



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la máquina Stratasys Eden 260V

Ángela María Cárdenas Castrillon

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá D.C, Colombia

2017

Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la máquina Stratasys Eden 260V

Ángela María Cárdenas Castrillon

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Directora:

Ingeniera Irma Angarita Moncaleano

Codirector:

Ingeniero Ernesto Córdoba Nieto

Línea de Investigación:

Desarrollo tecnológico

Grupo de Investigación:

Diseño Manufactura y Automatización DIMA-UN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá D.C, Colombia

2017

DEDICATORIA

Al Creador, a mis padres, a mis hermanos, a mi pareja, a mi hija María Alejandra, mi directora de tesis, mi codirector de tesis y a todas las personas que siempre de una u otra manera me han enseñado que mientras haya ganas de luchar hay esperanza de vencer. Que la imagen que irradiamos con nuestra presencia se puede llamar el éxito. He fallado una y otra vez en mi vida, por eso he conseguido el éxito, el lema de los ganadores.

No he seguido los pasos que otros ya siguieron, he seguido los pasos de magia que hay en mí, no canto los cantos que otros ya cantaron, canto los cantos que mi corazón canta; el ser yo misma ha marcado mi alma y mi corazón con mi vida y profesión.

Agradecimientos

La autora de la tesis manifiesta su agradecimiento:

- A la Ingeniera Irma Angarita Moncaleano. Profesora del Departamento de Ingeniería Mecánica – Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia y Directora de la tesis, por su paciencia, por su inmensa sabiduría, por su tiempo, asesoría, apoyo incondicional y demás contribuciones por las cuales se desarrollo y culmino esta tesis.
- Al Ingeniero Ernesto Córdoba. Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia y codirector del proyecto, por su colaboración y asesorías para el desarrollo de esta tesis.
- A el Químico Cesar A. Sierra. Profesor Asociado del Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia, por su colaboración y asesorías dadas continuamente durante el desarrollo de algunos criterios durante la investigación.
- A el Ingeniero Mecatrónico Camilo Eduardo Quijano Gómez de la Universidad Nacional de Colombia, por su colaboración y asesorías necesarias para el ensamble, programación y control del gripper.

Resumen

La finalidad de la impresión 3D es que una máquina sea capaz de construir estructuras físicas volumétricas. Los resultados son elementos completamente personalizados hechos de un solo cuerpo, el que sirve por si solo o puede ser parte de una estructura más compleja. Se habla de "impresión" ya que el proceso es similar al que se utiliza hoy en las impresoras en papel, pero en lugar de imprimir tinta sobre una hoja plana se deposita un polímero fotosensible en áreas de dos dimensiones predefinidas por modelos CAD y al construirse cada nueva capa se genera la figura tridimensional, todo para conformar un objeto tangible.

Al apropiarse esta nueva tecnología los especímenes a evaluar impresos tienen características semejantes al MultiJet Printing Systems (MJP) y Digital Light Processing (DLP) en acabado superficial, calidad y orientación de llenado, aunque su construcción no se ejecuta de igual forma. Por lo que es adecuado ejecutar pruebas como: calorimetría diferencial de barrido, espectroscopia infrarroja, espectroscopia infrarroja con módulo ATR, control dimensional, rugosidad, densidad, absorción de agua, tensión, impacto, flexión, dureza, análisis de falla, con los cuales se analizó adecuadamente las propiedades físico-mecánicas y la conducta que toma el material según la orientación de la construcción influyendo explícitamente en el comportamiento de las piezas impresas, en base a estos resultados se imprimió un prototipo de producto industrial real: pinza ensamblada (gripper), en donde sus movimientos fueran ejecutados sin ningún tipo de unión metálicas. Finalmente dentro de las conclusiones se puede mencionar a manera general que el proceso Polyjet es un proceso flexible con limitantes en su tamaño para la impresión de sus prototipos. Con los resultados de los ensayos se confirma que las piezas son anisotrópicas como resultado del proceso.

Palabras clave: Impresión, polímero, fotosensible, acabado, calidad, orientación, prototipo.

Abstract

The purpose of 3D printing is for a machine to be able to construct volumetric physical structures. The results are completely personalized elements made of a single body, which serves by itself or can be part of a more complex structure. It is called "printing" since the process is similar to that used today in paper printers, but instead of printing ink on a flat sheet photosensitive polymer is deposited in two-dimensional areas predefined by CAD models and when each new layer is generated the three-dimensional figure, everything to form a tangible object.

By appropriating this new technology, the printed test specimens have characteristics similar to MultiJet Printing Systems (MJP) and Digital Light Processing (DLP) in surface finish, quality and fill orientation, although their construction is not executed in the same way. Therefore it is appropriate to perform tests such as differential scanning calorimetry, infrared spectroscopy, infrared spectroscopy with ATR module, dimensional control, roughness, density, water absorption, stress, impact, flexure, hardness, failure analysis, with which analyze adequately the physical-mechanical properties and the behavior that the material takes according to the orientation of the construction, explicitly influencing the behavior of the printed parts. Based on these results, a real industrial product prototype was printed: gripper, where his movements were executed without any kind of metal union. Finally within the conclusions it can be mentioned in a general way that the Polyjet process is a flexible process with limitations in its size for the printing of its prototypes. With the results of the tests it is confirmed that the pieces are anisotropic as a result of the process.

Keywords: Printing, polymer, photosensitive, finishing, quality, orientation, prototype.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XX
Introducción	1
1. Proceso.....	5
1.1 Clasificación de los sistemas de manufactura aditiva	8
1.2 Proceso básico del prototipado rápido.....	11
1.3 Modelado por impresión 3D	12
1.3.1 Tecnología Polyjet.....	13
1.4 La máquina de impresión 3D Stratasys Objet Eden260V	15
1.4.1 Especificaciones técnicas de la impresora Objet Eden260V	16
2. Material	19
2.1 Polímeros acrílicos	20
2.2 Aditivos	24
2.3 Polímeros fotosensibles	26
2.3.1 Procesos foto-físicos	27
2.3.2 Reacciones fotoquímicas	28
3. Pruebas y ensayos	31
3.1 Material	32
3.2 Parámetros impresión	33
3.3 Identificación del polímero.....	35
3.3.1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	36
3.3.2 Espectroscopia infrarroja por transmisión.....	38
3.3.3 Espectroscopia infrarroja por ATR (Reflexión Total Atenuada)	39
3.4 Metrología dimensional	41
3.4.1 Control dimensional.....	42
3.4.2 Rugosidad.....	45
3.5 Propiedades físicas	47
3.5.1 Densidad.....	48
3.5.2 Absorción de agua.....	50
3.6 Propiedades mecánicas	51
3.6.1 Tensión	52

XII Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

3.6.2	Impacto	53
3.6.3	Flexión	55
3.6.4	Dureza	57
3.7	Características macroscópicas de las superficies de falla	60
4.	Resultados y análisis	67
4.1	Identificación del polímero.....	67
4.1.1	Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	68
4.1.2	Espectroscopia infrarroja por ATR (Reflexión Total Atenuada)	77
4.2	Metrología dimensional	82
4.2.1	Control dimensional.....	82
4.2.2	Rugosidad.....	88
4.3	Propiedades físicas	106
4.3.1	Densidad.....	106
4.3.2	Absorción de agua.....	108
4.4	Propiedades mecánicas	110
4.4.1	Tensión	110
4.4.2	Impacto	117
4.4.3	Flexión	121
4.4.4	Dureza	126
4.5	Características macroscópicas de las superficies de falla	132
4.6	Fabricación de prototipo industrial	138
4.6.1	Desarrollo del gripper	138
5.	Conclusiones y recomendaciones	149
5.1	Conclusiones	149
5.2	Recomendaciones.....	150
A.	Anexo: Estudio R&R por métodos de promedios y rangos.....	153
B.	Anexo: Rugosidad.....	165
C.	Anexo: Dureza.....	167
D.	Anexo: Características macroscópicas de las superficies de falla	171
E.	Anexo: Fabricación de prototipo industrial	183
	Bibliografía	189

