

# EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN EL PROCESO DE PLASTINACIÓN

LUZ YANETH CANO ALVAREZ  
JUAN CAMILO LONDOÑO SANCHEZ

MEDELLIN  
UNIVERSIDAD EAFIT  
FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS  
2008

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN EL PROCESO DE  
PLASTINACIÓN

LUZ YANETH CANO ALVAREZ  
JUAN CAMILO LONDOÑO SANCHEZ

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OPTAR AL TITULO DE INGENIEROS DE PROCESOS

ASESOR: DR. RICARDO JIMENEZ MEJIA

MEDELLIN  
UNIVERSIDAD EAFIT  
FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS

2008

2

NOTA DE ACEPTACION

---

---

---

PRESIDENTE DEL JURADO

---

JURADO

---

JURADO

---

MEDELLIN, 9 DE OCTUBRE DE 2008

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen al Dr. Ricardo Jiménez Mejía, por su valiosa orientación para el desarrollo de este proyecto; a la Dra. María Cristina Sánchez, por su ayuda y consejo; al personal de los laboratorios de ingeniería de procesos y de materiales de la Universidad Eafit, por facilitarnos las condiciones necesarias para la elaboración de este proyecto.

También una mención especial a nuestras familias y demás personas que queremos, por el ánimo, dedicación, amor y el constante apoyo que nos brindaron no solo durante la realización de este proyecto sino también a lo largo nuestra carrera.

## TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN.....	10
2. INTRODUCCION.....	11
3. OBJETIVOS.....	13
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	13
3-2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	13
4. MARCO TEÓRICO .....	14
4.1 PRESERVACIÓN DE CUERPOS A TRAVÉS DE LA HISTORIA.....	14
4-2 TECNICA DE PLASTINACION .....	15
4.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL.....	17
4.3.1 PREPARACIÓN DEL ESPÉCIMEN:.....	17
4.3.2 FIJACIÓN:.....	18
4.3.3 DESHIDRATACIÓN:.....	19
4.3.4 IMPREGACION FORZADA:.....	20
4.3.5 CURADO (ENDURECIMIENTO).....	21
4.4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	22
4.4.1 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	23
4.4.2 DISEÑO FACTORIAL COMPLETO .....	24
4.5 RESINAS DE POLIÉSTER .....	25
4.5.1 GENERALIDADES.....	25
4.5.2 DIFERENCIAS ENTRE RESINAS DE POLIÉSTER ORTOFTÁLICO E ISOFTÁLICO .....	26
4.5.3 PRUEBAS MECÁNICAS QUE SE PUEDEN REALIZAR A LOS POLÍMEROS .....	27

5	METODOLOGIA.....	30
5.3	MATERIALES UTILIZADOS EN EL PROCESO .....	30
5.3.1	ÓRGANOS:.....	30
5.3.2	FIJACIÓN:.....	30
5.3.3	DESHIDRATACIÓN:.....	30
5.3.4	IMPREGNACIÓN .....	31
5.3.5	CURADO.....	32
5.4	EQUIPOS UTILIZADOS.....	33
5.4.1	CÁMARA DE IMPREGNACIÓN:.....	33
5.4.2	CÁMARA DE CURADO: .....	35
5.5	PROCEDIMIENTO.....	35
5.5.1	ETAPA 1: FIJACIÓN .....	35
5.5.2	ETAPA 2: DESHIDRATACIÓN .....	37
5.5.3	ETAPA 3: IMPREGNACIÓN .....	40
5.5.4	ETAPA 4: CURADO (ENDURECIMIENTO) .....	60
5.5.5	PRUEBAS REALIZADAS A LOS ÓRGANOS PLASTINADOS .....	61
5.5.6	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CURADO.....	62
6.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	64
7.	CONCLUSIONES .....	65
6	GLOSARIO .....	69
7	BIBLIOGRAFÍA.....	71
8.	ANEXOS.....	73

## TABLAS

Medidas para los corazones al empezar la etapa 1 de la muestra 1.....	32
Medidas para los corazones al empezar la etapa 1 de la muestra 2.....	32
Concentración del alcohol isopropílico con respecto al tiempo transcurrido hasta el equilibrio.....	35
Medidas para los corazones al empezar la etapa 2 de la muestra 1.....	35
Medidas para los corazones al empezar la etapa 2 de la muestra 2.....	36
Medición de viscosidad variando el porcentaje del estireno.....	38
Diseño de experimentos: valores para los factores y los niveles.....	38
Diseño de experimentos: composición del MekP y el estireno en cada uno de los experimentos.....	39
Resultados de las mediciones experimentales para la dureza.....	41
Resultados de las mediciones experimentales para la flexión.....	42
Mejores composiciones resina-MekP-Estireno para dureza-Flexión.....	54
Resultados prueba de dureza para órganos plastinados.....	59

## FIGURAS

Dimensiones para las probetas.....	25
Dimensiones tomadas a los corazones al iniciar el proceso de plastinación.....	32
Almacenamiento en la etapa de fijación.....	33
Tabulación de los datos en el software Stat Graphics.....	43
Análisis de la varianza para el ensayo de dureza.....	44
Análisis de la varianza para el ensayo de Flexión.....	45
Tabla de medidas por mínimos cuadrados para la dureza.....	46
Tabla de medidas por mínimos cuadrados para la flexión.....	48



## FIGURAS

Curva de calibración del alcohol isopropílico.....	34
Medias y rangos para un nivel de confiabilidad del 95% para la dureza para el MekP.....	47
Medias y rangos para un nivel de confiabilidad del 95% para la dureza para el Estireno.....	47
Medias y rangos para un nivel de confiabilidad del 95% para la flexión para el MEK-p.....	49
Medias y rangos para un nivel de confiabilidad del 95% para la flexión para el Estireno .....	49
Dispersión de datos dureza-MEK-p.....	50
Dispersión de datos dureza-Estireno.....	50
Dispersión de datos flexión-MEK-p.....	51
Dispersión de datos flexión-Estireno.....	52
Interacción dureza-MEK-p-Estireno.....	52
Interacción dureza-Estireno-MEK-p.....	53
Interacción flexión-MEK-p-Estireno.....	53
Interacción flexión-Estireno-MEK-p.....	54

## 1. RESUMEN

La preservación de especímenes anatómicos con fines de docencia, investigación o extensión ha sido un problema por la disponibilidad y destino de cadáveres, los riesgos biológicos que conlleva y la contaminación por formaldehído (sustancia irritante y con posibles efectos cancerígenos por exposición crónica (9)). En este trabajo se muestra el proceso de plastinación, en sus cuatro etapas: fijación, deshidratación, impregnación forzada con vacío y curado, como una buena alternativa en la preservación de los cuerpos y órganos utilizados en el estudio de las ciencias, reemplazando los líquidos tisulares de los órganos por resinas mediante la utilización de presión vacío. Con esta técnica los investigadores y demás personas que tiene contacto continuo con los especímenes preservados no se exponen a materiales de conservación como el formol, ni a riesgos biológicos.

Se realizaron varios ensayos en las diferentes etapas de la plastinación, principalmente durante la impregnación con resinas, siguiendo un diseño experimental a el cual se le variaron las condiciones de operación y de composición de la materia prima. Los órganos que se utilizaron fueron corazones de pollo y la resina utilizada en los ensayos fue Cristalán 872, peróxido de metil etil cetona (MEK-p) como catalizador y octoato de cobalto como acelerante.

Luego de realizar los ensayos y el análisis correspondiente al diseño de experimentos se alcanzó una condición óptima de operación y composición de materia prima, que dieron como resultado órganos totalmente plastinados, los cuales conservaron en un alto porcentaje su color y su tamaño original.

## 2. INTRODUCCION

La aplicación de técnicas que permitan la conservación de las estructuras en los tejidos animales, vegetales o humanos, es de suma importancia para el estudio biológico. Actualmente estas técnicas de conservación de órganos en nuestro país, no son las más adecuadas, pues al ser fundamentadas en la preparación con formol, expone a estudiantes, profesores y monitores de medicina, veterinaria y otras áreas de la anatomía y la biología, a la toxicidad de estas sustancias que en casos muy graves y de exposición prolongada puede llegar a ser fatal; es por esto que en nuestro país se deben emplear técnicas más modernas para la conservación de los órganos, tales como la plastinación. “A process at the interface of the medical discipline of anatomy and modern polymer chemistry, Plastination makes it possible to preserve individual tissues and organs that have been removed from the body of the deceased as well as the entire body itself.”(10) Esta es una técnica muy utilizada principalmente en Europa, Asia y en algunos países de América como EEUU, Argentina, Brasil, Chile, Costa Rica y México. La materia prima más adecuada para la realización de esta técnica se fabrica principalmente en Alemania, Italia y Estados Unidos. En nuestro país las universidades de Antioquia, el bosque, los Andes y la Tecnológica de Pereira, han logrado realizar varios ensayos con resinas nacionales, que han dado resultados positivos en el proceso pero sus variables más significativas como temperatura de procesamiento, el deshidratante y el tipo de resina a utilizar ya sea flexible para órganos completos o rígida para cortes de órganos encapsulados, no han sido identificadas ni optimizadas completamente.

Específicamente el Grupo de Plastinación de la Facultad de Medicina de la Universidad de Antioquia, bajo la coordinación del Dr. Ricardo Jiménez, realizó investigaciones a partir de resinas nacionales y resinas patentadas para el

proceso original de Plastinación, con el fin de compararlos; esta investigación dio como resultado órganos plastinados de buena calidad y similares a los órganos plastinados con las resinas del proceso original, abriendo así el camino para futuras investigaciones que optimicen el proceso iniciado (1).

La plastinación de órganos consiste en un proceso donde se intercambian gradualmente los líquidos propios de los tejidos por un polímero bajo condiciones especiales de temperatura y presión de vacío; dando como resultado órganos con una apariencia real y con propiedades físicas que permiten su manipulación sin medidas preventivas, además proporcionan durabilidad a través del tiempo sin peligro de descomposición; esto beneficia a las personas que tienen contacto continuo con estos órganos ya que no expiden vapores que posean sustancias tóxicas que afecten la salud y por su durabilidad permite mayor uso y disponibilidad de los especímenes con fines de docencia, investigación o extensión.

Esta investigación pretende analizar y caracterizar los diferentes parámetros que cumplan con los requerimientos necesarios para el proceso de plastinación, en todas sus etapas; además plastinar distintos órganos partiendo de la resina Cristalán 872, utilizada en la investigación del Dr. Jiménez (1), el análisis descriptivo de sus propiedades y ventajas para la plastinación, además de su implementación en el proceso, analizando por medio de experimentaciones la mejor composición de la resina, y las condiciones de presión de vacío y la temperatura de fijación y deshidratación, que lleven a piezas plastinadas de calidad, tomando como parámetro de comparación el proceso de plastinación realizado por Gunter von Hagens.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar las condiciones de operación del proceso de plastinación para seleccionar aquellas que garanticen la calidad de los productos obtenidos.

#### **3-2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Seleccionar las condiciones de operación que inciden en el proceso de plastinación basadas en referencias bibliográficas y experimentación.
- Identificar las condiciones óptimas del proceso de plastinación por medio de un diseño de experimentos.
- Comprobar experimentalmente que las condiciones seleccionadas produzcan órganos completamente plastinados.
- Determinar parámetros generales de operación que luego se puedan utilizar para plastinar órganos de mayor tamaño.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 PRESERVACIÓN DE CUERPOS A TRAVÉS DE LA HISTORIA

La conservación consiste en la preparación, mantenimiento y protección de una pieza con el fin de mantenerlo en su estado primitivo o en un estado semejante a lo vivo.

La prehistoria nos familiariza con tales procedimientos, pero eso se trata de fenómenos naturales donde los cuerpos se mantienen intactos o casi, por una turba particularmente ácida o por un suelo congelado permanentemente.

Desde los egipcios hasta nuestros días se ha utilizado la preservación de cadáveres y órganos, animales y humanos, principalmente para fines religiosos, educativos y culturales; los religiosos comienzan con la momificación de los grandes faraones, habitantes de gran estatus y animales sagrados, favoreciéndolos mucho, el clima, la constitución de los individuos y el terreno; para este proceso sacaban con un gancho el cerebro, y después abrían el vientre y sacaban los intestinos, lavando con vino de palmera, y luego lo llenaban de mirra, canela y otros aromas. Después tenían al cadáver durante 70 días en una disolución de natrón (Sal compuesta de carbonato sódico, bicarbonato sódico, sulfato sódico y cloruro sódico), y luego lo recubrían de telas impregnadas de una goma o materias balsámicas; igualmente con este mismo fin lo realizaron los judíos, los etíopes, los persas, los griegos y los romanos.

Durante la Edad Media, los reyes de Francia son embalsamados antes de ser sepultados en Saint-Denis, pero el método está poco elaborado o difundido.

