,5	\$ 5447,20
TOTAL				\$ 29044,217

13.2 SISTEMA DE MOLDEO CERRADO VARTM.

En el sistema de moldeo cerrado VARTM, no se requiere de la fabricación de elementos para la operación del proceso. En este sistema los accesorios empleados para la fabricación de una pieza como membrana de nylon, acoples, cinta doble faz y manguera en espiral, solo son usados para la fabricación de una pieza, es decir no son reutilizables. Por tal motivo en el costo de fabricación de una pieza por este sistema de moldeo se debe incluir el costo de todos estos materiales. Debido a esto, los costos que son calculados solo son el costo de la pieza y el costo de la inversión requerida.

13.2.1 Inversión requerida.

Para la implementación del sistema de moldeo cerrado VARTM en la fabrica de botes de Eduardoño S.A., se requiere adaptar un punto de suministro de aire a presión con el fin de convertirlo a fuente de vacío. Adicionalmente se requiere un equipo para detectar entradas de aire a la cámara formada por los moldes antes de realizar el proceso de infusión de resina poliéster, con el fin de evitar que se fabriquen piezas defectuosas. A continuación se relacionan los costos de las inversiones requeridas para la implementación del sistema de moldeo cerrado VARTM.

Tabla 20 Inversión requerida para la implementación del moldeo VARTM

MATERIAL	COSTO UNITARIO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD EMPLEADA	COSTO TOTAL
Vacuómetro	\$ 174800,0	UN	1,000	\$ 174800,0
Venturi Airtech	\$ 319200,0	UN	1,000	\$ 319200,0
Detector de fugas por ultrasonido	\$ 2033000,0	UN	1,000	\$ 2033000,0
TOTAL				\$ 2527000,0

13.2.2 Costo por pieza fabricada.

Después de fabricar dos piezas prototipo por el sistema de moldeo cerrado VARTM, se establecen los costos para la fabricación de la pieza según los consumos reales de materia prima, mano de obra y elementos para la fabricación del contramolde y sello del sistema. A continuación se relacionan los costos para la fabricación de la pieza.

Tabla 21 Costo de pieza prototipo fabricada por moldeo VARTM

MATERIAL	COSTO UNITARIO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD EMPLEADA	COSTO TOTAL
Gel-coat blanco	\$ 10850,0	Kg	0,400	\$ 4340,0
Manta moldeable OC	\$ 19000,0	Kg	0,234	\$ 4446,0
Woven Roving 600	\$ 3605,0	Kg	0,210	\$ 757,050
Resina cristalán 812-LRTM	\$ 7000,0	Kg	0,780	\$ 5460,0
Membrana de nylon	\$ 5761,290	MT	1,000	\$ 5761,290
Cinta doble faz paquete x 10 rollos	\$ 1159,740	MT	3,000	\$ 3479,221
Acople plastico en "T"	\$ 2000,0	UN	1,000	\$ 2000,0
Mangera en espiral	\$ 1100,0	MT	2,200	\$ 2420,0
MOD corte tela	\$ 6062,0	HH	0,100	\$ 606,20
MOD aplicación gel-coat	\$ 7378,0	HH	0,167	\$ 1232,126
MOD fabricación pieza	\$ 5301,0	HH	1,500	\$ 7951,50
MOD terminaciones	\$ 7296,0	HH	0,500	\$ 3648,0
CIF	\$ 3714,0	UN	2,267	\$ 13437,826
TOTAL				\$ 55539,213

13.3 SISTEMA DE MOLDEO POR CONTACTO A MANO.

Debido a que el sistema de moldeo que se emplea actualmente en el proceso productivo de la fabrica de botes de Eduardoño S.A., es el sistema de moldeo por contacto a mano, solo es necesario calcular el costo de una pieza prototipo fabricada por este sistema, con el fin de compararlo con los costos de fabricación de una pieza prototipo por los sistemas de moldeo cerrado que son objeto de estudio.

13.3.1 Costo por pieza fabricada.

A continuación se relacionan los costos de una pieza prototipo fabricada por el sistema de moldeo abierto por contacto a mano.