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Aspectos claves de la manufactura aditiva [4]	7
Figura 1-2 Impresora Multi-jet modelling [60, 61]	13
Figura 1-3 Proceso tecnología Polyjet [10]	14
Figura 1-4 Postproceso de remoción del segundo material: soporte [62]	15
Figura 1-5 Impresora 3D Objet Eden 260V	16
Figura 3-1 Especificaciones del proceso maquina Stratasys Eden 260V	31
Figura 3-2 Mapa conceptual tesis	32
Figura 3-3 Termograma típico de un polímero semicristalino [113]	37
Figura 3-4 Preparación de la muestra para la prueba DSC	37
Figura 3-5 Espectro de transmisión de una lámina de poliestireno (HIPS) presionada a 130°C: HH101 BP CHEMICALS [48]	41
Figura 3-6 Espectro por ATR de una lamina de poliestireno (HIPS) HM101 BP CHEMICALS [48]	41
Figura 3-7 Rasgos de la textura de una superficie [64]	45
Figura 3-8 Microscopio Confocal Láser.....	46
Figura 3-9 Distribución de las posiciones para las mediciones de rugosidad (mm)	47
Figura 3-10 Preparación de las probetas para el ensayo de densidad.....	49
Figura 3-11 Preparación de las probetas para el ensayo de absorción de agua.....	51
Figura 3-12 Orientación de las probetas para pruebas de tensión [50]	53
Figura 3-13 Orientación de las probetas en la bandeja de impresión de la maquina Stratasys Objet Eden 260V	54
Figura 3-14 Ilustración de la prueba impacto Izod con muesca y las respectivas probetas a utilizar de acuerdo a su orientación, durante el montaje	55
Figura 3-15 a) Distribución del esfuerzo y tensiones normales, b) Distribución de la tensión de corte y c) Sección transversal de la muestra [51]	56

Figura 3-16 Ilustración de la prueba de flexión, a) Orientación de las probetas en la bandeja de impresión, b) Probetas impresas en la bandeja y c) Ensayo de flexión utilizando el método de tres puntos para la probeta 5 HS.....	57
Figura 3-17 Durómetro	59
Figura 3-18 Esquema del microscopio electrónico de barrido [65]	61
Figura 3-19 Diferentes zonas que se observan en la fractografía de una varilla de vidrio [112]	63
Figura 3-20 Área seleccionada SEM para muestras de impacto	64
Figura 3-21 Área seleccionada SEM para probetas de tensión	65
Figura 4-1 Eventos térmicos de una muestra medida por DSC [66].....	70
Figura 4-2 Termograma del análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) VeroBlue RGD840 sólido.....	71
Figura 4-3 Termograma doble barrido del análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) para el material VeroBlue RGD840 en su segundo barrido	73
Figura 4-4 Espectro IR VeroBlue RGD840 líquido	75
Figura 4-5 Espectro IR-ATR VeroBlue RGD840 líquido	77
Figura 4-6 Espectro IR-ATR VeroBlue RGD840 sólido	79
Figura 4-7 Estructura del metacrilato o metilmetacrilato [57]	81
Figura 4-8 Modelamiento de muestras: a) Cubo S1, b) Cubo R1, c) Cubo S2, d) Cubo R2, e) Rectángulo S1, f) Rectángulo R1, g) Rectángulo S2, h) Rectángulo S2,, i) Cubo S4, j) Cubo R4, k) Escalera triangular, i) Cuadrado agujero central sin radio	83
Figura 4-9 Modelamiento de muestras: m) Cuadrado agujero central con radio interno, n) Escalera sin radio, o) Escalera radio externo, p) Escalera radio interno, q) Escalera radio completo, r) Geometría libre elección	84
Figura 4-10 Distribución de las posiciones para las mediciones de rugosidad (mm)	88
Figura 4-11 Perfilometro luz blanca, Resultados plano X-Y, punto A	89
Figura 4-12 Topografía 3D área evaluada punto A referencia: cuadrante azul	90
Figura 4-13 Superficie real punto A, lente aumento 5x, a) Altura: nivel bajo, b) Altura: nivel alto.....	91
Figura 4-14 Imagen monocromática de superficie real punto A, lente aumento 50x.....	92
Figura 4-15 Textura superficial punto A, lente de aumento a) 20x y b) 10x	92
Figura 4-16 Visualización de los datos hallados durante la medición de la rugosidad.....	94
Figura 4-17 Rugosidad presentada en los puntos de medición del plano X-Y (Azul).....	97

Figura 4-18 Rugosidad presentada en los puntos de medición del plano Z-X (rojo).....	101
Figura 4-19 Rugosidad presentada en los puntos de medición del plano Z-Y (Verde) ..	105
Figura 4-20 Muestra densidad.....	107
Figura 4-21 Muestra absorción de agua	108
Figura 4-22 Absorción de agua WA (%) promedio en un tiempo de 24 horas.....	109
Figura 4-23 Curvas de tracción características de materiales poliméricos [85].....	111
Figura 4-24 Probeta tensión	111
Figura 4-25 Curva esfuerzo-deformación probetas HQ, orientaciones a) 0°, b) 45° y c) 90°	113
Figura 4-26 Curva esfuerzo-deformación probetas HS, orientaciones a) 0°, b) 45° y c) 90°	115
Figura 4-27 Curva esfuerzo-deformación esquemática para un polímero semicristalino, a) varios estados de deformación de la probeta de acuerdo al esfuerzo aplicado [82, 84]	116
Figura 4-28 Probeta impacto para prueba Izod	117
Figura 4-29 Modo de fallo de propagación de grietas [51]	119
Figura 4-30 Fracturas presentada en las muestras HQ	120
Figura 4-31 Fracturas presentadas en las muestras HS	120
Figura 4-32 Probeta ensayo flexión	122
Figura 4-33 Probeta flexión impresa VeroBlue RGD840 sólido, a) soporte Default y b) soporte Heavy.....	122
Figura 4-34 Probeta ensayo dureza.....	126
Figura 4-35 Distribución de las posiciones donde se realizo las mediciones de dureza (mm).....	127
Figura 4-36 Medición probeta 3 plano X-Y, orientación 0°, punto de medición 1	127
Figura 4-37 Promedio dureza shore D, a) plano X-Y, b) plano Z-X, c) plano Z-Y	131
Figura 4-38 Probetas de impacto con mayor absorción de energía, a) Probeta 3 HQ 0°, b) Probeta 3 HQ 45°, c) Probeta 1 HQ 90°	133
Figura 4-39 Probetas de impacto con mayor absorción de energía, a) Probeta 1 HS 0°, b) Probeta 1 HS 45°, c) Probeta 2 HS 90°	134
Figura 4-40 Probetas de impacto con menor absorción de energía, a) Probeta 1 HQ 0°, b) Probeta 5 HQ 45°, c) Probeta 5 HQ 90°	135
Figura 4-41 Probetas de impacto con menor absorción de energía, a) Probeta 4 HS 0°, b) Probeta 3 HS 45°, c) Probeta 5 HS 90°.....	135

Figura 4-42 Probetas de tensión con mayor resistencia a tensión, a) Probeta 5 HQ 0°, b) Probeta 4 HQ 45°, c) Probeta 4 HQ 90°	136
Figura 4-43 Probetas de tensión con mayor resistencia a tensión, a) Probeta 3 HS 0°, b) Probeta 1 HS 45°, c) Probeta 4 HS 90°	137
Figura 4-44 Probetas de tensión con menor resistencia a la tensión, a) Probeta 4 HQ 0°, b) Probeta 6 HQ 45°, c) Probeta 5 HQ 90°	137
Figura 4-45 Probetas de tensión con menor resistencia a la tensión, a) Probeta 1 HS 0°, b) Probeta 3 HS 45°, c) Probeta 2 HS 90°	138
Figura 4-46 Diagrama de fuerzas gripper	140
Figura 4-47 Vista frontal y lateral del gripper ensamblado antes de su impresión, tamaño de la pieza 153,07 x 167.53 x 18,05 mm	141
Figura 4-48 Detalle modificación uniones (articulaciones) gripper	141
Figura 4-49 Plato robot Motoman.....	142
Figura 4-50 Modelo plato unión gripper con Motoman, tamaño: 49,99 x 49,99 x6 mm..	142
Figura 4-51 Minigripper modelado, tamaño 105,735 x 82,118 x 7,065 mm.....	143
Figura 4-52 Lote de minigripper con sus respectivas orientaciones en la bandeja de construcción	144
Figura 4-53 Pruebas de tensión para los minigrippers	144
Figura 4-54 Gripper ensamblado ubicado en la bandeja con una orientación 0°	146
Figura 4-55 Plato unión gripper con Motoman ubicado en la bandeja con una orientación de 0°	146
Figura 4-56 Ensamble robot Motoman con gripper, verificando su diseño electrónico con su programación en los procesos de apertura y cierre.....	147