La técnica de embalsamamiento, sin embargo ha hecho notables progresos en el transcurso de los siglos, los egipcios que habían adquirido una maestría

incomparable en este arte pueden ser considerados como los precursores de un método.

En la actualidad la preservación de muertos y de órganos, está basada en la utilización del formol, aun con los peligros que la utilización de esta presenta para la salud de las personas que manipulan estos preparados. Esta sustancia fue clasificada como cancerígena por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Un grupo de 26 científicos de 10 países, reunidos en la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), tras evaluar el conocimiento científico existente, ha concluido que existe evidencia suficiente para considerar que "el formaldehído provoca cáncer rinofaríngeo en el hombre".

Como una forma de solución al problema de la utilización del formol, en la década de los años 70, el anatomista Gunter von Hagens, inventa la técnica de plastinación.

## **4.2 TECNICA DE PLASTINACION**

La plastinación es la técnica más moderna para la preservación macroscópica del material biológico destinado a la investigación, enseñanza y exhibición museográfica. Esta técnica consiste básicamente en la sustitución de líquidos tisulares (agua y lípidos), por sustancias de resinas elásticas de silicón y rígidas de epóxicas, para que los cuerpos vuelvan a tener su textura y color aparentemente normal (1).

Las ventajas que se pueden obtener de la Plastinación son variadas, entre ellas está la posibilidad de mantener al espécimen seco, con volumen y forma naturales; así como también se conserva una textura y coloración muy aproximadas a lo natural, sin el gran inconveniente de malos olores o los vapores irritantes de los conservadores convencionales que causan un desagradable aroma en el ambiente y que irritan las mucosas, además de la comodidad del

manejo manual de las piezas y la resistencia de los cuerpos al tacto. Además estas piezas se mantienen en buenas condiciones sin necesidad de mantenimiento por tiempo ilimitado (2).

La Plastinación fue inventada por Gunter Von Hagens y patentada entre 1977 y 1982, en la universidad de Heidelberg en Alemania y ha sido mejorada continuamente por éste.

Aunque una gran enciclopedia alemana (la 19<sup>a</sup> edición de la Enciclopedia Brockhaus, 1992) indica que la palabra "Plastinación" se deriva del griego (de plassein = a la forma), el término es, de hecho, una creación de Gunther von Hagens.

La plastinación permite preservar los tejidos, órganos y cuerpos completos de personas y animales fallecidos. La base de la técnica es simple: detener el proceso de putrefacción con el fin de obtener una muestra que dure a través del tiempo.

La descomposición es un proceso natural provocado inicialmente por enzimas de las células liberadas después de la muerte y más tarde cuando el órgano es colonizado por bacterias y otros microorganismos. Al eliminar agua y grasas de los tejidos y con la sustitución de estos polímeros, el proceso de Plastinación priva a las bacterias de lo que necesitan para sobrevivir. Los líquidos corporales son sustituidos por polímeros ya que estos dos son químicamente incompatibles.

Gunther Von Hagens encontró una solución para este problema: inicialmente el agua en los tejidos (que comprende aproximadamente el 70% del cuerpo humano) y los tejidos grasos son sustituidos por acetona, un disolvente que se evapora fácilmente. Luego la acetona se sustituye por una solución de polímeros. El método fundamental para esta etapa del proceso en todos los tejidos, es "la impregnación forzada al vacío"



Después de la impregnación al vacío, el órgano se coloca como se desee. En el paso final, la muestra se endurece. Dependiendo del polímero utilizado, esto se hace con gas, luz o calor. Este método recibe el nombre de curado (10).

#### **4.2.1 COSTOS DE LA MATERIA PRIMA**

La materia prima utilizada para la técnica s-10(2) y sus costos, según Biodur Products (10) para el año 2008, son:

- Silicone Polymer S-10, barrel of 15Kg: € 375.00.
- Silicone hardeners SH01, 1 bottle of 0,1Lt: € 8.5.

La materia prima nacional utilizada para este proyecto, según la comercializadora de productos químicos Exdequim S.A, Medellín (fecha de consulta agosto de 2008):

- Resina Cristalan 872, \$12038/Kg.
- Catalizador MEK-p, pote de 20gr: \$800.
- Acelerador Octoato de cobalto, pote de 20gr: \$1800.

### **4.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL**

#### **4.3.1 PREPARACIÓN DEL ESPÉCIMEN:**

Es la preparación de disecciones anatómicas con el fin de resaltar en estas los rasgos deseados, como por ejemplo los vasos, los nervios, los músculos, los tendones y las cavidades importantes que se quieran mostrar, las piezas deben ser preparadas en la mejor posición anatómica posible.

### **4.3.2 FIJACIÓN:**

Tan pronto se produce la muerte, el cadáver es sometido a la acción que facilita la putrefacción. Este fenómeno se acelera en el transcurso de horas que hacen la pieza inutilizable.

Se hace necesario considerar una conservación temporal o permanente con el fin de fijar las células de manera definitiva y evitar la autólisis. Son pues los agentes de fijación los que bloquean más o menos completamente esta degradación. En sus diferentes estados de reacciones las piezas así preparadas son entonces conservadas o disecadas.

La fijación de órganos con el propósito de evitar su descomposición se realiza utilizando agentes físicos o agentes químicos, los primeros se realizan por dos formas, utilizando bajas temperaturas para congelar los órganos o también con la utilización de vapores de aire caliente para su desecación. Los segundos pueden hacerse por varias formas utilizando una solución fijadora la cual en la mayoría de los casos es el formol o sus derivados, y se hacen por la acción de vapores; por inmersión, en la cual se sumerge el espécimen en la solución fijadora; por infiltración, que es una acumulación de una sustancia determinada en el tejido y es indicada para grandes especímenes; por inyección, por la cual se fuerza el líquido fijador a entrar al órgano; por perfusión, que es verter sobre este la solución y por último la dilatación, la cual se realiza dilatando o estirando el órgano, pero esta forma altera significativamente el tamaño del órgano.

En esta etapa del proceso se utiliza formol en bajas concentraciones 3, 5, 10%, el cual por inmersión del órgano se incorpora en la membrana celular y en las estructuras moleculares del espécimen dándole firmeza y evitando la posterior retracción, además sirve para desnaturalizar las enzimas que estén presentes en el tejido, las cuales si permanecen activas pueden causar la descomposición del espécimen.

Las aplicaciones del formol en anatomía son múltiples, y en concentraciones diversas. La mezcla de soluciones más o menos complejas, han revelado que es un excelente agente de conservación. Las piezas una vez fijadas pueden ser guardadas en soluciones o en un medio líquido como la glicerina, por ejemplo. Hoy conocemos los inconvenientes del uso del formol, tanto para los anatomistas como para los estudiantes. Autores de reconocida experiencia consignan que el formol tiene varios inconvenientes, tales como: en concentraciones elevadas provocan la retracción, el endurecimiento y la decoloración de los órganos.

La fijación por inmersión, debe hacerse por un tiempo mínimo; esta se realiza generalmente con formol en concentraciones no mayores al 10%, el formaldehído es un gas saturado en agua a una composición del 37%, para evitar que se forme una capa del fijador sobre el espécimen, la cual retarda la difusión de este se recomienda ir aumentando poco a poco la concentración de la solución de formaldehído.

Con el fin de que no se pierda la flexibilidad del tejido los niveles de concentración de la solución de formol deben ser entre uno y tres por ciento.

La fijación debe hacerse a temperaturas bajas, pues así se evita la retracción del espécimen, la autólisis y se refuerza la preservación del color.

### **4.3.3 DESHIDRATACIÓN:**

En esta etapa son reemplazados gradualmente el agua y los líquidos tisulares del cuerpo por un solvente orgánico, el cual actúa deshidratando y quitando parte del tejido adiposo, como puede ser alcohol ó acetona. Esta última tiene la ventaja que también sirve como solvente intermediario durante la impregnación forzada. Este compuesto orgánico debe ser altamente volátil para facilitar posteriormente el intercambio por un polímero en la etapa de impregnación forzada.

Los solventes pueden ser:

- Miscibles con el agua como: alcoholes monohidricos (metanol y etanol), alcoholes dihidricos, alcoholes trihidricos (glicerina) y cetonas (acetona, etilmetil cetona)
- No miscibles con el agua: cloruro de metileno.

Una adecuada deshidratación se realiza a temperaturas bajas (menor a 5°C) y el procedimiento debe hacerse con el aumento gradual de la concentración del solvente orgánico (70, 75, 80, 85, 90, 95 y 99%), para asegurar que se produzca una retracción mínima en los tejidos. Esta etapa habrá terminado cuando el medio circundante al órgano llegue a una máxima concentración de solvente orgánico. El tiempo de deshidratación dependerá del tamaño del órgano. La proporción volumen órgano/volumen solvente orgánico, debe ser de 1/10; al aumentar esta proporción se disminuye el tiempo de deshidratación. Las consecuencias que se tienen al deshidratar en menos del tiempo requerido son: retracción de las piezas y aparición de manchas blancas en la superficie del órgano. O por el contrario si el tiempo de deshidratación es excesivo se formará una película en la superficie que limitará la impregnación del polímero y perderá flexibilidad en el órgano, por tanto este paso debe estar muy bien vigilado con mediciones frecuentes de concentración del alcohol.

#### **4.3.4 IMPREGNACIÓN FORZADA**

Es un paso central y crítico en la técnica de Plastinación. Es el reemplazo del solvente, proveniente de la deshidratación, el cual está ocupando los espacios dejados por el agua y lípidos, por sustancias de silicona, rígidos de epóxicas y polímeros. Para lograr un reemplazo adecuado, el proceso se debe facilitar haciendo uso de una cámara de vacío, para disminuir la presión interna, haciendo

que el solvente orgánico se gasifique mas rápidamente, debido a que este presenta una alta presión de vapor y bajo punto de ebullición y por el contrario el polímero presenta una baja presión de vapor y alto punto de ebullición, por lo tanto cuando la impregnación forzada es ejercida, solo el solvente intermediario es continuamente extraído fuera del preparado en forma de burbujas de gas.

Para una correcta impregnación los órganos no deben tocar las paredes del recipiente ni sobresalir por encima del nivel de la resina.

La impregnación forzada se realiza a temperatura ambiente cuando se utiliza epoxy y resina poliéster o a menos 0°C cuando se trabaja con silicona.

La velocidad de impregnación dependerá tanto del tamaño del preparado como del polímero usado. En general polímeros de una alta viscosidad requerirán mayores tiempos de impregnación, por otro lado especímenes de gran tamaño y densidad, presentarán una lenta impregnación, siendo recomendable utilizar una resina de baja viscosidad.

La presión de vacío inicialmente se lleva aproximadamente a 50 mmHg en donde se debe presentar la aparición de abundantes burbujas pequeñas que salen del órgano y son producidas por la evaporación del solvente, a partir de ahí se incrementa el vacío a 15 mmHg y luego 5 mmHg y por último a presiones inferiores 5 mmHg, cada cambio se debe hacer a medida que disminuya la frecuencia de aparición de las burbujas y se aumente el tamaño de las mismas, hasta el punto en que la aparición de éstas sea casi nula. Al crear una presión de vacío muy elevada los órganos pueden retraerse o pueden aparecer zonas colapsadas en el órgano.

#### **4.3.5 CURADO (ENDURECIMIENTO)**

Esta etapa final consiste en la eliminación del exceso de la resina que queda en el espécimen luego de la impregnación, además cumple la función de unir las cadenas de polímero, por la acción de un agente entrecruzador provocando su endurecimiento, el cual se realiza con base en: gases endurecedores, luz ultravioleta o calor (50°C), cuando se trabaja con silicona, epoxy o poliéster.

En el proceso de polimerización se puede incrementar la velocidad del entrecruzamiento de las cadenas al aumentar la cantidad del agente entrecruzador. Las ventajas de una velocidad alta son mínima retracción del tejido y menor tiempo de procesado; las desventajas son mayor riesgo de que la superficie del órgano quede ocupada por polímero enmascarando el aspecto de la preparación y mayor riesgo de presencia de manchas blancas en la superficie del tejido por exceso del agente entrecruzador o de humedad en la cámara de curado. Al tener una velocidad lenta en la etapa del curado se presentan las siguientes ventajas: mayor flexibilidad de la pieza u órgano y ausencia de polímero en la superficie del tejido; las desventajas son mayor retracción del órgano, sobretodo en las secciones corporales y mas tiempo invertido en el tiempo de procesamiento.

#### **4.4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

El diseño de experimentos es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados que pueden ser analizados mediante métodos estadísticos con el objeto de producir conclusiones válidas y objetivas. Los tres principios básicos en el diseño de experimentos son: el de obtención de réplicas, aleatorización y análisis por bloques. La réplica se refiere a una repetición del experimento básico, la aleatorización es el hecho de que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizan las pruebas individuales o ensayos se

determinan aleatoriamente y el análisis por bloques hace comparaciones entre las condiciones de interés del experimento dentro de cada bloque.