Tabla 22 Costo de pieza prototipo fabricada por moldeo por contacto a mano

MATERIAL	COSTO UNITARIO	UNIDAD DE MEDIDA.	CANTIDAD EMPLEADA	COSTO TOTAL
Gel-coat blanco	\$ 10850,0	Kg	0,400	\$ 4340,0
Mat 450	\$ 4100,0	Kg	0,585	\$ 2398,50
Woven Roving 600	\$ 3605,0	Kg	0,460	\$ 1658,30
Masilla de relleno	\$ 9109,0	Kg	0,100	\$ 910,90
Resina poliester	\$ 4673,0	Kg	1,625	\$ 7593,625
MOD corte tela	\$ 6062,0	HH	0,100	\$ 606,20
MOD aplicación gel-coat	\$ 7378,0	HH	0,167	\$ 1229,667
MOD fabricación pieza	\$ 5301,0	HH	1,800	\$ 9541,80
MOD terminaciones	\$ 7296,0	HH	0,200	\$ 1459,20
CIF	\$ 3714,0	UN	2,267	\$ 8418,40
				TOTAL \$ 38156,592

Eduardoño S.A.

13.4 COMPARACIÓN DE COSTOS PARA FABRICACIÓN DE PIEZA PROTOTIPO

Una vez establecido el costo de la fabricación de una pieza prototipo por los diferentes sistemas de moldeo que son objeto de estudio. Se debe realizar un análisis comparativo, con el fin de establecer cual es el sistema de moldeo adecuado en función de la cantidad de piezas fabricadas.

Para realizar este análisis se parte de la base que se cuenta con un molde para la fabricación de la pieza por el sistema de moldeo por contacto a mano. Para la implementación del sistema de moldeo cerrado CCBM, al costo por pieza fabricada es necesario diferir un porcentaje del costo de la adecuación de la

pestaña del molde y de los elementos que se deben fabricar como el marco para el sello y el contramolde, en el número de piezas fabricadas.

En los sistemas de moldeo por contacto a mano y el VARTM, como costo por pieza fabricada se toma el que fue calculado previamente, no se considera una disminución en el costo por el aumento en las piezas fabricadas, debido a que se considera que los consumos de materia prima y mano de obra permanecen constantes, adicionalmente en estos sistemas no hay costos a diferir en las unidades producidas.

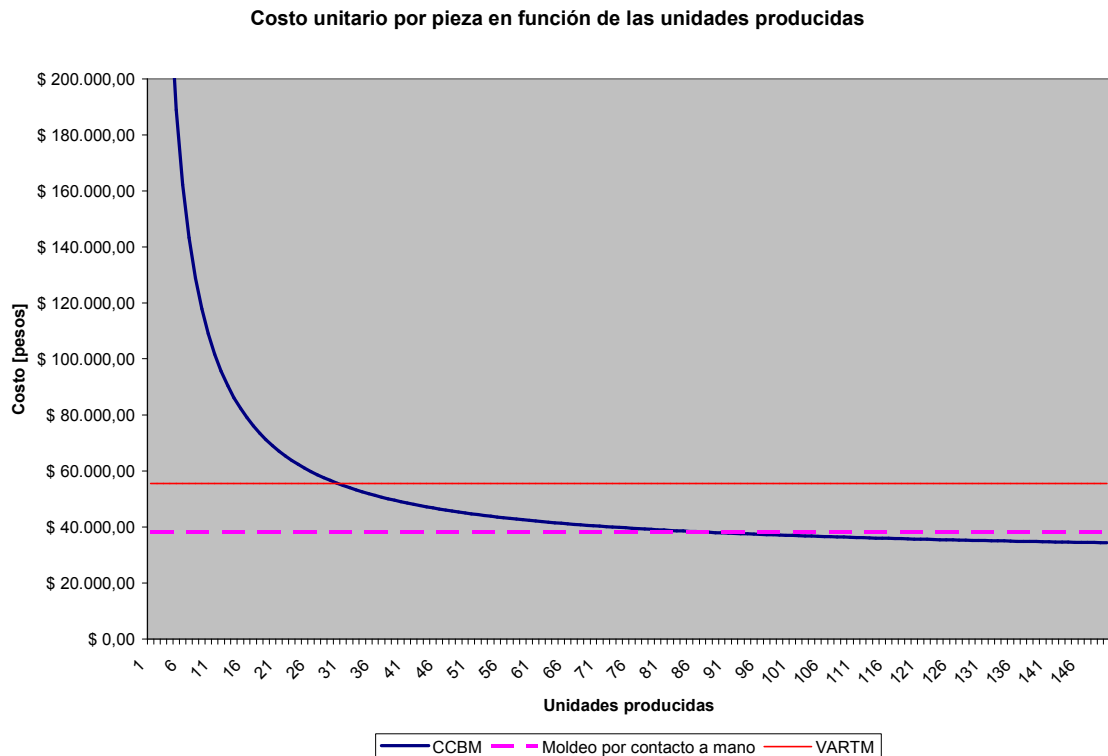
Las inversiones que se establecieron en los sistemas de moldeo que son objeto de estudio, no se incluyen en el costo de la pieza fabricada para realizar el análisis comparativo, pues esta inversión se da debido a la necesidad de producir una fuente de generación de vacío, que puede ser empleada para la fabricación de diversas piezas por sistemas de moldeo cerrado por infusión de resina poliéster.