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Especificaciones de la impresora Stratasys Objet Eden 260V	16
Tabla 2-1 Principales monómeros para polímeros acrílicos [20,21].....	20
Tabla 2-2 Monómeros de cianocrilatos [19, 31].....	22
Tabla 2-3 Principales aditivos en los adhesivos y/o polímeros acrílicos [22].....	24
Tabla 3-1 Propiedades VeroBlue RGD840	33
Tabla 3-2 Parámetros muestras	35
Tabla 3-3 Diferencias entre la espectroscopia infrarroja por transición y reflexión atenuada [47]	40
Tabla 3-4 Muestras para control dimensional VeroBlue RGD840.....	43
Tabla 3-5 Muestra geometría libre creación VeroBlue RGD840	44
Tabla 4-1 Correlación de las frecuencias asociadas a su estructura química [46].....	74
Tabla 4-2 Correlación de la estructura química y el espectro IR del VeroBlue RGD840 líquido	75
Tabla 4-3 Correlación de la estructura química y el espectro IR-ATR del VeroBlue RGD840 líquido	78
Tabla 4-4 Correlación de la estructura química y el espectro IR-ATR del VeroBlue RGD840 sólido.....	79
Tabla 4-5 Resumen datos control dimensional.....	86
Tabla 4-6 Condiciones para el manejo perfilometro de luz blanca.....	89
Tabla 4-7 Condiciones para el manejo microscopio confocal láser	93
Tabla 4-8 Parámetros básicos que se pueden obtener con el microscopio confocal láser	93
Tabla 4-9 Resultados obtenidos para evaluar rugosidad (Ra, Rc, Rz)	94
Tabla 4-10 Resumen análisis ANOVA Rc en plano X-Y	95
Tabla 4-11 Resumen análisis ANOVA Rc en el plano X-Y.....	95
Tabla 4-12 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano X-Y	96

XVIII Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Tabla 4-13 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano X-Y	96
Tabla 4-14 Resumen análisis ANOVA Rz en el plano X-Y.....	96
Tabla 4-15 Resumen análisis ANOVA Rz en el plano X-Y.....	97
Tabla 4-16 Resultados obtenidos para evaluar rugosidad (Ra, Rc, Rz)	98
Tabla 4-17 Resumen análisis ANOVA Rc en el plano Z-X.....	98
Tabla 4-18 Resumen análisis ANOVA Rc en el plano Z-X.....	99
Tabla 4-19 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano Z-X.....	99
Tabla 4-20 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano Z-X.....	100
Tabla 4-21 Resumen análisis ANOVA Rz en el plano Z-X.....	100
Tabla 4-22 Resumen análisis ANOVA Rz en el plano Z-X.....	101
Tabla 4-23 Resultados obtenidos para evaluar rugosidad (Ra, Rc, Rz)	102
Tabla 4-24 Resumen análisis ANOVA Rc en el plano Z-Y	102
Tabla 4-25 Resumen análisis ANOVA Rc en el plano Z-Y	103
Tabla 4-26 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano Z-Y.....	103
Tabla 4-27 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano Z-Y.....	103
Tabla 4-28 Resumen análisis ANOVA Rz en el plano Z-Y	104
Tabla 4-29 Resumen análisis ANOVA Rz en el plano Z-Y	104
Tabla 4-30 Prueba densidad VeroBlue RGD840 solido	107
Tabla 4-31 Prueba absorción de agua VeroBlueRGD840 sólido	109
Tabla 4-32 Resultados resistencia a la tensión, probetas HQ VeroBlue RGD840 sólido	112
Tabla 4-33 Resumen análisis ANOVA para resistencia a la tensión HQ	112
Tabla 4-34 Resultados resistencia a la tensión, probetas HS VeroBlue RGD840 sólido	114
Tabla 4-35 Resumen análisis ANOVA para resistencia a la tensión probetas HS	114
Tabla 4-36 Resultados resistencia al impacto, probetas VeroBlue RGD840 sólido	118
Tabla 4-37 Resumen análisis ANOVA para resistencia al impacto probetas HQ.....	118
Tabla 4-38 Resumen análisis ANOVA para resistencia al impacto probetas HS	119
Tabla 4-39 Resultados resistencia a la flexión, probetas VeroBlue RGD840 sólido	123
Tabla 4-40 Resumen análisis ANOVA resistencia a la flexión probetas HQ	123
Tabla 4-41 Resumen análisis ANOVA resistencia a la flexión para probetas HS	124
Tabla 4-42 Resultados módulo de flexión, probetas VeroBlue RGD840 sólido.....	124
Tabla 4-43 Resumen análisis ANOVA modulo de flexión probetas HQ.....	125
Tabla 4-44 Resumen análisis ANOVA modulo de flexión probetas HS	125

Tabla 4-45 Dureza Shore D, Plano X-Y	128
Tabla 4-46 Resumen análisis ANOVA Dureza plano X-Y probetas HQ	128
Tabla 4-47 Dureza Shore D, Plano Z-X	129
Tabla 4-48 Resumen análisis ANOVA Dureza plano Z-X probetas HQ.....	129
Tabla 4-49 Dureza Shore D, Plano Z-Y	130
Tabla 4-50 Resumen análisis ANOVA Dureza en el plano Z-Y probetas HQ.....	130
Tabla 4-51 Resultados pruebas tensión minigripper	145

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
<i>MPa</i>	Megapascales	Pa	
<i>ng</i>	Nanogramo	gr	
<i>nm</i>	Nanómetro	m	
<i>Tg</i>	Transición vítrea	°C	
<i>Tm</i>	Temperatura de fusión	°C	

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
≈	Aproximadamente		
<i>μm</i>	Micrómetro	μ	

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>3DP</i>	3D Printing
<i>ABS</i>	Acrilonitrilo butadieno estireno
<i>AM</i>	Manufactura aditiva
<i>ASCII</i>	American Standard Code for Information Interchange – Código Estándar Estadounidense para el intercambio de información
<i>ASTM</i>	Sociedad americana para pruebas y materiales
<i>ATR</i>	Reflexión Total Atenuada
<i>CAD</i>	Diseño asistido por computadora
<i>CJP</i>	Color jet printing
<i>CMM</i>	Máquina de medición de coordenadas
<i>DLP</i>	Digital Light Processing
<i>DSC</i>	Calorimetría Diferencial de Barrido
<i>FDM</i>	Fused Deposition Modelling
<i>FTIR</i>	Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier
<i>HQ</i>	High quality – Alta calidad
<i>HS</i>	High speed – Alta velocidad
<i>IGES</i>	Initial graphics exchange specifications

Abreviatura	Término
<i>IR</i>	Espectroscopia Infrarroja
<i>KBr</i>	Bromuro de potasio
<i>LOM</i>	Laminated Object Manufacturing
<i>MJP</i>	Multijet Printing Systems
<i>PET</i>	Politereftalato de etileno
<i>RP</i>	Prototipado rápido
<i>SEM</i>	Microscopía electrónica de barrido
<i>SDL</i>	Selective deposition modeling
<i>SL</i>	Estereolitografía
<i>SLA</i>	Systems Estereolithography Apparatus
<i>SLS</i>	Selective Laser Sintering
<i>SOUP</i>	Solid Object Ultraviolet-Laser Printer
<i>STL</i>	Standard Triangle Language
<i>TGA</i>	Análisis termogravimétrico
<i>UV</i>	Ultravioleta

Introducción

Esta tesis posee una perspectiva marcada, la cual se complementan recíprocamente: La primera está relacionada con la adaptación tecnológica y la segunda viene de la investigación experimental. Los modelos o prototipos fabricados por medio de la tecnología de prototipado rápido, actualmente Manufactura Aditiva (AM) involucran diferentes aspectos, dentro de los cuales se encuentra: el proceso y sus variables las cuales juegan un rol principal con el material utilizado para la fabricación de los modelos.

En esta perspectiva, se hace una revisión somera, sobre los temas afines, además de precisar los objetivos y la estructura de la tesis. En el desarrollo de la investigación experimental se pretende determinar cómo identificar un polímero por métodos básicos avanzados (térmicos y ópticos), la relación de los parámetros del proceso en la calidad de los prototipos, propiedades físico-mecánicas y como la adecuada delimitación de estos parámetros, son los que se ven reflejados en un prototipo industrial.

El término de prototipado rápido (RP) también conocido como AM, es un proceso de manufactura en el cual los objetos se construyen por un método aditivo de capas. Usando un software especializado, un modelo 3D de diseño asistido por computador (CAD) es cortado en capas planas paralelas o capas cilíndricas concéntricas muy delgadas (≈ 0.1 mm); el método usado por la máquina de prototipado rápido construye el modelo por capas hasta que la réplica del modelo CAD es generada. Debido a que la AM se describe en cuatro áreas primarias: entradas, método, material y aplicaciones y que existen más de cuarenta proveedores a nivel mundial, estos aspectos básicos son necesarios para precisar y delimitar las propiedades que se desean medir. Las aplicaciones de los prototipos se encuentran agrupadas en (1) Diseño (2) Planeación y análisis de ingeniería y (3) Herramientas y manufactura.