#### **4.4.1 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

1. Comprensión y planteamiento del problema. Es un planteamiento claro del problema y esto contribuye a menudo en forma sustancial a un mejor conocimiento del fenómeno y a la solución final del problema.
2. Elección de factores y niveles. Se deben elegir los factores que variarán en el experimento, los intervalos de dicha variación y los niveles específicos a los cuales se hará el experimento, también debe considerarse la forma en que se controlarán estos factores para mantenerlos en los valores deseados y como se les medirá.
3. Selección de las variables de respuesta. Al seleccionar la respuesta o la variable dependiente, el experimentador debe estar seguro de que la respuesta que se va a medir realmente provee información útil acerca del proceso de estudio; no son raras las respuestas múltiples. La capacidad de medición (o el error de medición) también es un error importante.
4. Elección del diseño experimental. Para elegir el diseño es necesario considerar el tamaño muestra (número de repeticiones), seleccionar un orden adecuado para los ensayos experimentales y determinar si hay implicado bloqueo u otra restricción de aleatorización. Es importante tener presente los objetivos experimentales al seleccionar el diseño.
5. Realización del experimento. Cuando se realiza el experimento, es vital vigilar el proceso cuidadosamente para asegurar que todo se haga conforme a lo planeado, en esta fase los errores en el procedimiento suelen anular la validez experimental.

6. Análisis de datos. Deben emplearse métodos o programas estadísticos para analizar los datos, de modo que los resultados y conclusiones sean objetivos más que apreciativos. Hay que recordar que los métodos estadísticos no pueden probar que un factor (o varios factores) tienen un efecto particular, solo proporcionan directrices para la veracidad y validez de los resultados. Los métodos estadísticos aplicados adecuadamente no permiten aprobar algo experimentalmente, sólo hacen posible obtener el probable error de una conclusión, o asignar un nivel de confiabilidad a los resultados. La principal ventaja de los métodos estadísticos es que agregan objetividad al proceso de toma de decisiones.

7. Conclusiones y recomendaciones. Una vez que se han analizado los datos el experimentador debe extraer conclusiones prácticas de los resultados y recomendar un curso de acción, en esta fase son muy útiles los métodos gráficos que facilitan el análisis de los resultados.

#### **4.4.2 DISEÑO FACTORIAL COMPLETO**

Una definición muy completa de diseño factorial es la que ofrece (5) “un diseño factorial completo es aquel en el que se utilizan todas las combinaciones posibles de los valores seleccionados de las variables independientes”. La anterior definición establece que los diseños factoriales se utilizan para manipular las variables independientes simultáneamente y permiten evaluar por separado los efectos de cada variable independiente al igual que la interacción entre ellas. Un diseño factorial puede utilizar dos o más variables independientes con cualquier cantidad de niveles o valores para determinar estadísticamente sus efectos. Por lo general los diseños factoriales se representan como diseños 2X2, 2X3X4, 2X4X8X5, etc.



Cada dígito representa una variable independiente y su valor representa la cantidad de niveles o valores que posee cada variable independiente, así en un diseño factorial 2X2 existen dos variables independientes con dos niveles cada una de ellas. A mayor cantidad de variables independientes y niveles existe mayor dificultad para desarrollar y controlar el experimento.

## **4.5 RESINAS DE POLIÉSTER**

### **4.5.1 GENERALIDADES**

Existen en el mercado dos grandes grupos de materiales plásticos: termoplásticos y termoestables.

Entre los más conocidos pueden incluirse PVC, Nylon, Polietileno, Polipropileno, Poliestireno, etc. Siendo normalmente moldeados por los procesos de inyección, extrucción, soplado, etc. Los termoplásticos presentan excelentes propiedades químicas, pero tienen propiedades mecánicas que no pueden competir con los materiales termoestables, sobre todo a temperaturas moderadamente elevadas.

Los plásticos termoestables y concretamente las resinas de poliéster, se suministran en forma de líquido viscoso, que con la adición de productos químicos adecuados se transforma de un estado líquido a un estado sólido. Una vez la resina ha obtenido su estado sólido, no podrá ser transformada nuevamente en estado líquido.

Este producto ofrece:

- La posibilidad de curado a temperatura ambiente.
- No es necesario aplicar presión para la transformación y moldeo.
- Obtención de gran número de diferentes formas.

- Posibilidad de moldeo de piezas grandes y complejas a precios competitivos a pequeñas y medianas escalas de producción.

Además de las siguientes características:

- Excelente estabilidad dimensional.
- Excelente resistencia a ambientes químicamente agresivos.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Excelentes propiedades eléctricas.

#### **4.5.2 DIFERENCIAS ENTRE RESINAS DE POLIÉSTER ORTOFTÁLICO E ISOFTÁLICO**

- Las resinas ortoftálicas son más rígidas que las isoftálicas, por la mayor proximidad de los grupos éster y de los dobles enlaces de los ácidos insaturados.
- Las resinas ortoftálicas presentan por lo general tiempos de gelificación más largos que las isoftálicas.
- Las resinas ortoftálicas presentan menor resistencia al agua, dado que al tener cadenas moleculares menores, tiene mayor número de grupos terminales – OH que pueden ser susceptibles a la acción del agua.
- Las resinas ortoftálicas presentan menor resistencias químicas por tener una reticulación menos comprimida.
- En general las resinas isoftálicas tiene mayor resistencias químicas por tener menor número de grupos terminales y mayor empaquetamiento en la reticulación.
- Las resinas ortoftálicas tienen peores propiedades mecánicas y menor resistencia al impacto que las isoftálicas, dado que las últimas presentan mayor empaquetamiento en la reticulación, cadenas moleculares más largas y mayor espaciamiento entre las insaturaciones y entre los grupos éster.

- Las ortoftálicas tienen menor retención de las propiedades mecánicas a elevadas temperaturas.
- Las resinas ortoftálicas son menos viscosas que las isoftálicas.

La resina Cristalán 872, objeto de estudio en este trabajo es una resina isoftálica flexible.

### **4.5.3 PRUEBAS MECÁNICAS QUE SE PUEDEN REALIZAR A LOS POLÍMEROS**

#### **4.5.3.1 Ensayo de dureza**

La dureza es una propiedad fundamental de los materiales y está relacionada con la resistencia mecánica. La dureza puede definirse como la resistencia de un material a la penetración o formación de huellas localizadas en una superficie. Cuanto mas pequeña sea la huella obtenida en condiciones normalizadas, más duro será el material ensayado. el penetrador en un ensayo de dureza es generalmente una esfera, pirámide o cono hecho de un material mucho mas duro del que se ensaya, como por ejemplo acero endurecido, diamante o carburo de tungsteno sinterizado.

En la mayoría de las pruebas patrón, la carga se aplica al oprimir lentamente el penetrador, perpendicularmente a la superficie ensayada, por un período determinado. De los resultados obtenidos se puede calcular un valor empírico de dureza, conociendo la carga aplicada y el área de la sección transversal o la profundidad de la impresión. El ensayo de dureza nunca se debe realizar cerca del borde de la muestra o cerca de otra penetración ya existente. En este último caso, la distancia mínima para efectuar una penetración es de tres veces el diámetro de

la penetración anterior. Otra condición, es que el espesor de la probeta a ensayar, sea de por lo menos 10 ½ veces el diámetro de la impresión.

Existen muchos tipos de ensayo para medir la dureza, entre estos están: ensayo Brinell, Vickers y Rockwell, para medir la dureza en polímeros es muy frecuente encontrar datos en Shore A, Shore D y Rockwell, para este caso se utilizó un durómetro shore D, el cual mide directamente sobre el material.

#### **4.5.3.2 Ensayo de flexión**

Método para medir el comportamiento de los materiales sometidos a la carga de la viga simple. Con algunos materiales, también se denomina ensayo de la viga transversal. La probeta está soportada por dos cuchillas como viga simple y la carga se aplica en su punto medio. El esfuerzo máximo de la fibra y la deformación máxima se calculan en incrementos de carga. Los resultados se trazan en un Diagrama carga-deformación y el esfuerzo máximo de la fibra es la resistencia a la flexión. Se presenta la resistencia de fluencia de la flexión en aquellos materiales que no se rompen. Los procedimientos de ensayo estándares para plásticos se especifican en ASTM D-790 (plásticos).

##### **a. Probetas para los ensayos de flexión:**

Para determinar el módulo de ruptura para un material dado la viga bajo ensayo debe proporcionarse de tal manera que no falle por corte o deflexión lateral antes de alcanzar su última resistencia a la flexión. Para producir una falla por flexión, la probeta no debe ser demasiado corta con respecto al peralte de la viga.

##### **b. Fuerza máxima de flexión**

$$S = \frac{P * L}{b * d^2}$$

Donde:

S= Fuerza de flexión calculada, N/mm<sup>2</sup>.

P= Carga aplicada en el punto de deflexión, N

L= Longitud de la probeta, mm

b= Profundidad de la probeta, mm

d= Espesor de la probeta, mm

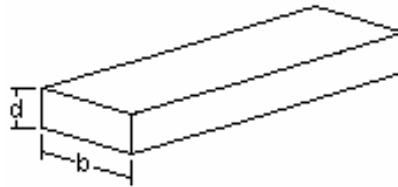


Figura #1: Dimensiones para las probetas.

## **5 METODOLOGIA**

### **5.1 MATERIALES UTILIZADOS EN EL PROCESO**

#### **5.1.1 ÓRGANOS:**

Los órganos utilizados fueron corazones de pollo por su fácil consecución. Son órganos que muestran buenos detalles superficiales, fáciles de medir, ocupan poco volumen (a mayor volumen de los órganos a plastinar, mayor tiempo de procesamiento y mayor dimensión de los equipos), además el número de experimentos necesarios así lo requerían.

Estos órganos fueron acondicionados quitando los excesos de tejido adiposo para resaltar su anatomía externa y facilitar las mediciones que permitan comparar los niveles de retracción durante el proceso.

#### **5.1.2 FIJACIÓN:**

La fijación ideal para estos preparados debe contener formol en concentraciones no más allá de 5%, por períodos, en lo posible cortos, (una a dos semanas), para evitar el oscurecimiento de la muestra. (Ver ficha técnica del formol).

#### **5.1.3 DESHIDRATACION:**

El solvente utilizado para este proceso requiere tener las siguientes características:

- Que pueda sustituir el agua deshidratando y retirando parte del tejido adiposo del órgano
- Que sea altamente volátil, permitiendo ser sustituido posteriormente en la cámara de vacío por el polímero
- Alta presión de vapor y bajo punto de ebullición con respecto al polímero
- Ser un solvente orgánico miscible con el agua

Según la técnica S-10 el solvente apropiado para realizar la deshidratación es la acetona la cual cumple con las características dichas anteriormente. En nuestro país por ser una solución restringida por el uso en la elaboración de drogas no lícitas tiene un alto costo y su venta es controlada, por esto se buscó un solvente alternativo como el alcohol isopropílico, el cual cumple con las propiedades requeridas para la plastinación, además tiene menos restricciones para su consecución y un costo menor que el de la acetona. (Ver ficha técnica anexa)

Alcohol isopropílico ( $\text{CH}_3\text{CHOHCH}_3$ ) es comercializado al 99 % anhidro. Es conocido también como isopropanol, 2-propanol, alcohol sec-propílico, IPA. Es un líquido claro, incoloro, móvil, transparente como el agua, extremadamente volátil, con olor fuerte y característico al alcohol. Es utilizado como diluyente de pinturas, esmaltes, lacas, barnices, selladores, adhesivos, resinas, tintas, removedores, derivados de celulosas.

#### **5.1.4 IMPREGNACIÓN**

El polímero (Cristalan 872) utilizado para este proceso requiere tener las siguientes características:

- De apariencia transparente o semitransparente.
- Flexible (en el caso de órganos completos ya que para cortes se utiliza polímeros rígidos)

- Presión de vapor baja y punto de ebullición alto con respecto al solvente deshidratante.
- Baja viscosidad (menores a 800 cps @ 25°C)

En la técnica S-10 se utiliza un polímero patentado por G. von Hagens, este polímero tiene altos costos de consecución, por esto para la selección de la resina nos basamos en la investigación del Grupo de Plastinación de la Universidad de Antioquia (1). La resina recomendada en este artículo es la resina cristalán 872. (Ver ficha técnica, anexo 1)

El CRISTALÁN 872 es una resina de poliéster de apariencia amarilla transparente y viscosa. Es una resina isoftálica flexible, diseñada para modificar cualquier resina isoftálica rígida especialmente las resinas ISO- NPG y algunas resinas ortoftálicas.

Se emplea, casi exclusivamente, para modificar otras resinas ortoftálicas e isoftálicas, obteniéndose así aumento de la flexibilidad y disminución de la fragilidad.