A continuación se resume en una tabla y se ilustra en una grafica el costo unitario de fabricar una pieza prototipo en función de la totalidad de las piezas fabricadas, por los sistemas de moldeo que son objeto de estudio.

Tabla 23 Costo unitario de pieza prototipo en función de las unidades producidas.

Unidades producidas	Costo unitario de una pieza prototipo en función de la cantidad de piezas fabricadas		
	CCBM	Moldeo por contacto a mano	VARTM
1	\$ 828.311,53	\$ 38.156,59	\$ 55.539,21
30	\$ 55.686,46	\$ 38.156,59	\$ 55.539,21
31	\$ 54.827,03	\$ 38.156,59	\$ 55.539,21
87	\$ 38.231,20	\$ 38.156,59	\$ 55.539,21
88	\$ 38.126,80	\$ 38.156,59	\$ 55.539,21

Ilustración 60 Costo unitario de pieza prototipo en función de las unidades producidas



Según la grafica se observa que el costo por pieza fabricada en el sistema de moldeo cerrado VARTM, siempre es mayor al costo de fabricación de una pieza por el sistema de moldeo por contacto a mano, debido a esto este sistema no es una buena alternativa para cambiar un proceso productivo donde se emplee el sistema de moldeo por contacto a mano. Para el sistema de moldeo cerrado CCBM es necesario fabricar más de 87 unidades de la pieza prototipo para que este sistema sea una alternativa viable para el cambio del sistema de moldeo abierto por contacto a mano.

Si la comparación se realiza entre los sistemas de moldeo cerrado que son objeto de estudio, para fabricar más de 30 piezas prototipo por un sistema de moldeo cerrado es recomendable emplear el CCBM, en caso que el número de piezas a fabricar sea inferior se debe emplear el VARTM.

13.5 RELACIONES PARA ESTABLECER LOS COSTOS SEGÚN LA GEOMETRÍA DE LA PIEZA A FABRICAR.

El análisis de costos se realizó para la pieza prototipo seleccionada. Para la implementación de alguno de los sistemas de moldeo cerrado que son objeto de estudio como alternativa para la sustitución del sistema de moldeo abierto por contacto a mano para la fabricación de una pieza diferente, se deben establecer relaciones que permitan calcular los costos de los diferentes sistemas de moldeo en función de la geometría de la pieza y las especificaciones del laminado.

Estas relaciones se establecen a partir de los costos actuales de las materias primas y mano de obra que son empleadas en los diferentes sistemas de moldeo que son objeto de estudio y fueron referenciadas previamente.

13.5.1 Sistema de moldeo cerrado CCBM.

A continuación se establecen las relaciones para determinar los costos de los elementos que se requieren para la operación de este sistema de moldeo y para el costo de la pieza en función de su geometría y las especificaciones del laminado.

- Costo de la adecuación de la pestaña del molde:

Ecuación 2 Relación para el calculo del costo de la adecuación de la pestaña en el moldeo CCBM

$$\text{Costo_pestaña}(\$) = 145073 * (\text{Perímetro_pieza})$$

Donde Perímetro_pieza [mt].