El objetivo general de la presente tesis es estudiar y analizar las variables más significativas del estado superficial y propiedad físico-mecánica, del prototipo fabricado

como técnica aditiva con polímeros fotosensibles, identificando cuál o cuáles son los parámetros que afectan el proceso 3D printing (3DP) al usar la máquina Stratasys Eden260V. Como objetivos específicos se plantearon los siguientes:

1. Conocer e integrar la fabricación aditiva enfocada en el área de tecnología por fotocurado 3DP para la elaboración de prototipos y la relación existente en los parámetros de su proceso.
2. Especificar y delimitar los factores más relevantes del proceso de conformado por áreas en la formación de sólidos volumétricos y de qué forma afecta el material del prototipo en sus propiedades (resistencia, rigidez, densidad, acabado superficial y estructura).
3. Al concluir cuales son las variables más significativas que afectan el acabado superficial y las propiedades físico-mecánicas, se obtiene manufacturar un producto industrial real utilizando la tecnología por fotocurado 3DP con la impresora Stratasys Eden 260V.

El desarrollo de esta tesis se ha estructurado de la siguiente manera:

1. Proceso. En este primer capítulo luego de precisar los objetivos y la estructura de la tesis. Se hace una revisión somera sobre los temas afines, desde su aspecto conceptual, examinando la evolución y el estado actual del tema en cuestión y de precisar los conocimientos que sirven de base a esta investigación. Así se documentan los conceptos básicos más importantes y a su vez los actuales, sobre la AM y la tecnología Polyjet.
2. Material. En el segundo capítulo se describen las características generales de los polímeros enfocándose específicamente en generalidades de los polímeros que sufren algún tipo de fotopolimerización.
3. Pruebas y ensayos. La finalidad del tercer capítulo es exponer ordenadamente los métodos de pruebas y ensayos utilizados en esta investigación, y por ende, de las herramientas experimentales necesarias para su realización.

-
4. Resultados y análisis. Este capítulo nos permite visualizar la presentación, interpretación y análisis de los resultados obtenidos. Para luego basarse en estos datos experimentales y ser comparados con los datos del fabricante.

 5. Conclusiones y recomendaciones. Este trabajo se da por terminado, con la exposición de las principales conclusiones a las que se han llegado y la presentación de algunas recomendaciones respectivas

1. Proceso

En los procesos involucrados en la creación de los productos que llegan al mercado se encuentra el diseño, prueba, fabricación, mercado y distribución del producto, exige tanto en términos de recursos como tiempo y materiales. El uso eficiente de estos recursos permite un uso eficaz de su enfoque, dentro de estos enfoques el uso de instrumentos los hace más efectivos y son enteramente impulsados por la tecnología, implicando básicamente la participación de la computadora, resultado del rápido desarrollo y avance durante las últimas décadas.

La manufactura aditiva (AM), antes conocida como prototipado rápido (RP), es uno de esos desarrollos tecnológicos. AM es definido por la American Society for Testing and Materials (ASTM) como "un proceso de unir materiales para fabricar objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa tras capa, en oposición a las metodologías de fabricación sustractivas" [1]. También conocida comúnmente como la impresión 3D en la literatura pública, esta tecnología emergente está revolucionando la industria manufacturera con su capacidad de convertir datos digitales en partes físicas. Su capacidad distinta para fabricar formas y estructuras complejas ya lo ha hecho inestimable para la producción de prototipos tales como conectores de motores para la industria del automóvil y herramientas tales como moldes de fundición de inversión en las industrias de joyería y aeronáutica.

En 1987, el primer sistema comercial AM, SLA-1, fue lanzado por 3D Systems en los Estados Unidos [2]. Trabajó sobre el principio de estereolitografía (SL) y por primera vez permitió a los usuarios generar un objeto físico a partir de datos digitales. La invención de la tecnología AM fue un "evento de profundidad" [3] debido al tremendo ahorro de tiempo, especialmente para ejecutar modelos complicados y difíciles de producir. Desde entonces, se han comercializado otras nuevas tecnologías, entre las que se incluyen

Fused Deposition Modelling (FDM) y Laminated Object Manufacturing (LOM) en 1991, así como Selective Laser Sintering (SLS) en 1992. Las impresoras 3D basadas en tecnología similar a las impresoras de inyección de tinta comenzaron a aparecer en el mercado en 1996.

La expiración de las patentes más antiguas, tales como la patente de la tecnología de extrusión termoplástico usada por FDM (expiro en 2009) ha conducido a una explosión de desarrollo de una serie de impresoras 3D personales de bajo costo, tales como MakerBot, RepRap, etc. Estos de bajo costo pueden incluso ser auto-ensamblado a partir de piezas de repuesto o kits y permiten a las personas a acceder a la tecnología a un precio relativamente bajo.

Independientemente de las diferentes técnicas utilizadas en los sistemas AM desarrollados, generalmente adoptan el mismo enfoque básico, que puede detallarse como:

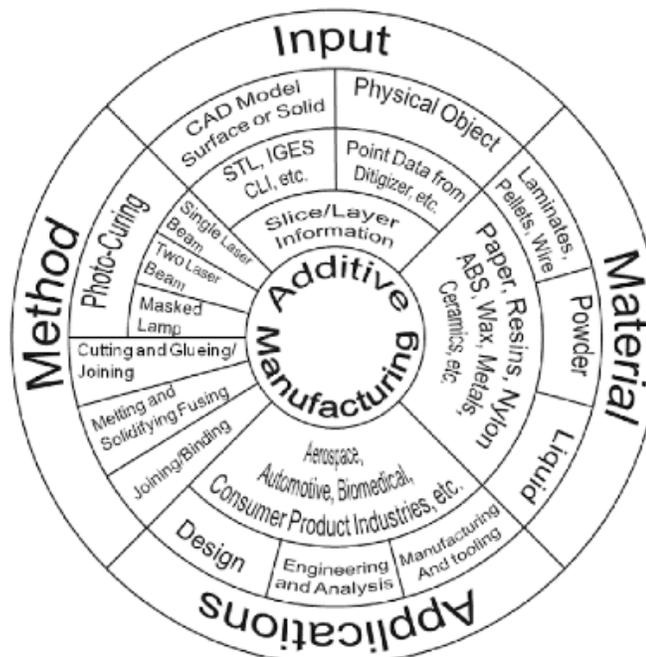
1. Un modelo o componente es modelado en un sistema de fabricación asistido por computador (CAD-CAM). El modelo que describe la parte física a ser construida, debe representarse como superficies cerradas que definen ambiguamente un volumen cerrado. Esto significa que los datos deben especificar el inferior, el exterior y el límite del modelo. Este requisito será redundante si la técnica del modelado utilizada se basa en el modelado sólido. Esto es en virtud de que un modelo sólido valido tendrá automáticamente un volumen cerrado. Este requisito asegura que todas las secciones transversales horizontales que son esenciales para AM son curvas cerradas para crear el objeto sólido.
2. El modelo sólido o de superficie a construir se convierte a continuación en un formato de archivo denominado "STL" (estereolitografía) originado por 3D Systems. El formato de archivo STL se aproxima a las superficies del modelo usando el más simple de los polígonos, triángulos. Las superficies altamente curvadas deben emplear muchos triángulos y esto significa que los archivos STL para las piezas curvadas pueden ser muy grandes. Sin embargo, algunos sistemas AM también acepta datos en el formato de gráficos vectoriales 2D/3D basado en el intercambio de gráficos especificación inicial (IGES). IGES puede

ser utilizado por muchos programas CAD como un formato basado en texto ASCII estándar para guardar y exportar datos vectoriales, y puede almacenar representaciones de superficies o un objeto sólido. El formato IGES se ha convertido en el formato de archivo estándar por defecto para transferir archivos de modelos 3D entre los diferentes paquetes de software CAD. Una vez que un usuario ha creado un archivo de modelo en un software específico para enviarla a otro usuario que no tiene el mismo programa sin ningún interés, el destinatario tendrá la capacidad de abrir o ver el archivo.

3. Un programa de computadora analiza un archivo .STL que define el modelo a fabricar y “corta” el modelo en secciones transversales. Las secciones transversales se recrean sistemáticamente a través de la solidificación de líquidos o polvos y luego se combinan para formar un modelo 3D.

Fundamentalmente, el desarrollo AM se puede describir en cuatro áreas. Los aspectos claves de AM son cuatro: entrada, método, material y aplicaciones, Figura 1-1.

Figura 1-1 Aspectos claves de la manufactura aditiva [4]



Fuente: Chee Kai Chua, Kai Fai Leong. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications. World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 2014.