El solvente mas utilizado para esta resina es el estireno. Se conoce también como vinilbenceno, etenilbenceno, cinameno o feniletileno. Es un líquido incoloro de aroma dulce que se evapora fácilmente. A menudo contiene otros productos químicos que le dan un aroma penetrante y desagradable.

Se disuelve en algunos líquidos, pero no se disuelve muy fácilmente en agua (Ver ficha técnica).

### **5.1.5 CURADO**

El compuesto para realizar el curado viene recomendado con el tipo de resina a utilizar, para el caso de este estudio y de la resina utilizada “Cristalán 872” se



utilizó el Octoato de Cobalto como agente polimerizante (acelerante) y el Mek Peróxido (catalizador) como un pre-polimerizador para potenciar el efecto del Octoato.

Entre las funciones específicas del catalizador están las de establecer puentes físicos entre las cadenas de la resina y determinar el grado de rigidez del órgano plastinado. (Ver ficha técnica)

El Acelerador (Octoato de Cobalto) sirve para modificar la velocidad de reacción en las resinas poliéster, es un líquido de color azul intenso que generalmente se vende a una concentración del 2% de cobalto metálico (aunque también hay otras concentraciones).

El catalizador (Peróxido de Metil Etil Cetona); es un líquido incoloro y no debe ponerse en contacto con el acelerador de cobalto ya que genera una alta exotermia (desprendimiento de calor) con riesgo de incendio.

## **5.2 EQUIPOS UTILIZADOS**

Entre los equipos que se utilizaron para la experimentación, los más importantes en su orden son:

### **5.2.1 CÁMARA DE IMPREGNACIÓN:**

Este equipo está constituido por:

- Cámara de vacío

La cámara de vacío debe poseer el volumen adecuado para poder introducir varios recipientes con diferentes composiciones de resina y con varios órganos cada uno, que tenga conexiones para la bomba de vacío y para la válvula de ajuste de presión. Por lo menos debe tener tapa transparente para poder tener visualización de las burbujas que salen del órgano y poder realizar un buen control del proceso de impregnación.

El material de la cámara de vacío debe soportar presiones por debajo de los 10mmHg. En este caso se utilizó una mufla de secado.

- Bomba de vacío

Se debe utilizar una bomba que sea capaz de producir alto vacío (menor a 10 mmHg), una bomba recomendada por el manual S-10 es una bomba de vacío de paletas en rotación en cámara de aceite, con empaquetadura resistente a solventes orgánicos, con aceites de alta viscosidad y baja presión de vapor.

Para esta etapa del proceso se utilizó una bomba para alto vacío de 2 etapas, marca Dosivac modelo DVR 95.

- Válvulas de ajuste de la presión de vacío

Permite la entrada de aire exterior al circuito de vacío, permitiendo controlar las burbujas que salen del órgano, controlando la velocidad de impregnación evitando así la retracción del órgano en este proceso. También regulan la velocidad de trabajo que realiza la bomba de vacío sobre la cámara.

- Vacuómetro

Permite someter el órgano a impregnar a un nivel de vacío progresivo, evitando la retracción de este.

### **5.2.2 CÁMARA DE CURADO:**

Es un recipiente no necesariamente hermético, puede ser de plástico, cristal o aluminio. Debe contar con un sistema de evaporación el cual consiste en generar burbujas dentro de un recipiente que contenga la solución con el acelerante para así generar un vapor circundante dentro de la cámara. Este sistema de evaporación está constituido por una bomba de pecera y el recipiente antes mencionado que contiene el acelerante, el cual puede ser de cualquier material.

Para el curado se utilizo un recipiente plástico transparente.

### **5.3 PROCEDIMIENTO**

Nota: Procedimiento basado en Técnica de plastinación S-10 por Von Hagens (2)

Para realizar los experimentos se tomaron dos muestras cada una de 10 corazones de pollo. La muestra N°1 se trabajó a temperatura ambiente y la muestra N°2 se trabajó a una temperatura aproximada de 4°C. Esto con el fin de observar la retracción que sufren los órganos a diferentes temperaturas durante las dos primeras etapas del proceso.

#### **5.3.1 ETAPA 1: FIJACION**

a. Se tomaron las medidas más importantes (ancho 1, ancho 2, alto, diámetro de la arteria) como se muestra en la figura, de cada frasco se tomaron 4 corazones aleatoriamente los cuales fueron debidamente identificados por un alambre de color para hacerles el seguimiento durante todo el proceso de

plastinación. Esta medida se realizó para compararla con las medidas que se van a tomar después de las dos primeras etapas y poder evaluar la retracción que sufren los corazones a medida que se varían las condiciones de cada etapa del proceso de plastinación.

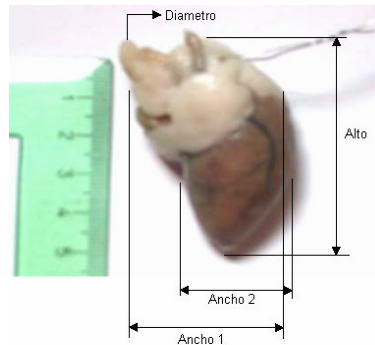


Figura #2: Dimensiones tomadas a los corazones de pollo al iniciar el proceso de plastinación.

Las dimensiones obtenidas fueron:

<b>MUESTRA 1: TEMPERATURA AMBIENTE</b>				
<b>COLOR</b>	<b>ANCHO 1 (cm)</b>	<b>ANCHO 2 (cm)</b>	<b>ALTO (cm)</b>	<b>DIAMETRO (cm)</b>
Plata	2,5	2,07	3,7	0,39
Naranja	2,59	1,82	4	0,35
Azul	2,5	1,63	3,26	0,31
Blanco	2,93	1,96	3,5	0,49

Tabla # 1: Medidas para los corazones al comenzar la etapa 1 de la muestra 1.

<b>MUESTRA 2: TEMPERATURA 4°C</b>				
<b>COLOR</b>	<b>ANCHO 1 (cm)</b>	<b>ANCHO 2 (cm)</b>	<b>ALTO (cm)</b>	<b>DIAMETRO (cm)</b>
Plata	2,36	2,03	4,43	0,31
Naranja	2,53	1,9	4,27	0,57

Azul	2,41	2,2	4,54	0,37
Blanco	2,62	2,18	4,22	0,43

Tabla # 2: Medidas para los corazones al comenzar la etapa 1 de la muestra 2.

b. Se tomaron las muestras y se introdujeron en dos frascos de vidrio con formaldehído al 5% en volumen. Se dejaron bajo las condiciones de temperatura establecidas anteriormente durante una semana. (Técnica de plastinación S-10 por Von Hagens pág. 8) El recipiente en el cual se realiza la fijación debe ser hermético y de boca ancha para facilitar la extracción del órgano después de ser fijado.



Figura #3, almacenamiento en la etapa de fijación.

### 5.3.2 ETAPA 2: DESHIDRATACION

Nota: Antes de deshidratar se elaboró una curva de calibración para el alcohol isopropílico (grafico composición vs índice de refracción, grafico # 1), para poder encontrar la concentración de la solución en determinado tiempo mediante el índice de refracción.

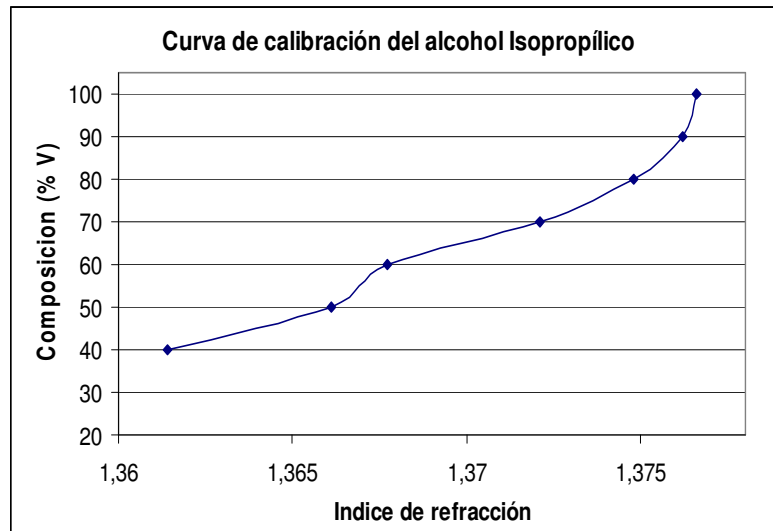


Grafico # 1: Curva de calibración para el alcohol isopropílico.

- a. Luego de la fijación se retira el tejido adiposo de cada órgano, resaltando su anatomía externa.
- b. La deshidratación de los órganos comenzó con una solución de alcohol isopropílico al 70% en volumen para cada una de las dos muestras, se tuvo especial precaución con no dejar por fuera del líquido ningún órgano. se realizaron mediciones dos veces a la semana de la composición de alcohol por medio del índice de refracción de la solución.
- c. A medida que los resultados de las mediciones de la concentración de la solución de alcohol isopropílico se vuelven constantes se cambiaban los corazones a una solución de mayor concentración, logrando una escala ascendente hasta llegar al máximo de alcohol así: 70, 75, 90, 95 y 99.9%V, esto con el fin de ir deshidratando los órganos lentamente evitando así una alta retracción. Al volverse constante el índice de refracción nos indica que la concentración de los líquidos que se encuentran dentro del órgano tienen la misma concentración que la solución y que se ha alcanzado el equilibrio.

En la tabla # 3 se puede observar el tiempo que tardó cada concentración en alcanzar el equilibrio.

<b>Concentración de alcohol isopropílico (% V)</b>	<b>Tiempo (días)</b>
70	8
75	8
90	10
95	11
99	11
99	15

Tabla # 3: Concentración de alcohol isopropílico con respecto al tiempo transcurrido hasta el equilibrio.

d. Luego de terminar con la etapa de deshidratación se tomaron medidas de los corazones para mirar la retracción hasta este punto del proceso y los resultados fueron los siguientes.

<b>MUESTRA 1: TEMPERATURA AMBIENTE</b>					
<b>COLOR</b>	<b>ANCHO 1 (cm)</b>	<b>ANCHO 2 (cm)</b>	<b>ALTO (cm)</b>	<b>DIAMETRO (cm)</b>	<b>% RETRACCION (promedio ponderado)</b>
Plata	2,5	2	3,7	0,36	2,77
Naranja	2,47	1,75	3,54	0,3	8,57
Azul	2,16	1,54	3,06	0,3	7,13
Blanco	2,6	1,82	3,28	0,48	6,68
<b>Promedio total</b>					<b>6,29</b>

Tabla # 4: Medidas para los corazones al finalizar la etapa 2 de la muestra 1.

<b>MUESTRA 2: TEMPERATURA 4°C</b>					
<b>COLOR</b>	<b>ANCHO 1 (cm)</b>	<b>ANCHO 2 (cm)</b>	<b>ALTO (cm)</b>	<b>DIAMETRO (cm)</b>	<b>% REATRAIDO (promedio ponderado)</b>
Plata	2,3	2,03	4,2	0,3	2,74
Naranja	2,42	1,87	4,17	0,48	6,01
Azul	2,36	2,14	4,43	0,35	3,13
Blanco	2,45	2,16	4,17	0,4	3,53
<b>Promedio total</b>					<b>3,85</b>

Tabla # 5: Medidas para los corazones al finalizar la etapa 2 de la muestra 2

### **5.3.2.1 Análisis de retracción de los órganos**

De acuerdo a los datos anteriores podemos decir que la muestra que presenta un menor porcentaje de retracción es la muestra que se encuentra a temperatura de 4°C, ya que esta nos muestra un promedio del porcentaje de retracción de 3.85% en comparación con 6.29% que es el valor de la muestra que se encontraba a temperatura ambiente.

Debido a esto las siguientes etapas del proceso se realizaron con la muestra que se encontraba a 4°C

### **5.3.3 ETAPA 3: IMPREGNACIÓN**

Con el fin de llegar al objetivo general de este proyecto, el cual es obtener un plastinado óptimo variando condiciones de presión, temperatura y composición de la resina y para reducir el número de experimentos en la impregnación, se realizó un diseño de experimentos utilizando el software Statgraphics, antes de la



impregnación en el cual se evalúa únicamente el comportamiento de la resina variando la composición del catalizador y del solvente (%MEK-p, % estireno), el Octoato de cobalto se dejó constante con el valor recomendado por el fabricante (0.5 ml en 100 gr. de resina) ya que el objetivo no es acelerar el tiempo de curado porque esto hace que el órgano se contraiga y disminuya su flexibilidad, aspectos que se deben evitar para que la apariencia del órgano plastinado sea lo más real posible. (2) Luego de obtener los resultados de este diseño de experimentos y analizarlos se escogieron las 4 composiciones que se acercan al material que se requiere para la plastinación las cuales siguieron con la etapa 3 de impregnación.

#### **5.3.3.1 Descripción del diseño de experimentos**

Para el diseño de experimentos se tienen 2 factores una con cinco niveles y otra con 3 niveles.