- Costo contramolde:

Ecuación 3 Relación para el calculo del costo del contramolde en el moldeo CCBM

$$Contramolde(\$) = (628320.74 * A_1) + (12815 * A_2) * \left(\frac{Espesor_pieza}{Espesor_cera_calibrada} \right) + 24338$$

Donde A_1 : Área superficial del contramolde [M^2]
 A_2 : Área superficial de la pieza a fabricar [M^2]
Espesor_pieza [mm]
Espesor_cera_calibrada [mm]

- Costo marco para sello:

Ecuación 4 Relación para el calculo del costo del marco para el sello del sistema en el moldeo CCBM

$$Marco(\$) = 73028.7 * (Perimetro_pieza) + 11476$$

Donde *Perímetro_pieza* [mt].

- Costo por pieza fabricada:

Ecuación 5 Relación para el calculo del costo por pieza fabricada en el moldeo CCBM

$$Pieza(\$) = A * [86079.14 + n(Ti) * (28080) + n(WR) * (7045.5)]$$

Donde A : Área superficial de la pieza a fabricar.
 $n(Ti)$: Número de capas de tejido de refuerzo para proceso de infusión.
 $n(WR)$: Numero de capas de Woven Roving 600.

13.5.2 Sistema de moldeo cerrado VARTM.

A continuación se establecen las relaciones para determinar el costo de la pieza a fabricar por el sistema de moldeo cerrado VARTM.

- Costo por pieza fabricada:

Ecuación 6 Relación para el calculo del costo por pieza fabricada en el moldeo VARTM

$$Pieza(\$) = 2000 + A * [222150.795 + n(Ti) * (28080) + n(WR) * (7045.5)]$$

Donde A: Área superficial de la pieza a fabricar.
 n(Ti): Número de capas de tejido de refuerzo para proceso de infusión.
 n(WR): Numero de capas de Woven Roving 600.

13.5.3 Sistema de moldeo abierto por contacto a mano.

A continuación se establecen las relaciones para determinar el costo de la pieza a fabricar por el sistema de moldeo abierto por contacto a mano.

- Costo por pieza fabricada:

Ecuación 7 Relación para el calculo del costo por pieza fabricada en el moldeo por contacto a mano

$$Pieza(\$) = A * [88469.1 + n(M4) * (6157.468) + n(WR) * (5049.58)]$$

Donde A: Área superficial de la pieza a fabricar.
 n(M4): Número de capas de fibra de vidrio no tejida (Mat 450)
 n(WR): Numero de capas de Woven Roving 600.

14 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de implementar el sistema de moldeo cerrado CCBM para la fabricación de la pieza prototipo y habiéndolo comparado con sistemas de moldeo tradicionales como el moldeo abierto por contacto a mano y el moldeo cerrado VARTM, se establece de acuerdo a las necesidades de la fabrica de botes de Eduardoño S.A., cual es el más adecuado teniendo en cuenta factores como capacidad instalada, inversión requerida, cantidad de piezas que se fabrican de cada modelo y recurso humano disponible.

Debido a que actualmente en Colombia no existe una regulación que controle las emisiones que se generan en los procesos de transformación del plástico reforzado, las diferentes empresas de este sector pueden emplear sistemas de moldeo abierto en sus procesos productivos según sus necesidades. Los sistemas de moldeo cerrado como el RTM, el RTM-Light y el CCBM, son viables para empresas que fabriquen productos de plástico reforzado en serie. Para producción de pocas unidades lo recomendable es emplear sistemas de moldeo abierto tradicionales como el moldeo por contacto a mano. Para el caso particular de la fabrica de botes de Eduardoño S.A., el sistema de moldeo cerrado CCBM puede ser empleado para la fabricación de piezas de alta rotación, como las que se requieren para la fabricación de la moto de agua referencia XL-700B. También puede ser empleado para la fabricación de piezas como tapas para repisas³⁰ y consolas empleadas en los botes de portafolio.

En caso que comiencen las autoridades ambientales a regular las emisiones generadas en el proceso de transformación del plástico reforzado, se recomienda

³⁰ Compartimiento ubicado en la proa del bote.

que para la fabricación de pocas unidades de una pieza se debe emplear sistemas de moldeo cerrado que no requieran grandes inversiones y costos de adecuación como el VARTM. Para procesos productivos donde se fabriquen piezas en serie y que haya restricciones de espacio se recomienda que se emplee el sistema de moldeo cerrado CCBM, debido a que los contramoldes de cada pieza son fabricados en silicona y no se requiere de gran espacio para ser almacenados.