Entrada (Input): Se refiere a la información electrónica requerida para describir el objeto en 3D. Hay dos puntos de partida posibles: un modelo de computadora o un modelo o pieza física. El modelo de computadora creado por un sistema de diseño asistido por computadora (CAD) puede ser un modelo de superficie o un modelo sólido. Por otro lado, los datos en 3D del modelo físico no son tan sencillos. Requiere la adquisición de datos a través de un método conocido como ingeniería inversa. En la ingeniería inversa, se puede utilizar una amplia gama de equipos, como CMM (máquina de medición de coordenadas) o un digitalizador láser, para capturar puntos de datos del modelo físico, usualmente en formato raster y luego "reconstruir" en un sistema CAD.

Método (Método). El método empleado por cada proveedor de AM puede clasificarse generalmente en las siguientes categorías: fotopolimerización, corte y unión, fundir y solidificar o fusión y unión o encuadernación. La fotopolimerización se puede dividir en categorías: un solo rayo láser, doble láser o lámparas.

Material. El estado inicial del material puede venir en una de las siguientes formas: estado sólido, líquido o de polvo. Los materiales sólidos vienen en diversas formas tales como: gránulos (pellets), alambres o laminados. El rango actual de materiales incluye papel, polímeros, cera, resinas, metales y cerámicas.

Aplicaciones. La mayoría de las piezas AM se terminan o se tocan antes de que se utilicen para sus aplicaciones previstas. Las aplicaciones se pueden agrupar:

1. Diseño
2. Análisis y planificación de la ingeniería
3. Fabricación y herramientas

1.1 Clasificación de los sistemas de manufactura aditiva

Una de las mejores maneras de clasificar los sistemas AM [4] ampliamente es por la forma inicial de su material, es decir, el material con el que está construido el prototipo o una parte. De esta manera todos los sistemas se pueden clasificar fácilmente en:

1. Líquido - Base

-
2. Sólido – Base
 3. Polvos – Base
- 1. Líquido-Base.** La forma inicial del material de construcción basado en líquidos es el estado líquido. A través de un proceso comúnmente conocido como fotopolimerización, el líquido se convierte en el estado sólido. Los siguientes sistemas AM entran en esta categoría:
- a) 3D Systems Estereolithography Apparatus (SLA): Utiliza el método de luz de láser.
 - b) Stratasys Polyjet: usan lámparas UV para curar después de la deposición de polímeros fotocurables mediante cabezales de inyección.
 - c) 3D Systems MultiJet Printing (MJP): usan lámparas UV para curar después de la deposición de polímeros fotocurables mediante cabezales de inyección.
 - d) EnvisionTEC perfactory: utiliza un sistema llamado Digital Light Processing (DLP)
 - e) CMET Solid Object Ultraviolet-Laser Printer (SOUP): Utiliza el método de luz de láser.
 - f) EnvisionTEC Bioplotter: usa un método de extrusión en un medio líquido para crear objetos.
 - g) RegenHU 3D Bioprinting: usa un método de extrusión en un medio líquido para crear objetos.
 - h) Rapid Freeze Prototyping: implica la congelación de gotitas de agua y depósitos de una manera muy similar al FDM para crear el prototipo.
- 2. Sólido-Base.** A excepción de los sistemas en polvo, los sólidos-base en AM se entienden para abarcar todas las formas de material en el estado sólido. En este contexto, la forma sólida puede incluir la forma en forma de alambres, rollos, laminados y gránulos, los siguientes sistemas AM se encuentran en esta definición:
- a) Stratasys Fused Deposition Modeling (FDM): método de fusión.
 - b) Solidscape Benchtop System: método solidificación o fusión.
 - c) MCOR Technologies Selective Deposition Lamination (SDL): método de cortar y/o unir.

- 10 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V
-

- d) Cubic Technologies Laminated Object Manufacturing (LOM): método de cortar y/o unir.
- e) Ultrasonic Consolidation: método de cortar y unir.

3. Polvo-Base. En un sentido estricto, el polvo es muy grande en el estado sólido. Sin embargo, es intencionalmente creado como una categoría fuera de los sólidos. En AM se utiliza el término de polvo para referirse a una forma de partícula. Los siguientes sistemas AM entran en esta definición:

- a) 3D Systems Selective Laser Sintering (SLS)
- b) 3D Systems Color Jet Printing (CJP)
- c) EOS EOSSINT Systems
- d) Optomec Laser Engineered Net Shaping (LENS)
- e) Arcam Electron Beam Melting (EBM)
- f) Concept LaserGmbH LaserCUSING
- g) SLM SolutionsGmbH SLM
- h) 3D Systems Phenix PXTM
- i) 3D Micromac AG MicroSRUCT
- j) TheExOne Company ProMetal
- k) Voxeljet Technology GmbH VX System

En todos los sistemas anteriores se emplea el método de unión, solo difiere en que algunos emplean láser y otros un aglutinante para lograr el efecto de la unión.

Las tecnologías RP cubren una amplia gama de nuevas tecnologías para la producción de piezas precisas construidas capa por capa, a partir de modelos CAD en un periodo corto de tiempo, con poca necesidad de intervención humana.

El desarrollo de la AM ha revolucionado los procesos de diseño y manufactura, habilitando el proceso de RP a piezas físicas incluyendo geometrías complejas que de otra manera sería difícil o imposible para construir por técnicas convencionales como la sustracción [5].

1.2 Proceso básico del prototipado rápido

Las técnicas de AM siguen día a día desarrollándose, el límite actual son los materiales disponibles, propiedades, que los distinguen de las propiedades de los materiales en un producto final. De esta manera es necesario conocer las propiedades de los materiales de los prototipos.

El proceso de impresión 3D está constituido por cinco pasos básicos:

- Construcción del modelo CAD.
- Transformación del modelo CAD al formato .STL.
- Seccionar el archivo .STL.
- Construcción del modelo capa a capa.
- Limpiar y acabar el modelo.

Construcción del modelo CAD: El objeto que se construirá se modela usando el paquete de software de diseño asistido por computador (CAD), que interpretan objetos en 3D con mayor precisión y se obtienen mejores resultados. El dibujante puede utilizar un archivo preexistente del CAD o construye uno para los propósitos del modelo respectivo.

Transformación del modelo CAD al formato .STL: El CAD emplea diferentes algoritmos para reproducir objetos sólidos. Para constituir la coherencia, el formato .STL se aprobó como el estándar de la industria del prototipado rápido. En este paso se transforma el archivo CAD en formato .STL. Este formato representa una superficie tridimensional con empalme de triángulos planos. Como los archivos .STL utilizan elementos planos, no puede interpretar superficies curvadas exactamente. El incremento del número de triángulos mejora la aproximación, pero el tamaño del archivo será más grande. Los archivos grandes solicitan más horas de pre procesamiento y de construcción, el dibujante debe equilibrar la precisión con la habilidad para generar un archivo útil de .STL.

Seccionar el archivo .STL: en este paso, un programa del pre proceso prepara el archivo .STL para ser construido de manera automática, pero también permite al usuario

ajustar el tamaño, ubicación y orientación del modelo. La ubicación del modelo determina sus características, la orientación determina parcialmente qué cantidad de tiempo se requiere para su construcción. El programa genera una estructura auxiliar para apoyar el modelo durante la construcción para características delicadas como paredes delgadas.

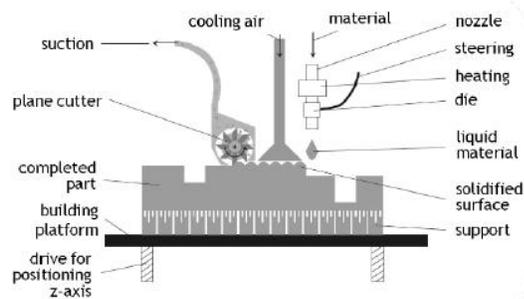
Construcción del modelo capa a capa: en este paso se construye el modelo real. La impresora 3D inyecta y cura al instante con UV pequeñas gotas de fotopolímero líquido. Las finas capas se acumulan en la bandeja de construcción para crear un modelo o pieza 3D con precisión. Cuando las salientes o formas complejas requieren apoyo, la impresora 3D inyecta un material de soporte extraíble similar al gel [6].

Limpiar y acabar el modelo: el paso final es el postprocesado, esto implica quitar el prototipo de la bandeja de construcción de la máquina y separarla del apoyo. Algunos materiales fotosensibles necesitan ser fotopolimerizados totalmente antes del uso. Los prototipos pueden requerir menor limpieza y tratamiento de la superficie. Enarenar, sellar y/o pintar el modelo mejoraran su aspecto y durabilidad [7].

1.3 Modelado por impresión 3D

La empresa 3DSystems [8] desarrolló la tecnología de modelado con múltiple boquilla (multijet-modeling – MJM o thermojet), Figura 1-2 similar a la desarrollada por Brother Kogyo Kabushiki Kaisha (Japón) llamada inyección de fotopolímero (jetted photopolymer), en esta el equipo consta de un cabezal con varias boquillas en spray que rocían diminutas gotas de polímero fotosensible sobre la plataforma donde quedan expuestas a radiación UV que promueve la polimerización formando la pieza capa por capa.