Para escoger el intervalo de los niveles y valores respectivos de cada uno de los factores a evaluar se tuvo en cuenta dos aspectos: la bibliografía y un ensayo de medición de la viscosidad, para el caso del estireno y la bibliografía para el caso del MEK-p.

En la bibliografía encontramos que a mayor cantidad de estireno menos viscosa es la resina, pero a la vez esta proporciona dureza, brillo y rigidez al producto final (6).

Al comparar la viscosidad del cristalán con la resina utilizada en la técnica S-10 de Von Hagens se encontró que la viscosidad del Cristalán® es 400 cps mas alta. Además a menor viscosidad mayor facilidad en la impregnación debido a que la resina es más fluida y esto conlleva a que penetre más fácilmente al órgano. La resina Cristalán 872® sin adición de estireno tiene una viscosidad entre 900,75-870,5 cp.

Debido a esto se realizó una medida de la viscosidad para el Cristalán 872® aumentándole el porcentaje de estireno hasta alcanzar una viscosidad menor a 400 cps, como lo muestra la tabla # 6

<b>Estireno adicionado a la resina (%)</b>	<b># de aguja</b>	<b>Velocidad (rpm)</b>	<b>Viscosidad (cps, a T=25°C)</b>
0	2	20	870.5
0	3	50	900.75
2	2	30	656.5
4	2	30	536
4	1	10	551.5
6	1	10	404.15
8	1	12	339.5

Tabla # 6. Mediciones de viscosidad variando el porcentaje de estireno.

Para escoger los valores de los niveles del MEK-p se siguieron las recomendaciones y valores que da la bibliografía, la cual dice que “cuanto menos catalizador se use más tiempo tardará la resina en solidificarse. El uso de cantidades menores a las recomendadas (0,5-1,5%), genera una reacción lenta y por consiguiente no se logra el curado adecuado” (6).

<b>Factores</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores niveles (%)</b>				
<b>Estireno</b>	5	0	2	4	6	8
<b>MEK-p</b>	3	0,5	1	1,5		

Tabla # 7: Diseño de experimento: Valores para los factores y los niveles.

Al realizar un diseño factorial completo para hallar el número de experimentos a realizar, el resultado es el siguiente:

$$3 \times 5 = 15$$

Y las combinaciones son las siguientes:

<b>Nº</b>	<b>% Estireno</b>	<b>% MEK-p</b>
1	0	0,5
2	0	1
3	0	1,5
4	2	0,5
5	2	1
6	2	1,5
7	4	0,5
8	4	1
9	4	1,5
10	6	0,5
11	6	1
12	6	1,5
13	8	0,5
14	8	1
15	8	1,5

Tabla # 8: Diseño de experimento: composiciones del MEK-p y el estireno en cada uno de los experimentos.

Además para mejorar la confiabilidad de los experimentos se realizó una réplica de cada uno.

### **5.3.3.2 Elaboración de probetas**

Con la variación de las composiciones recomendadas por el diseño de experimentos, se elaboraron las probetas a las cuales después se les hizo las pruebas para analizar la dureza y flexibilidad de cada una.

Estas probetas tiene las medidas según la norma ASTM, D-790-71 “Standard methods of test for FLEXURAL PROPERTIES OF PLASTICS”

- Se tomaron los moldes y se pulieron para que la superficie estuviera totalmente lisa, luego se dió una capa de cera sobre ésta para que las probetas desmoldaran fácilmente.
- Se tomaron varios recipientes en donde se prepararon las diferentes muestras con las composiciones de la tabla #9 y posteriormente fueron vaciadas en los moldes de las probetas.
- Después de un tiempo prudencial para que se gelificaran las resinas (aproximadamente de dos días) se desmoldaron las probetas, se pulieron para lograr uniformidad y se realizaron las pruebas para cada una de ellas.

### **5.3.3.3 Pruebas realizadas a las probetas**

#### **a. Prueba de dureza**

Esta prueba se realizó en los laboratorios de resistencia de materiales de la Universidad Eafit. Esta prueba se efectuó con el tipo de ensayo para polímeros, midiendo la dureza Shore D.

<b>Nº Experimento</b>	<b>Dureza (shore D)</b>	<b>Réplica (shoreD)</b>
1	41,5	40
2	53,5	55,5
3	47,5	47
4	43,5	43,5
5	54	50
6	50,5	51
7	49	49,5
8	56	50
9	53	52
10	47,5	48
11	56,5	56,5
12	53	51,5
13	55	55
14	59	60
15	59,5	58

Tabla #9: Resultados de las mediciones experimentales de la dureza.

**b. Prueba de flexión**

Esta prueba se realizó en los laboratorios de resistencia de materiales de la Universidad Eafit. Se utilizó el método ASTM, D-790-71 “Standard methods of test for FLEXURAL PROPERTIES OF PLASTICS” para el ensayo de flexión en tres puntos y se obtuvieron los siguientes resultados utilizando la fórmula para la fuerza máxima de flexión, así:

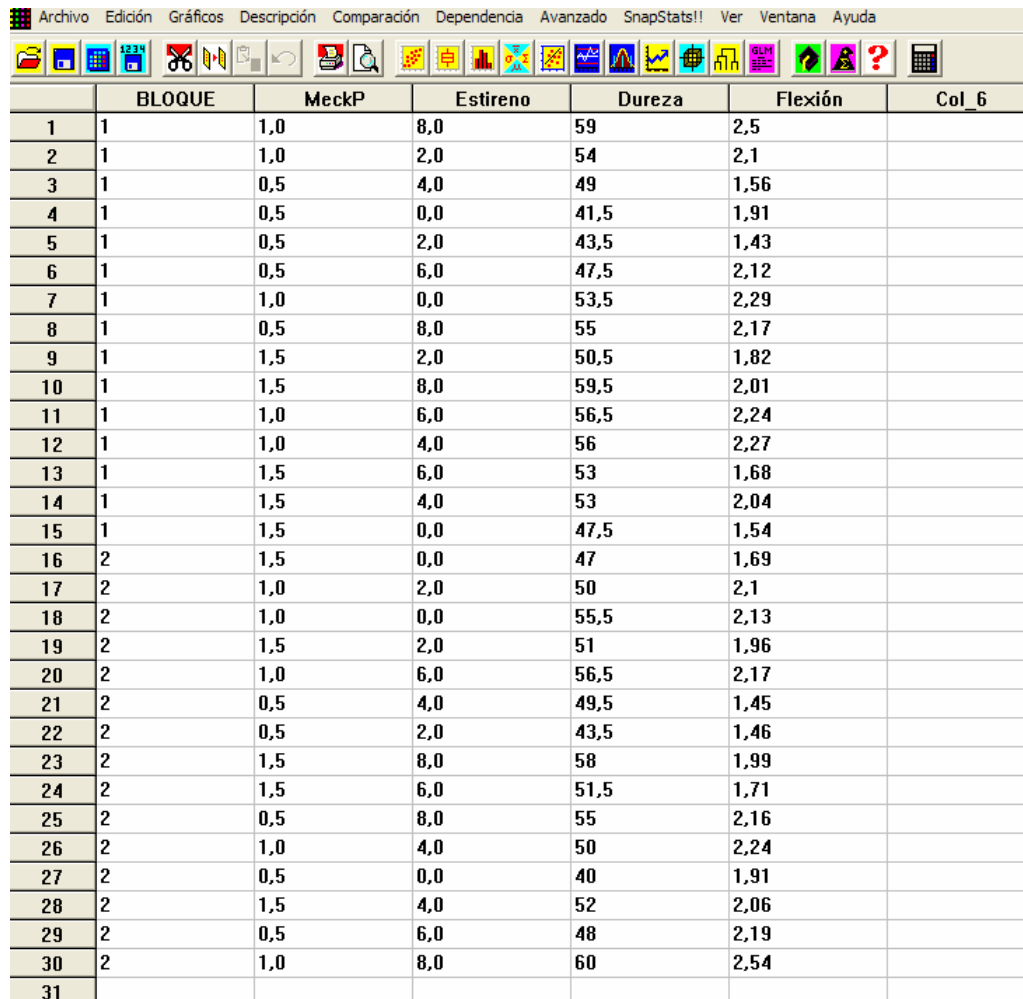
Nº Experimento	Fuerza (N)	Réplica (N)	Medidas de la probeta (mm)			L (mm)	S (N/mm <sup>2</sup> )	Réplica
	P	P2	b	d	Z			S2 (N/mm <sup>2</sup> )
1	3,42	3,41	12,98	3,71	128,61	100	1,91	1,91
2	3,98	3,7	12,92	3,67	129,27	100	2,29	2,13
3	2,75	3,02	12,76	3,74	129,59	100	1,54	1,69
4	2,2	2,25	12,76	3,47	128,37	100	1,43	1,46
5	3,3	3,3	12,75	3,51	129,02	100	2,1	2,10
6	3,05	3,27	12,9	3,6	129,06	100	1,82	1,96
7	2,92	2,7	12,93	3,8	128,99	100	1,56	1,45
8	3,77	3,72	12,8	3,6	129,2	100	2,27	2,24
9	3,87	3,9	13,1	3,8	128,38	100	2,04	2,06
10	4,45	4,6	12,94	4,03	128,32	100	2,12	2,19
11	4,7	4,55	12,81	4,05	128,65	100	2,24	2,17
12	4,38	4,44	12,85	4,5	128,64	100	1,68	1,71
13	4,38	4,35	12,92	3,95	128,67	100	2,17	2,16
14	4,63	4,7	12,82	3,8	128,8	100	2,5	2,54
15	3,95	3,9	12,85	3,91	128,45	100	2,01	1,99

Tabla #10: Mediciones experimentales de la fuerza de flexión (S).

#### 5.3.3.4 Análisis y resultados del diseño de experimentos

Una vez realizados los ensayos a las probetas, se ingresaron los resultados al software Statgraphics para la realización del análisis.

Se ingresaron los datos para un diseño multifactorial, con dos variables de respuesta, dos factores experimentales, una réplica y los rangos escogidos anteriormente para los niveles, así:



	BLOQUE	MeckP	Estireno	Dureza	Flexión	Col_6
1	1	1,0	8,0	59	2,5	
2	1	1,0	2,0	54	2,1	
3	1	0,5	4,0	49	1,56	
4	1	0,5	0,0	41,5	1,91	
5	1	0,5	2,0	43,5	1,43	
6	1	0,5	6,0	47,5	2,12	
7	1	1,0	0,0	53,5	2,29	
8	1	0,5	8,0	55	2,17	
9	1	1,5	2,0	50,5	1,82	
10	1	1,5	8,0	59,5	2,01	
11	1	1,0	6,0	56,5	2,24	
12	1	1,0	4,0	56	2,27	
13	1	1,5	6,0	53	1,68	
14	1	1,5	4,0	53	2,04	
15	1	1,5	0,0	47,5	1,54	
16	2	1,5	0,0	47	1,69	
17	2	1,0	2,0	50	2,1	
18	2	1,0	0,0	55,5	2,13	
19	2	1,5	2,0	51	1,96	
20	2	1,0	6,0	56,5	2,17	
21	2	0,5	4,0	49,5	1,45	
22	2	0,5	2,0	43,5	1,46	
23	2	1,5	8,0	58	1,99	
24	2	1,5	6,0	51,5	1,71	
25	2	0,5	8,0	55	2,16	
26	2	1,0	4,0	50	2,24	
27	2	0,5	0,0	40	1,91	
28	2	1,5	4,0	52	2,06	
29	2	0,5	6,0	48	2,19	
30	2	1,0	8,0	60	2,54	
31						

Figura #4: Tabulación de datos en el software statgraphics.

Luego de ingresar los resultados de las pruebas de dureza y flexión, se realizó por medio del software Statgraphics un análisis ANOVA factorial

### a. Resumen del Procedimiento

Variables dependiente: Dureza y flexión.

Factores: MEK-p y Estireno

Número de casos completos: 30

Este procedimiento realiza un análisis multifactorial de la varianza para los resultados de las pruebas de dureza y flexión. Realiza varios test y gráficos para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo en las variables de respuesta. Teniendo datos suficientes, también analiza las interacciones significativas entre los factores. Los F-test en la tabla ANOVA permiten identificar los factores significantes. Para cada factor significativo, los Test de Rangos Múltiples indican qué medias son significativamente diferentes de otras. El Gráfico de Medias y el Gráfico de Interacción indican los efectos significantes.

### - Análisis de la varianza para la dureza y la flexión

Análisis de la Varianza para Dureza - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Va
EFECTOS PRINCIPALES					
A:MeckP	316,55	2	158,275	72,22	0,0
B:Estireno	378,383	4	94,5958	43,16	0,0
INTERACCIONES					
AB	73,3667	8	9,17083	4,18	0,0
RESIDUOS	32,875	15	2,19167		
-----					
TOTAL (CORREGIDO)	801,175	29			
-----					

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Figura #5: análisis de la varianza para el ensayo de dureza.