El proyecto ha sido desarrollado con el fin de tener un adecuado entendimiento del sistema de moldeo cerrado CCBM y de las variables que sobre él influyen, para analizar la viabilidad de aplicarlo para la fabricación de piezas en la fabrica de botes de Eduardoño S.A. Es importante darle continuidad a este proyecto, implementando este sistema de moldeo para la fabricación de piezas de mayor tamaño que la pieza prototipo, como el casco de un bote. Esto garantizaría establecer las limitaciones que pueda llegar a tener el sistema de moldeo CCBM debido al tamaño de la pieza fabricada.

Como la tendencia a nivel mundial es regular las emisiones generadas por las industrias, en un futuro no muy lejano en Colombia se comenzará a regular las diferentes fuentes generadoras de emisiones. Para la fabrica de botes de Eduardoño S.A. es importante adelantarse a este fenómeno buscando nuevas tecnologías que le permitan fabricar productos de calidad y cumplan con las regulaciones establecidas.

15 BIBLIOGRAFIA

15.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS TOMADAS DE LIBROS

BJOORKSTEN, J. Poliéster and their aplications. Reinhold Publishing, Co., New York, 1976.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS T CERTIFICACIÓN. Documentación presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. 5 Edición, Bogotá.

Memorias Seminario. MOLDEO CERRADO: DISEÑO DE MOLDES Y TECNICAS DE FABRICACIÓN DE PRODUCTOS. Andercol. Bogota, Colombia. Agosto 23 y 24 de 2005.

MODERN PLASTIC ENCYCLOPEDIA . Mac Graw Hill. Vol. 56, number 10A. New York 1979.

ORREGO BUSTAMANTE, Nicolas Ramiro. VELEZ URIBE, Rafale Ignacio. El poliéster insaturado reforzado con fibra de vidrio y no reforzado. Andercol S.A., Medellín.

PARRILLA, F. Resinas poliéster, plásticos reforzados. Editorial La ilustración. Villa Azcapotzalco, Mexico 1993.

PROFESIONAL BOAT BUILDER. Infusion. Revista número 32, pag 28-34.

QUINN, J. A. Composites- Design Manual U.S. Edition. James Quinn Associates Ltd. Liverpool

RUTZ, CT. Cook Composites and Polymers (CCP). Lesson learned while designing low-volume closed-mold processes to replace open mold lamination. Kansas City.

15.2 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS DIGITALES

@ale

Contiene información, acerca de procesos de transformación de materiales compuestos. Disponible en:

<http://www.ale.nl/ale/index.php?cid=75>

@DanKimmel

Contiene articulos y foros sobre temas como pesca y construcción naval. Disponible en:

<http://hometown.aol.com/djkimmel/fishing/buildboat3.htm>

@Encarta

Plasticos. Ultima actualización 2002. Disponible en:

http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_761553604/Pl%C3%A1sticos.html

@jjmechanic

Contiene información, acerca de procesos de transformación de materiales compuestos. Disponible en:

http://www.jjmechanic.com/process/v_bag.htm

@netcomposites

Contiene información, acerca de procesos de transformación de materiales compuestos. Disponible en:

<http://www.netcomposites.com/education.asp?sequence=81>

@owenscorning

Contiene información, acerca de procesos de transformación de materiales compuestos. Disponible en:

http://www.owenscorning.com.br/processos_e.asp

@plastech

Contiene información, acerca de procesos de transformación de materiales compuestos. Disponible en:

<http://www.plastech.co.uk/Mtrtm.html>

@.tifac

Contiene información, acerca de procesos de transformación de materiales compuestos. Disponible en:

<http://www.tifac.org.in/news>

@ turkcadcam

Contiene información, acerca de procesos de transformación de materiales compuestos. Disponible en:

<http://www.turkcadcam.net/rapor/kompozit-malzemeler/spray-up.jpg>

@woodweb

Contiene información acerca de los diferentes equipos y presiones requeridas para el moldeo por bolsa de vacío. Disponible en:

http://www.woodweb.com/knowledge_base/Vacuum_application_FAQ.html