Figura 1-2 Impresora Multi-jet modelling [60, 61]



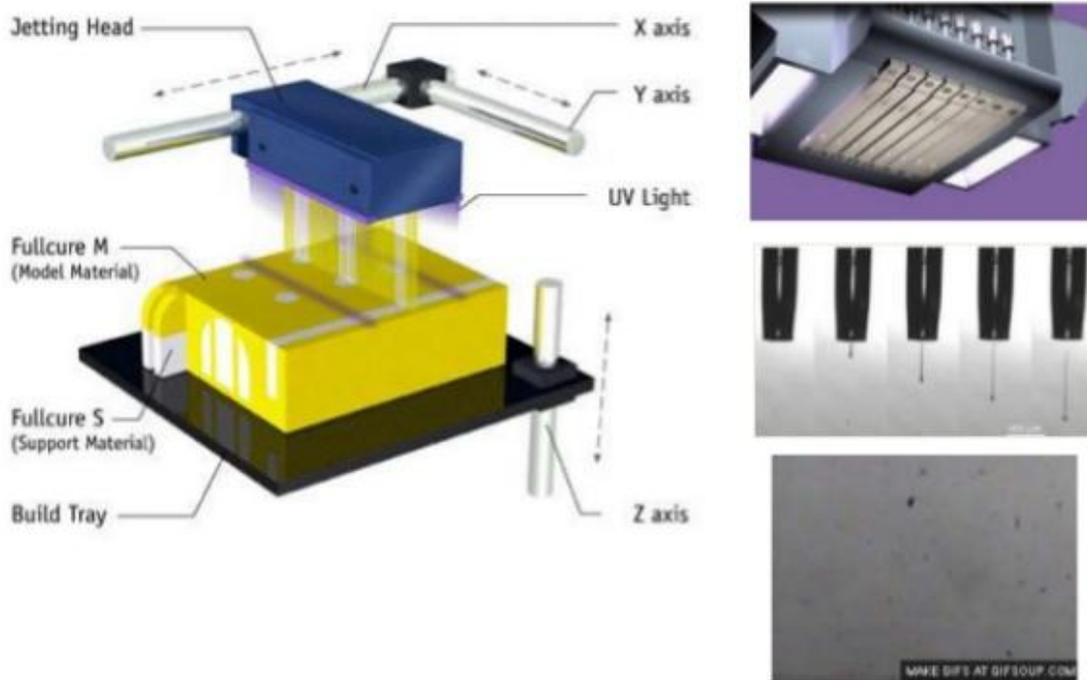
Fuente: O. Baier, G. Witt, Functional components produced by multi-jet modeling combined with electroforming and machining. S. Afr. J. Ind. Eng. Vol 25. N.2 Pretoria Aug. 2014; Hoffmann, J. ThermoJet und medizinische modelle - Ein erfahrungsbericht. RAPROMED 2000.

1.3.1 Tecnología Polyjet

La firma Stratasys ha desarrollado la tecnología Polyjet [9] basándose en las impresoras de tinta. Este proceso es similar a la estereolitografía en que las piezas están hechas con un polímero fotosensible. La diferencia está en cómo se aplica el polímero y el fotopolimerización para construir la pieza ya que se materializa la forma mediante deposición de secciones sucesivas. Actualmente es una de las tecnologías más precisas del mercado y nos ofrecen una gama variada de materiales de construcción e incluso ha desarrollado la posibilidad de trabajar con dos materiales simultáneamente, De esta manera, gracias a la tecnología Polyjet se pueden ofrecer piezas bimateriales. Las impresoras 3D cuentan con un cabezal con miles de inyectores de los cuales salen gotas de polímero líquido que se curan inmediatamente gracias a dos lámparas de rayos UV situadas en los laterales del mismo cabeza, ver Figura 1-3.

14 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Figura 1-3 Proceso tecnología Polyjet [10]

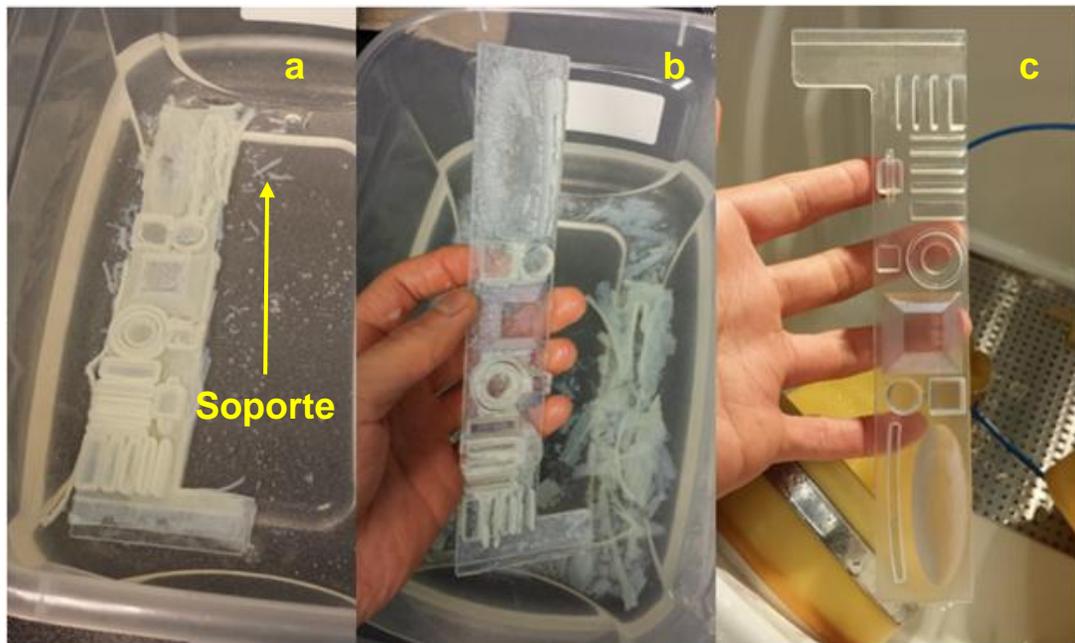


Fuente: <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/design-series/objet-eden260vs>

Estas gotas poseen un tamaño aproximado de 90 ng y son esparcidas a una velocidad aproximada de 10 m/s. Los materiales utilizados para fabricar los prototipos mediante la tecnología Polyjet son polímeros fotosensibles que se depositan en estado líquido y se endurecen gracias a los rayos UV. La precisión dimensional (0,2 mm) y la calidad en los detalles y en el acabado superficial, es óptima al trabajar la máquina con una precisión de cada capa de 16 micras (0,0006 pulgadas), de espesor, que es aproximadamente 1/5 de las capas de estereolitografía. Los sistemas Polyjet poseen una amplia gama de materiales desde resinas translucidas similares al polipropileno, similares al ABS o a la familia de resinas elásticas, etc. igualmente inyecta un segundo material denominado soporte. Este segundo material, es depositado para apoyar todas las zonas de la pieza que quedan en voladizo. Es un material que una vez terminada la pieza, se tiene que eliminar. Para ello se despegan la pieza de la bandeja con una espátula y se deposita en un equipamiento adicional necesario para un postproceso, en la Figura 1-4 se observa en a) la pieza terminada en acabado matte y se remoja una hora en agua corriente, en la imagen del medio b) es después de una hora donde se agitó suavemente la pieza para

sacudir el soporte suelto y la imagen c) es después de 15 segundos con la pistola de agua a presión (wáter jet) que se aplica sobre el soporte para ir desprendiéndolo. Este postproceso es donde el operario controla que la pieza quede totalmente limpia, incluyendo las cavidades interiores.