Análisis de la Varianza para Flexión - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-V
EFECTOS PRINCIPALES					
A:MeckP	1,14915	2	0,574573	181,83	0,
B:Estireno	0,58808	4	0,14702	46,53	0,
INTERACCIONES					
AB	0,85192	8	0,10649	33,70	0,
RESIDUOS	0,0474	15	0,00316		
TOTAL (CORREGIDO)	2,63655	29			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Figura #6: Análisis de la varianza para el ensayo de flexión.

La tabla ANOVA da como resultado el nivel de significancia de cada uno de los 3 factores (MEK-p, Estireno e interacción entre los dos), sobre las variables respuesta por separado (dureza y flexión). Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados tipo III (valor por defecto en el software), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. La columna P-valor nos indica que el factor es significativo en la variable respuesta, cuando este es menor que 0.05 para una confiabilidad del 95%. Como vemos en la tabla, los tres factores tanto el MEK-p como el Estireno y la interacción entre los dos tienen un P-valor menor que 0.05 y se puede concluir que los tres factores son significativos en la variabilidad de la dureza y en la variabilidad de la flexión.

- **Tabla de medias por mínimos cuadrados para la dureza Y para la flexión**

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para Dureza  
con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior	
Media Total	30	51,55				
MeckP						
0,5	10	47,25	0,468152	46,2522	48,2478	
1	10	55,1	0,468152	54,1022	56,0978	
1,5	10	52,3	0,468152	51,3022	53,2978	
Estireno						
0	6	47,5	0,604382	46,2118	48,7882	
2	6	48,75	0,604382	47,4618	50,0382	
4	6	51,5833	0,604382	50,2951	52,8715	
6	6	52,1667	0,604382	50,8785	53,4549	
8	6	57,75	0,604382	56,4618	59,0382	
MeckP según Estireno						
0,5	0	2	40,75	1,04682	38,5187	42,9813
0,5	2	2	43,5	1,04682	41,2687	45,7313
0,5	4	2	49,25	1,04682	47,0187	51,4813
0,5	6	2	47,75	1,04682	45,5187	49,9813
0,5	8	2	55,0	1,04682	52,7687	57,2313
1	0	2	54,5	1,04682	52,2687	56,7313
1	2	2	52,0	1,04682	49,7687	54,2313
1	4	2	53,0	1,04682	50,7687	55,2313
1	6	2	56,5	1,04682	54,2687	58,7313
1	8	2	59,5	1,04682	57,2687	61,7313
1,5	0	2	47,25	1,04682	45,0187	49,4813
1,5	2	2	50,75	1,04682	48,5187	52,9813
1,5	4	2	52,5	1,04682	50,2687	54,7313
1,5	6	2	52,25	1,04682	50,0187	54,4813
1,5	8	2	58,75	1,04682	56,5187	60,9813

Figura #7: Tabla de medias por mínimos cuadrados para la dureza.

Esta tabla nos muestra la dureza media para cada nivel de factores. También presenta el error estándar de cada media, los cual es una medida de su variabilidad en el muestra. Las dos columnas de la derecha muestran 95% de nivel de confianza para cada una de las medias. Estas medias e intervalos se pueden ver en los gráficos #2 y #3.

Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos LSD

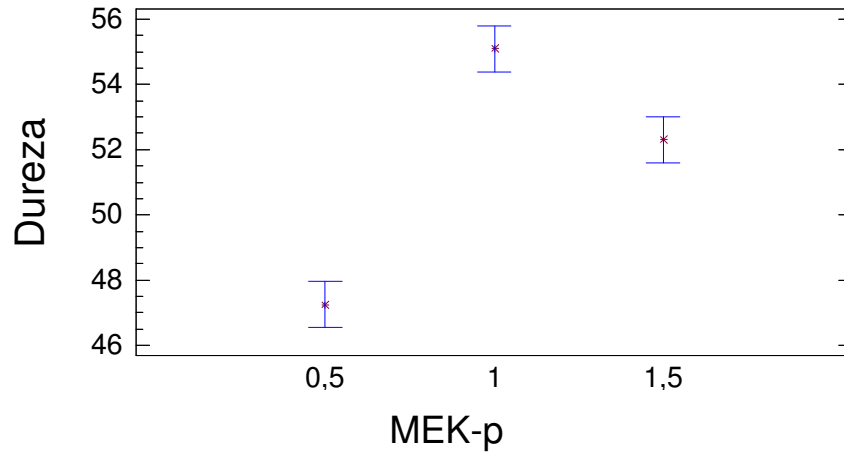


Gráfico #2: Medias y rangos, para un nivel de confiabilidad del 95%, para la dureza-MEK-p.

Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos LSD

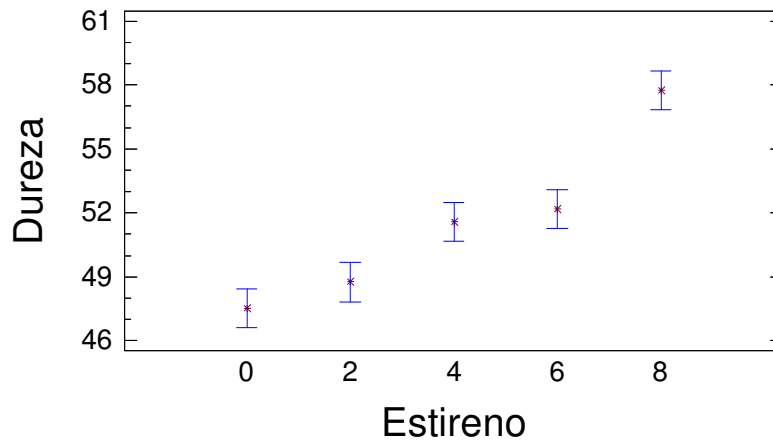


Gráfico #3: Media y rangos, para un nivel de confiabilidad del 95%, para dureza-Estireno.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para Flexión  
con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia Media		Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior	
Media Total	30	1,98133				
MeckP						
0,5	10	1,836	0,0177764	1,79811	1,87389	
1	10	2,258	0,0177764	2,22011	2,29589	
1,5	10	1,85	0,0177764	1,81211	1,88789	
Estireno						
0	6	1,91167	0,0229492	1,86275	1,96058	
2	6	1,81167	0,0229492	1,76275	1,86058	
4	6	1,93667	0,0229492	1,88775	1,98558	
6	6	2,01833	0,0229492	1,96942	2,06725	
8	6	2,22833	0,0229492	2,17942	2,27725	
MeckP según Estireno						
0,5	0	2	1,91	0,0397492	1,82528	1,99472
0,5	2	2	1,445	0,0397492	1,36028	1,52972
0,5	4	2	1,505	0,0397492	1,42028	1,58972
0,5	6	2	2,155	0,0397492	2,07028	2,23972
0,5	8	2	2,165	0,0397492	2,08028	2,24972
1	0	2	2,21	0,0397492	2,12528	2,29472
1	2	2	2,1	0,0397492	2,01528	2,18472
1	4	2	2,255	0,0397492	2,17028	2,33972
1	6	2	2,205	0,0397492	2,12028	2,28972
1	8	2	2,52	0,0397492	2,43528	2,60472
1,5	0	2	1,615	0,0397492	1,53028	1,69972
1,5	2	2	1,89	0,0397492	1,80528	1,97472
1,5	4	2	2,05	0,0397492	1,96528	2,13472
1,5	6	2	1,695	0,0397492	1,61028	1,77972
1,5	8	2	2,0	0,0397492	1,91528	2,08472

Figura #9: Tabla de medias por mínimos cuadrados para la flexión.

Esta tabla nos muestra la flexión media para cada nivel de factores. También presenta el error estándar de cada media, lo cual es una medida de su variabilidad en la muestra. Las dos columnas de la derecha muestran 95% de nivel de confianza para cada una de las medias. Estas medias e intervalos se pueden ver en las graficas #4 y #5.

Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos LSD

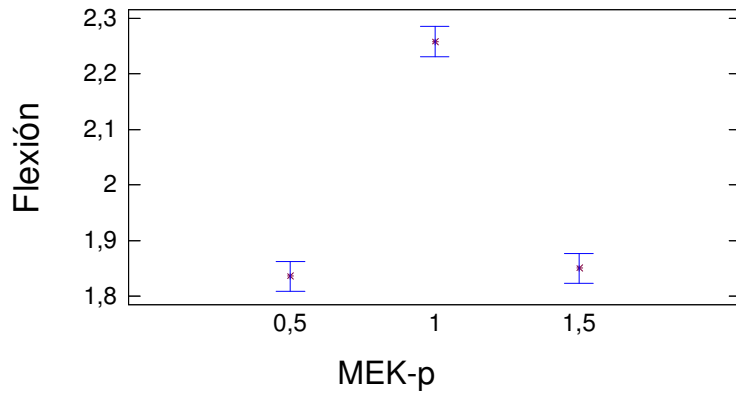


Gráfico #4: Medias y rangos, para un nivel de confiabilidad del 95%, para flexión- MEK-p.

Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos LSD

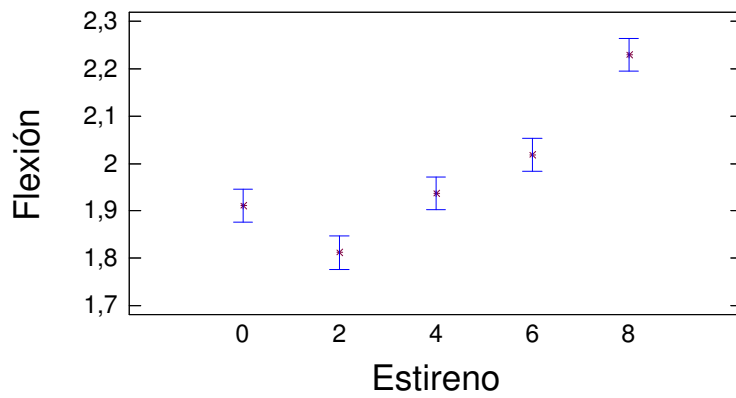


Gráfico #5: Media y rangos, para un nivel de confiabilidad del 95%, para dureza- Estireno.

## GRAFICAS DE DISPERSION

### - Ensayo de dureza

#### Representación por Código de Nivel

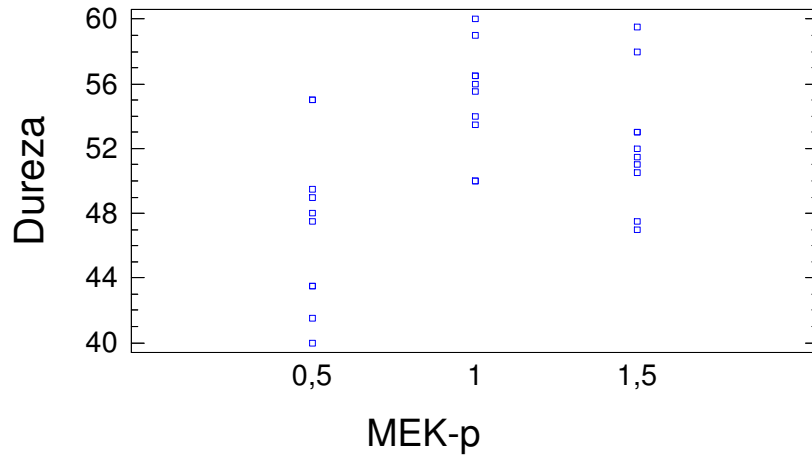


Gráfico #6: Dispersión de datos, dureza-MEK-p.

En el gráfico #6, se puede visualizar que existe una mayor dispersión de los datos cuando el factor MEK-p tiene un valor de 0.5 ml y un mayor agrupamiento en 1ml

#### Representación por Código de Nivel

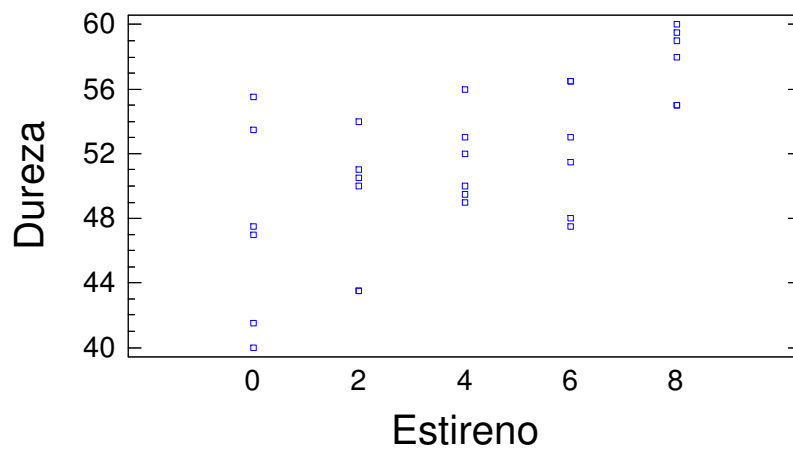


Gráfico #7: Dispersión de datos, dureza-estireno.

En el gráfico #7, se puede visualizar que existe una mayor dispersión de los datos cuando el factor Estireno tiene un valor de 0% y un mayor agrupamiento en 8%

- **Ensayo de flexión**

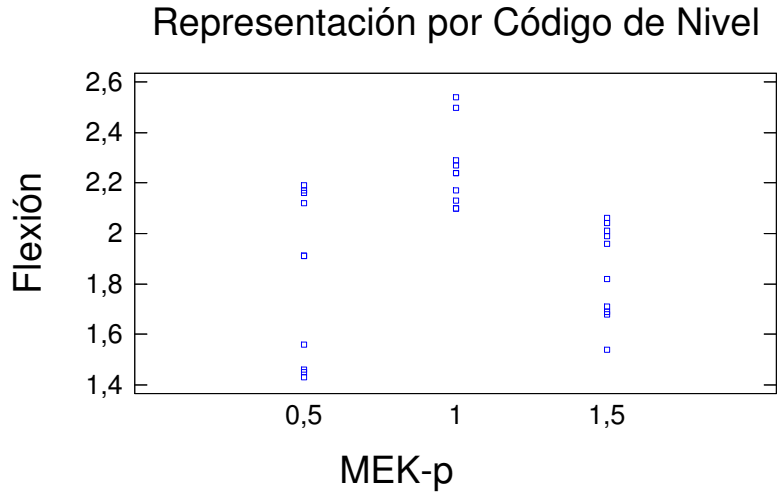


Gráfico #8: Dispersión de datos, flexión-MEK-p.

En el gráfico #8, se puede visualizar que existe una mayor dispersión de los datos cuando el factor MEK-p tiene un valor de 0.5ml y un mayor agrupamiento en 1 ml.

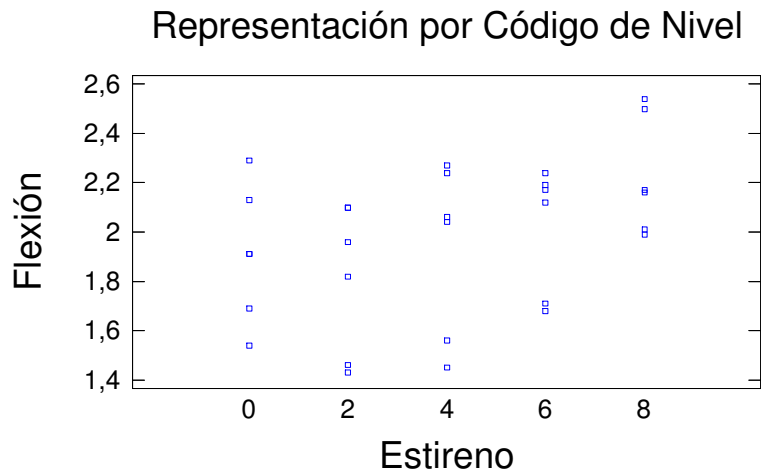


Gráfico #9, gráfico de dispersión de datos, flexión-estireno.

En el gráfico #9, se puede visualizar que existe una mayor dispersión de los datos cuando el factor Estireno tiene un valor de 0% y un mayor agrupamiento en 8%.

- **Gráficos de interacción**

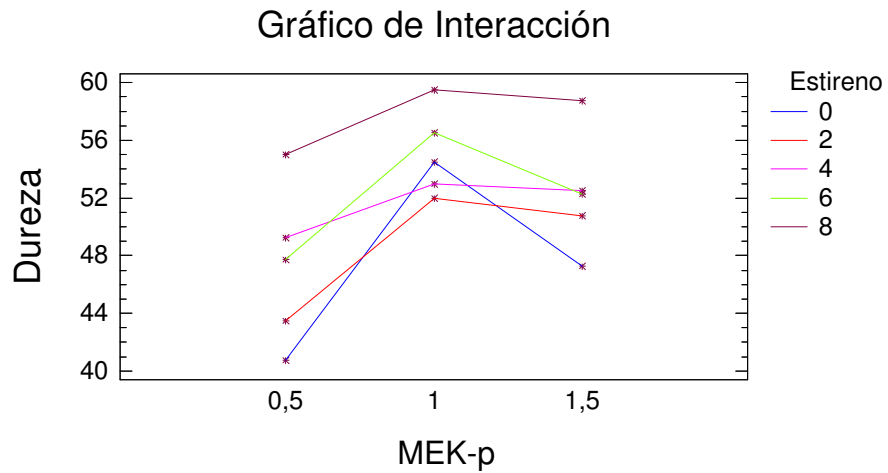


Gráfico #10: Interacción, dureza-MEK-p-Estireno.

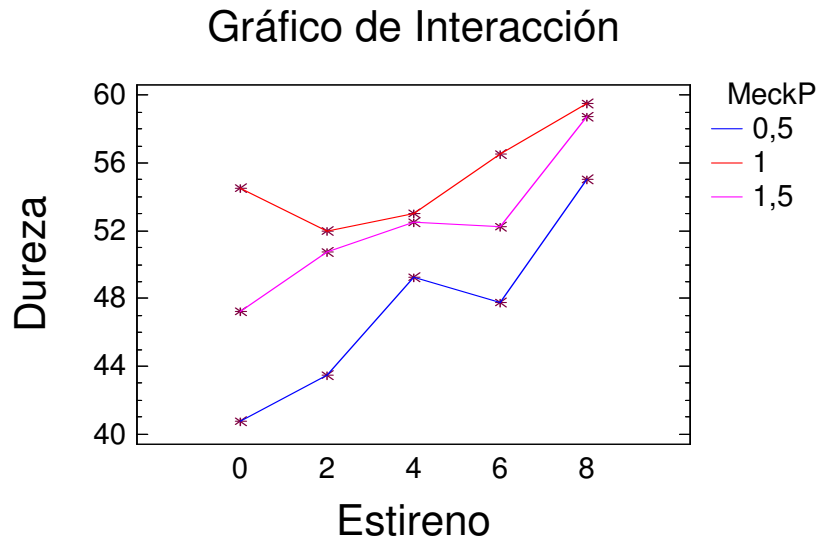


Gráfico #11: Interacción, dureza-Estireno-MEK-p.



Gráfico de Interacción

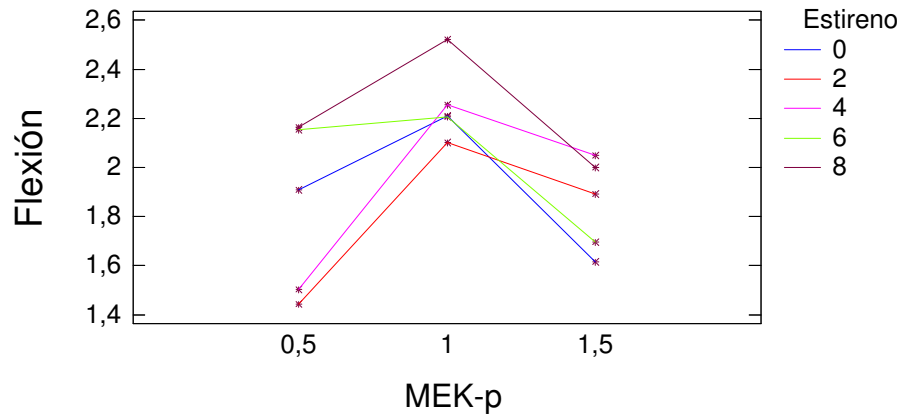


Gráfico #12: Interacción, flexión-MEK-p-Estireno.

Gráfico de Interacción

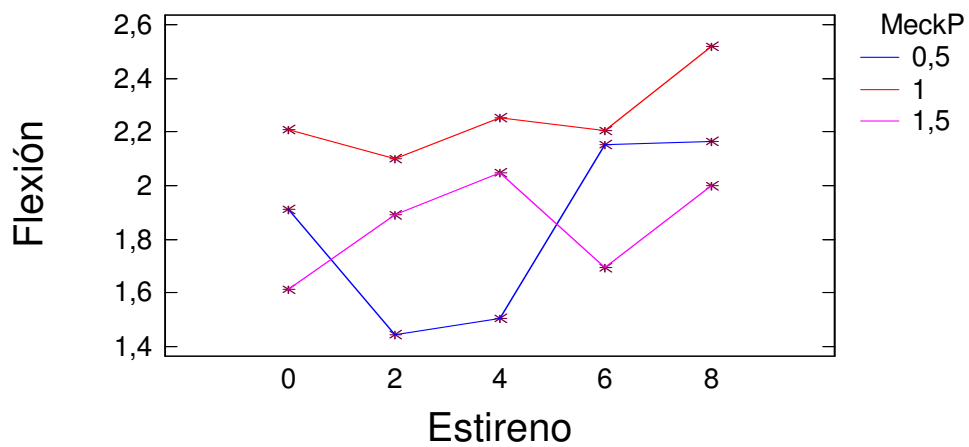


Gráfico #13: Interacción, flexión-Estireno-MEK-p.

Del análisis de las gráficas #10 a la gráfica #13, se puede escoger las cuatro mejores combinaciones de composición que presenten menor dureza y la menor fuerza de flexión, para con estas composiciones proceder a realizar el experimento de impregnación, así:

<b>Nº Experimento</b>	<b>MEK-p(ml)</b>	<b>Estireno(%)</b>
4	0,5	2
3	1,5	0
7	0,5	4
1	0,5	0

Tabla #11: Mejores composiciones Resina-MEK-p-Estireno, para dureza-flexión.

### **5.3.3.5 Descripción de la impregnación**

Como ya se dijo anteriormente, este es el proceso más importante de la plastinación, pues es en el que se incluye la resina dentro de la estructura anatómica del órgano, en la cual el polímero impregna al órgano por la acción de una fuerza de vacío, y su principio se basa en las presiones de vapor y las temperaturas de ebullición de la resina y del deshidratante, con la aplicación de niveles de descompresión progresiva, para reducir la presión dentro de la cámara de curado.

Una vez realizado el análisis del diseño de experimentos se seleccionaron 4 composiciones de resina, las cuales proporcionaron las condiciones óptimas de dureza y flexibilidad, para hacer la prueba de impregnación forzada.

Esta prueba se realiza a temperatura ambiente, utilizando como cámara de vacío una mufla de secado y dentro de ésta 4 recipientes de vidrio, cada uno con una composición diferente de resina y cada uno de estos con varias muestras de los corazones de pollo ya fijados y deshidratados.

El procedimiento que se realizó en el laboratorio, descrito detalladamente es el siguiente:

- a. Realización de las 4 preparaciones de resina y catalizador, disposición en recipientes de vidrio para poder tener buena visibilidad de las burbujas y de boca ancha para poder tener buena movilidad de los órganos.
- b. Inclusión de los 4 recipientes con las diferentes composiciones dentro de la mufla y aplicación 15 mmHg de vacío para retirar el aire de cada mezcla.
- c. Se introdujeron los corazones deshidratados directamente del alcohol isopropílico a las diferentes mezclas dentro de la cámara de impregnación siguiendo las siguientes recomendaciones:
  - Garantizando que todos los órganos queden sumergidos totalmente en la resina y que no quede ninguna zona por fuera de ella.
  - Que no quede ningún corazón presionado ni contra el fondo ni contra las paredes del envase, ni contra otro corazón, para que la superficie de cada uno esté libre y se realice la impregnación lo más parejo posible en cada órgano.
- d. Se dejó el sistema montado por 24 horas antes de comenzar a aplicar vacío, para garantizar que halla un equilibrio en el sistema.
- e. Inicialmente se fue aumentando la presión de vacío hasta que se observó la formación de burbujas que se desprendían de los órganos en una presión de 81.2 mmHg donde se dejó constante la presión, ya que este proceso se debe hacer lentamente. Este burbujeo constante se observó por un espacio de 7 horas, luego la frecuencia fue disminuyendo y a medida que esta disminuía se aumentaba la presión de vacío para garantizar que siempre se desprendieran burbujas del órgano
- f. Después de 48 horas la presión de vacío ya se había incrementado hasta 20 mmHg. En este momento las burbujas eran grandes y con una baja frecuencia de formación. La disminución en la cantidad de burbujas es debido a que la cantidad de alcohol isopropílico en el órgano va disminuyendo.
- g. Después de 96 horas de haber comenzado el proceso de impregnación con vacío, el vacuometro ya nos indicaba una presión de 15 mmHg, en este momento

las burbujas eran de un mayor tamaño y escasas (1 burbuja por minuto), en este punto se da por terminado el proceso de impregnación.

h. Se dejaron sumergidas las piezas impregnadas en la resina por 24 horas más, para minimizar la retracción de los órganos.

i. Se sacaron los órganos y se limpiaron bien, retirando los excesos de resina y destapando las cavidades de cada uno. Se dejaron a temperatura ambiente durante 24 horas antes de continuar con el proceso de curado.