Figura 1-4 Postproceso de remoción del segundo material: soporte [62]



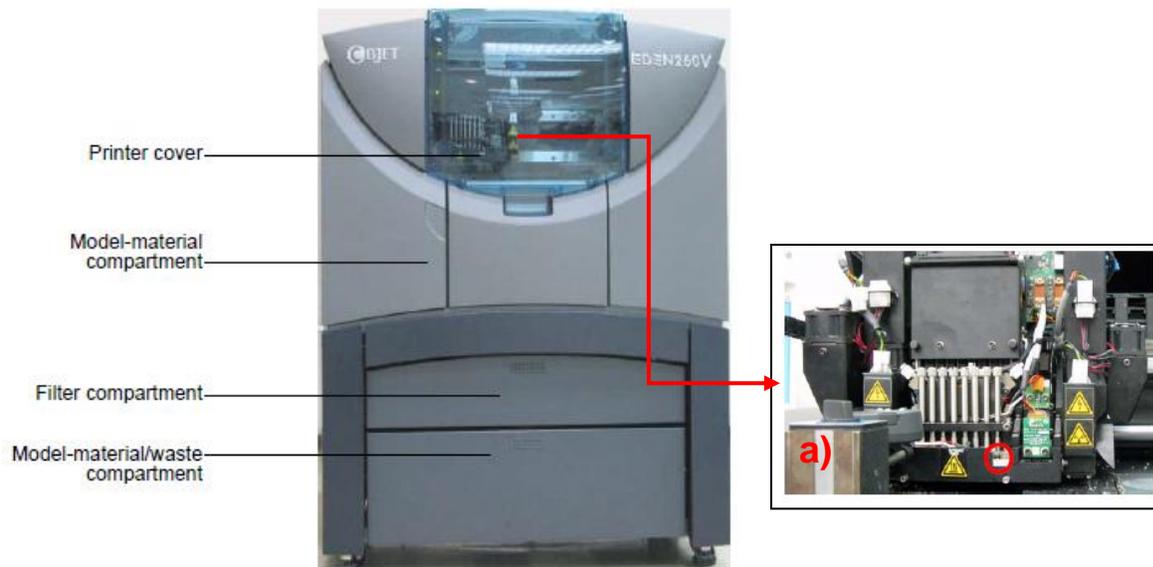
Fuente: <https://www.cati.com/blog/2016/01/polyjet-support-removal-tip/>

1.4 La máquina de impresión 3D Stratasys Objet Eden260V

La Objet Eden260V es una impresora 3D que constituye la familia Serie Stratasys Design que se observa en la Figura 1-5, en la imagen a) se observa el bloque de impresión. Está ubicada en el Laboratorio Fabrica Experimental LabFabEx Sala CAM - Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

16 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Figura 1-5 Impresora 3D Objet Eden 260V



Fuente: LabFabEx – Universidad Nacional de Colombia

1.4.1 Especificaciones técnicas de la impresora Objet Eden260V

Crea los prototipos que representan la visión del producto hasta el más pequeño detalle, para ofrecer un nivel de precisión y productividad por encima de la media. En la Tabla 1-1 se encuentra las condiciones de trabajo de la impresora Stratasys Objet Eden 260V

Tabla 1-1 Especificaciones de la impresora Stratasys Objet Eden 260V

Especificación	Valor
Material	ABS Digital, Alta Temperatura, Transparente, Rígido y Opaco, Polipropileno simulado, Similar al caucho, Biocompatible, Materiales Dentales.
Material apoyo	Soporte de gel SUP 705
Cartuchos	Cuatro cartuchos de 3.6 kg (7.9 kg), sellados
Tamaño construir neto	255 x 252 x 200 mm (10.0 x 9.9 x 7.9 pulg.).
Espesor de la capa	Horizontal construcción capas finas como 16 micras (0.0006 pulg.)
Resolución de construcción	Eje x: 600 dpi; Eje y: 600 dpi; Eje z: 1600 dpi.

Tabla 1-1 (Continuación)

Especificación	Valor
Exactitud	20-85 micras para las características por debajo de 50 mm, hasta 200 micrones por completo modelo tamaño (para materiales rígidos, dependiendo de la geometría, crear parámetros y orientación del modelo).
Compatibilidad con estaciones de trabajo	Windows 7 32/64-bit
Conectividad de red	LAN-TCP/IP
Tamaño y peso	870 x 735 x 1200 mm (34.3 x 28.9 x 47.2 pulg.); 264 kg (582 libras).
Chorro de cabezas	SHR (solo cabeza de reemplazo), 8 unidades.
Requisitos de alimentación	110-240 VAC 50/60 Hz, 1.5 KW monofásico.
Entorno operativo	Temperatura de 18 C - 25 C (64 F - 77 F), humedad relativa 30-70% (sin condensar).

Fuente: <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/design-series/objet-eden260vs>

2. Material

Un polímero es una sustancia sólida, semi-sólida o líquida no uniforme y frecuentemente con alto peso molecular, en el estado sólido usualmente posee un intervalo de ablandamiento o de fusión, y exhibe una fractura concoidea (superficie cóncava o convexa de relieve suave), la cual es característica de los materiales amorfos [11, 12].

Existen diferentes tipos de polímeros, entre ellos los polímeros curables. Los cuales son el resultado de reacciones por adición de monómeros, tales como los ésteres de los ácidos acrílico y metacrilato con alcoholes diversos, los cuales pueden presentar o no grupos funcionales reactivos remanentes. Los acrilatos pueden ser curados por la acción de radiación, esto ocurre para acrilatos insaturados base ácido acrílico o sus derivados con polímeros reactivos (poliésteres, poliésteres, epóxicas y uréticas). Estos polímeros generalmente son muy viscosos, el acoplamiento se realiza con monómeros de acrilatos líquidos que actúan como diluyentes reactivos y bien empleando un solvente inerte. La ventaja de este tipo de polímeros es que el curado por radiación UV ocurre a elevada velocidad.

El fenómeno de curado se define como el conjunto de cambios físicos y químicos que transforman el material de su estado termoplástico original (líquido o sólido, soluble y de peso molecular finito) a una condición final termoestable, es decir un sólido insoluble, infusible y de peso molecular infinito [14]. En una reacción de homopolimerización, se requiere un aporte de energía externa ya sea en forma de calor o radiación, y además ser promovida por iniciadores. Los reactivos de curado frecuentemente presentan tres o más grupos funcionales por molécula. El agente de curado debe tener muchos grupos funcionales dado que favorecen el entrecruzamiento de las cadenas [13].

El curado por luz (visible o ultravioleta, UV) es conocido como fotopolimerización. Este tipo de polimerización se caracteriza por tener una velocidad de curado inferior a

cualquier otro método utilizado, además presenta muy bajo consumo energético y no requiere del uso de solventes que puedan ser peligrosos con el medio ambiente. Un polímero líquido puede ser transformado casi instantáneamente en un polímero sólido debido a una simple exposición a la luz UV a temperatura ambiente. La mayoría de estos polímeros consisten en monómeros multifuncionales y oligómeros “telechelic”¹, que poseen un enlace doble de alta reactividad debido al grupo acrilato [15,16]. La tecnología de curado por radiación de radicales libres basada en química de acrilato/metacrilato comprende más del 90% del mercado de materiales de fotopolimerización por radiación [17].

2.1 Polímeros acrílicos

Los polímeros acrílicos son derivados del etileno y contienen un grupo vinilo (-C=C-) en su fórmula estructural (Ver Ecuación (2.1)). [18], son polímeros de esteres acrílico y metacrilato [18,19]. Debido a la posibilidad de esterificación del ácido acrílico y el metacrilato con varios alcoholes, existe una gran variedad de monómeros [20]. En la Tabla 2-1 se muestran los principales monómeros para la elaboración de polímeros acrílicos.



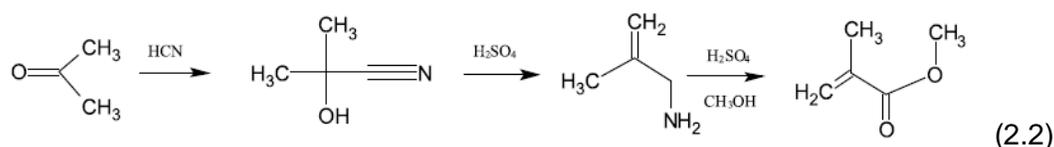
Tabla 2-1 Principales monómeros para polímeros acrílicos [20,21]

Monómeros acrílicos	Monómeros metacrilatos
Acido acrílico	Metil metacrilato
Metil acrilato	Etil Metacrilato
Etil acrilato	2-Hidroxiethyl metacrilato (HEMA)
n-Butil acrilato	n-Butil metacrilato
2-Etilhexilo acrilato	Etileno glicol dimetacrilato
Trimetilolpropano triacrilato (TMPTA)	Poli (glicol etileno) dimetacrilato
Derivados de Aziridina	Ciclohexil metacrilato

Fuente: Kamura A., Takeko R., Iwata T., Acrylic Resin, assignee: Sumitomo Chemical Company, US Patent 215 743, September 29 2005.; Machhammer O., Tenten A., Jachow H., Haupt S., Arnold H., Unverricht S., Method for production acrolein and/or acrylic acid from propane, assignee: BASF Aktiengesellschaft, US Patente 6 426 433, July 30 2002.