#### **5.3.4 ETAPA 4: CURADO (ENDURECIMIENTO)**

En esta parte del proceso, se realiza la polimerización de la resina empleando un agente como el calor, luz UV o un compuesto endurecedor, como es el caso de este estudio, el cual utiliza Octoato de cobalto. Este endurecedor cumple la función de establecer puentes físicos entre las cadenas del polímero y determina el grado de rigidez final del órgano.

Según la técnica S-10 se pueden realizar dos tipos de curado, el rápido y el lento, cada uno con sus respectivas ventajas y desventajas. Para el proyecto se realizó el curado lento, pues es el que proporciona mayor flexibilidad a la pieza y la superficie presenta un mínimo de polímero en la superficie, con las consecuencias de una mayor retracción y mayor tiempo de proceso, la descripción de este experimento es como se describe a continuación:

a. Al terminar la etapa de impregnación se realiza una limpieza de excesos de resina presentes en los órganos y se dejan en reposo y a condiciones ambientales, esto según (2), es una pre-polimerización, la cual favorece el efecto posterior del Octoato de cobalto.

b. Se dispusieron los órganos dentro de un recipiente plástico, colgados individualmente de la tapa por medio de una pita, para evitar que estuvieran

apoyados sobre el piso o recostados contra las paredes y procurar un curado parejo de la superficie de las piezas.

c. Dentro de la cámara de curado se introdujo un pequeño recipiente con el octoato de cobalto, el cual se puso a burbujear con una manguera conectada a una bomba de pecera; este burbujeo se realizó por espacio de dos días, en los cuales, periódicamente (cada dos horas) se retiraba el exceso de resina de los corazones que se les formaba en la superficie.

d. Para el tercer día se eliminó el burbujeo en el recipiente con el octoato y se continuó limpiado los excesos de polímero de la superficie de los órganos para evitar que este solidifique y se cubriera el aspecto real de las piezas, conforme pasaban los días este exceso se tornó más viscoso y pegajoso, esta primera parte del curado se dió por terminada al quinto día cuando ya no se presentó más exceso de resina en las superficies de las piezas, y se dió por terminado el curado de la superficies.

e. Al sexto día se retiraron los corazones de la cámara de curado y se llevaron a bolsas de plástico con cierre hermético. En este paso el exceso de los gases del endurecedor presente en la pieza se van difundiendo hacia el interior de esta completando la polimerización de superficie a profundidad.

f. Se da por terminado el proceso de plastinación, de acuerdo a la literatura (2). Los órganos pequeños tardan entre 2 y 3 meses en el proceso de curado.

g. A los tres meses se sacaron los órganos de las bolsas y se realizaron las pruebas correspondientes al chequeo de la plastinación.

### **5.3.5 PRUEBAS REALIZADAS A LOS ÓRGANOS PLASTINADOS**

Estas pruebas se realizaron para verificar el grado de efectividad de las etapas de impregnación y curado.

#### **5.3.5.1 Inspección visual:**

Se procedió a partir los órganos a la mitad y verificar visualmente si la resina había impregnado los tejidos internos y si ésta estaba completamente curada (endurecida).

#### **5.3.5.2 Inspección olfativa:**

La resina está curada cuando no desprende olores de Estireno, este tiene un olor característico que es detectado fácilmente con una baja concentración.

#### **5.3.5.3 Dureza**

Con el durómetro Shore A se realizó la prueba de dureza para los cuatro experimentos. No se utilizó el durómetro Shore D debido a que arrojaba valores inferiores a los de las probetas del diseño de experimentos y se necesitaron valores más precisos. El durómetro shore A es utilizado para medir dureza en polímeros de baja densidad.

### **5.3.6 RESULTADOS DE LAS PRUEBA DE CURADO**

Con los corazones que se realizó el curado, y se encontraban marcados con indicadores de colores, se partieron por el medio con el fin de analizar sus características tanto por dentro como por fuera y se sometieron a una análisis de las pruebas descritas anteriormente para realizar una comparación final entre los diferentes experimentos para las concentraciones de resina, su resultados se muestran en la siguiente tabla.

<b>N° experimento</b>	<b>Color</b>	<b>Olor</b>	<b>Tactosidad</b>	<b>Internamente</b>	<b>Dureza (Shore A)</b>
4	Blanco	Libre de estireno	Seco	Plastinado	55
3	Plateado	Libre de estireno	Seco	Plastinado	65
7	Azul	Libre de estireno	Seco	Plastinado	62
1	Naranja	Libre de estireno	Un poco pegajoso	Plastinado	70

Tabla #12: Resultados prueba de dureza para órganos plastinados.

## 6. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Realizando una análisis para los anteriores resultados, se puede concluir que las pruebas N°4, N°3y N° 7 curaron completamente para un tiempo de tres meses que se le dio a esta etapa del proceso, pues no presentan olor fuerte a estireno y están secos tanto por fuera como por dentro. El ensayo N°1 no curó completamente para la fecha de realización de este informe pero no significa que no lo valla a hacer completamente, ya que las muestras previas para medir la flexión y la dureza, lo hicieron, simplemente necesita mayor tiempo para esta etapa. Por otra parte de acuerdo a la dureza el órgano correspondiente al ensayo N°4, es el que posee menor valor para esta prueba, esto nos dice que es un órgano menos duro y que nos puede representar mejor la realidad de estos. Los otros órganos no difieren mucho en esta prueba pero el objetivo de este trabajo es encontrar el punto óptimo y en este caso el ensayo N° 4 nos arroja la menor dureza.

Como respuesta a la experimentación realizada, el ensayo que posee las condiciones óptimas de operación es el ensayo N°4, el cual dió como resultado en las pruebas realizadas a las probetas en conjunto fue la que arrojó menor valor de dureza y fuerza de flexión. Además luego de la etapa de curado se comprobó que estaba completamente seco y además no desprendía olores a estireno, por último en la prueba de dureza de los órganos ya curados dio el resultado mínimo de dureza entre los otros experimentos.

El proceso óptimo que arroja este estudio para obtener órganos plastinados utilizando la resina cristalán 872 es:

- Fijación y deshidratación: T: 4°C
- Impregnación: Resina: Cristalán 872, composición de la resina: 0.5 %V en MEK-p y 2%V de estireno. Presión de vacio: 50 – 12 mmHg.



## 7. CONCLUSIONES

- En el proceso de plastinación, las etapas de fijación y deshidratación son en las que se presenta un mayor grado de retracción en el órgano; es posible disminuir este porcentaje realizando el proceso a temperaturas bajas.
- En este trabajo el ensayo realizado a Temperatura de 4°C dió menor porcentaje de retracción que el realizado a temperatura ambiente, esto es importante para que el órgano conserve un aspecto lo más real posible.
- La resina cristalán 872 se endurece y pierde flexibilidad a medida que se aumenta el porcentaje de MEK-p (catalizador), debido a que éste actúa aumentando el peso molecular de las cadenas del polímero, elongando las cadenas e incorporando a ellas grupos moleculares pesados.
- La resina cristalán 872 se endurece y pierde flexibilidad a medida que se aumenta el porcentaje de Estireno, debido a que el Estireno actúa como solvente en el polímero y éste hace que pierda viscosidad y a su vez flexibilidad.
- La resina de poliéster Cristalán 872 usada para este estudio reúne las características óptimas para la inclusión en órganos con un grado mínimo de retracción y evita la deformación de la pieza.

- Las condiciones de operación y composición de materias primas óptimas del proceso de plastinación utilizando la resina cristalán 872 son:
  - Fijación y deshidratación: T: 4°C
  - Impregnación: Resina: Cristalán 872, composición de la resina: 0.5 %V en MEK-p y 2%V de Estireno.
  - Presión de vacío: 50 – 12 mmHg.
- Este método puede ser aplicable a todo tipo de órganos animales para los cuales es posible mantener todas sus características anatómicas y físicas.

## 8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda en futuras investigaciones evaluar el tiempo de cada una de las etapas variando el volumen del órgano, para establecer así tiempos más exactos en el proceso de plastinación.
- Se recomienda en el proceso de fijación, utilizar otras concentraciones para el formol u otros agentes de fijado, tales como alcohol etílico absoluto, alcohol metílico, ácido ósmico y bicromato de potasio, para disminuir aun más la retracción en el órgano tratado.
- Se recomienda realizar ensayos con los fijadores nombrados anteriormente o la combinación de estos para disminuir la decoloración en el órgano, en el proceso de fijación.
- Se recomienda en la etapa de curado realizar ensayos con otro tipo de agentes de secado como lo son el calor y la luz ultravioleta.
- Se recomienda realizar ensayos de plastinación no solo en órganos animales y humanos sino también en vegetales.
- Se recomienda para disminuir el tiempo de plastinación realizar las etapas de fijación y deshidratación simultáneamente.



## 9. GLOSARIO

- LD50: Dosis letal 50, dosis calculada que se espera cause la muerte del 50% del total de la población animal experimental.
- PEL: Límites permisibles de exposición.
- OSHA: Administración de salud y seguridad ocupacional.
- Pe: Punto de ebullición.
- Pf: Punto de fusión.
- ppm: Partes por millón.
- ASTM: American Society for Testing and Materials.
- Autólisis: Rompimiento químico de la célula, generalmente bajo la influencia de enzimas o por la reproducción de virus dentro de la célula.
- Turba: Suelo sin consolidar formado por materia vegetal fibrosa sin descomponer, o ligeramente descompuesta que se acumula en un ambiente anegado.
- Exotermia: Desprendimiento de calor.
- Impregnación: Acción de penetrar las partículas de un cuerpo en las de otro.
- Reticulación: Implica la formación de una red tridimensional formada por la unión de las diferentes cadenas poliméricas.
- Probeta: Pieza de pequeño tamaño, representativa de la calidad de un material de construcción. Su forma, dimensiones, fabricación y conservación están generalmente normalizadas, y se utiliza para ensayar dicho material.

- Líquido tisular: Es el líquido contenido en el intersticio o espacio entre las células. Alrededor de una sexta parte de los tejidos corporales corresponden al intersticio, y en promedio una persona adulta tiene cerca de 11 litros de líquido intersticial proveyendo a las células del cuerpo nutrientes y removiendo sus desechos.
- Retracción: Encogimiento o reducción de un órgano o tejido.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

(1) JIMENEZ, MEJIA. Ricardo. Plastinación, una técnica moderna al servicio de la anatomía. Iatreia, Revista médica de la Universidad de Antioquia. Vol. 18, Nº1, marzo 2005: 99-106.

(2) LATORRE R., AZQUEZ J. M., GIL F., RAMIREZ G., LOPEZ-ALBORS O., AYALA M., ARENCIBIA A. XI<sup>th</sup> Congress on Plastination and Bienal Meeting of the International Society for Plastination, San Juan (Puerto Rico), (2002) Anatomy of the Equine Tarsus: a Study by mri and Macroscopic Plastinated Sections (s-10 and p-40).

(3) Literatura técnica, Cristalán 872, Andercol S.A., fecha de elaboración, junio 4 de 2002.

(4) Annual book of ASTM standards 1976. Plastics-General test methods; Nomenclatura. Editorial Staff. Printed in Easton, Md USA.

(5) McGUIJAN, F. J. Psicología experimental, 6<sup>a</sup>. Ed., Prentice-Hall, Hispanoamericana, México, 1996.

(6) Davis, E. Hammer. Ensayo e inspección de los materiales en ingeniería, Compañía Editorial Continental S.A., México 1979, 565 páginas.

(7) DIEZ, P. Agustín. Memorias del curso, El poliéster insaturado: Un mundo de posibilidades, transformación y usos, Organizan, Andercol S.A. y grupo de investigación sobre nuevos materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana, junio 11 al 26 de 2006, Medellín.

- (8) Sociedad anatómica española,  
<http://www.sociedadanatomica.es/SAE/HOME.html>, accesada, junio 2008.
- (9) OMS, Organización mundial de la salud, <http://www.who.int/es/index.html>,  
accesada, julio 2008.
- (10) Plastination, <http://www.bodyworlds.com/en.html>, accesada junio 2008.
- (11) VON HAGENS G. Heidelberg Plastination Folder. Anatomisches Institut I,  
Universitat Heidelberg, 1985-1986.
- (12) JIMÉNEZ R, ISAZA O. Use of polymers in plastination with human specimens.  
International Plastination Society ISP Journal 2002; 17 (abstract): 6.
- (13) MARTINEZ, G. J. R. Plastinación: La técnica moderna para la obtención de  
macro especias de mayor utilidad en el proceso de enseñanza aprendizaje. Arch.  
Anat. De Costa Rica, 1992, 1:150.
- (14) ORBES, PORTILLAN. Jairo. Uso de polímeros para la inclusión de  
especímenes humanos. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 1996.



## 11. ANEXOS