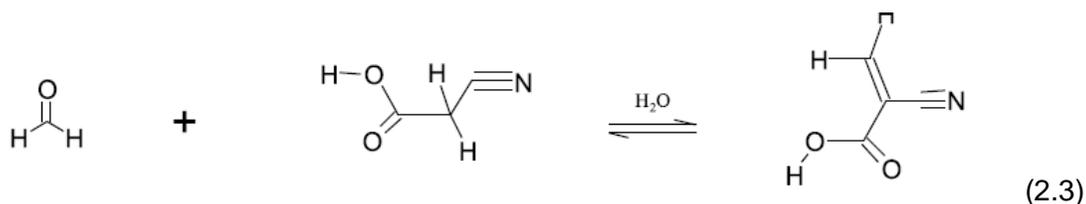
¹ Oligomero telechelic es un prepolímero capaz de entrar en polimerización adicional u otras reacciones a través de sus finales reactivos [64].

El ácido acrílico es sintetizado por la oxidación de propano acroleína (1-hidroxi-2-metilpropanonitrilo) [22] mientras que el metil metacrilato es sintetizado convencionalmente por el proceso cianohidrinacetona (ACH). Este proceso consiste primeramente en producir hidroxisobutiramida mediante el calentamiento de cianohidrinacetona; al generarse la reacción de α -hidroxisobutiramida y metanol, se genera metil α -hidroxisobutiramida y ácido prúsico en fase vapor por la reacción del metanol y amoníaco sobre la catálisis sólida en la presencia de oxígeno, esta síntesis se muestra en la Ecuación (2.2). [23].



Sin embargo, existen otros procesos para la síntesis de metil metacrilato por oxidación del isobutileno, el proceso de oxidación por ter-butanol, la carbonilación propino [12] y la hidrocarbonilación de etano [19, 25].

Los adhesivos cianoacrilatos están basados en un tipo especial de monómero acrílico. Normalmente son ésteres de ácido 2-cianoacrilato [26]. En 1895 Auwers y Thorpe intentaron sintetizar dietil-2,2-dicianoglutarato, por condensación base catalizada de formaldehído acuoso y etil cianoacetato. Aislaron una mezcla de oligómeros aceitosos y un polímero amorfo de alto peso molecular. Durante su experimentación, el monómero etil 2-cianoacrilato fue sintetizado como un intermediario que produjo una reacción de polimerización espontánea e instantánea. La condensación de formaldehído con cianoacetato, como se muestra en la Ecuación (2.3), es el método utilizado para la producción de 2-cianoacrilato que aun continúa vigente y es el método más importante para la producción comercial de monómeros. El mecanismo de reacción involucra una condensación base catalizada Knoevenagel de cianoacetato y formaldehído para dar un intermediario derivado 2-metil-sustituido [19,27].



Existen otros métodos para la obtención del cianoacrilato, la pirólisis de 3-alcoxi-2-cianoapropianatos [28], transesterificación de etil 2-cianoacrilato [29] y el desplazamiento de monómeros cianoarilatos desde su aducto antraceno Diels-Alder por el tratamiento con anhídrido maleico [30]. Este último método es usado por la síntesis de monómeros que no son accesibles o pueden ser difíciles de preparar por la ruta de retropolimerización, por ejemplo, los monómeros de cianoacrilatos, tiocianoacrilatos y los monómeros perfluorinados [19,25]

La mayoría de los monómeros de cianoacrilatos son monofuncionales, Tabla 2-2, son usualmente líquidos de baja viscosidad con excelentes propiedades de humectación. En la síntesis de los monómeros de cianoacrilatos, debido a la alta electronegatividad de los grupos nitrilos y grupos carboxilos, se favorece la polimerización anionica, la cual promueve la formación de estructuras de resonancia. Los polímeros formados por este método exhiben altos pesos moleculares, usualmente más de 10^6 Dalton [19]

Tabla 2-2 Monómeros de cianocrilatos [19, 31]

Componente	Observaciones
Metil cianoacrilato	Resistente a la unión de metales, buena estabilidad contra solventes
Etil cianoacrilato	Uso general
Alil cianoacrilato	>100°C temperatura de servicio
n-Butil cianoacrilato	Flexible, aplicaciones médicas
Isobutil cianoacrilato	Aplicaciones médicas
2-Octil cianoacrilato	Aplicaciones médicas
2-Metoxietil cianoacrilato	Olor débil
2-Etoxietil cianoacrilato	Olor débil
2-Metoxi-1-metiletil cianoacrilato	Olor débil

Fuente: Bi-Wu H. Bo-fen H., Wei-Qing C., Zhi-qiang O., Synthesis of a novel UV-curable prepolymer neopentyl glycol diglycidyl ether diacrylate and this cure film tensil property. May 4. 2009.

Para mejorar la resistencia a la cohesividad en los cianoacrilatos, se adhieren agentes de entrecruzamiento monomérico disfuncionales a la composición monomérica. Estos pueden incluir alquilo bis (2-cianoacrilatos), trialquilo isocianuros, alquilenos diacrilatos, alquilenos dimetacrilatos [29].

El tipo de polimerización es aplicable para curar una formulación específica dependiendo de la estructura química de los monómeros utilizados [32]. La polimerización de los polímeros acrílicos ocurre esencialmente por mecanismo radical, utilizando fotoiniciadores. Mientras que los radicales libres inician la polimerización de poliésteres insaturados y monómeros (META) acrilatos, las formulaciones epóxicas y de base éter vinil son activados por mecanismos cationicos [19, 24].

Recientes investigaciones fueron dedicados para estudiar la influencia del radical libre y fotoiniciadores cationicos responsables de la activación del proceso de polimerización por la acción de radiación con longitud de onda dentro de la región UV y visible del espectro.

Irmoulli y colaboradores [33] realizaron un estudio de polimerización de un polímero acrílico por fotocalorimetria para estudiar la influencia de diferentes fotoiniciadores y la radiación electromagnética sobre el polímero. Los polímeros utilizados en este estudio son oligomeros acrílico sobre los cuales se utilizaron los iniciadores de 2, 4,6-trimetilbenzoil-fosfina (BAPO, 97%), isopropiltiozantona (ITX, 97%) y N-metildiatanolamina (MDEA, >99%), los cuales se utilizaron debido a que muestran una absorción con traslape en el dominio de la luz visible. El contenido de BAPO, ITX y MDEA en mezcla con respecto al polímero fue de 0.2%, 0.2% y 0.5%w respectivamente. El estudio se realizó sobre cuatro sistemas de prueba: BAPO, BAPO/MDEA, BAPO/ITX/MDEA y ITX/MDEA. Las formulaciones preparadas se estudiaron bajo radiación monocromática en longitudes de onda de 366, 410, 440 y 450 nm.

Los resultados de los especímenes sometidos muestran que un polímero tipo diacrilato epóxico presenta el grado más alto de curado para todos los iniciadores en las diferentes longitudes de onda analizadas. Además se concluyó conforme a los resultados que la absorción en el dominio de la luz visible para el sistema de fotoiniciación permite el curado en diferentes tipos de polímeros incluso en longitudes de onda de 450 nm.

En los cianoacrilatos la polimerización se lleva a cabo por mecanismo radical o polimerización aniónica. Los cianoacrilatos polimerizan más lentamente con iniciadores de radicales libres, en cambio la presencia de bases anionicas y en presencia de bases covalentes como las aminas y las fosfinas, polimerizan extremadamente rápido, esto se debe a que en la base se tiene presencia de agua, lo que hace que la humedad inicie la

polimerización en toda la superficie [13,20]. Sin embargo, la polimerización radical puede ser lograda en los cianoacrilatos con la presencia de un componente que forme radicales y un fotoiniciador [19].

2.2 Aditivos

Los aditivos tienen un efecto significativo en el curado, rendimiento y propiedades finales de los polímeros. Los aditivos se clasifican de acuerdo a sus funciones específicas, mejor dicho a sus bases químicas. La clasificación de los aditivos incluye: catalizadores, iniciadores, estabilizadores, colorantes, aceleradores, fillers², plastificante, aditivos de control reologico (espesantes), endurecedores, promotores de adhesión [22]. En la Tabla 2-3 se muestran algunos de los aditivos más comunes en los adhesivos y polímeros acrílicos.

Tabla 2-3 Principales aditivos en los adhesivos y/o polímeros acrílicos [22]

• Foto-iniciadores [26]	• Retardantes de Flama [29, 30]	• Plastificantes [31]	• Espesantes [32]
<ul style="list-style-type: none"> • 2-(5-Metil-2-hidroxifenil) benzotriazol • 2-[2-Hidroxi-3,5-bis(α,α-dimetilbenzil)fenol]-2H-benzotriazol • 2-(3,5-Di, ter-butil-2-hidroxifenil) benzotriazol • 2-(3-ter-butil-5-metil-2-hidroxifenil)-5-clorobenzotriazol • 2-(3,5-Di-ter-butil-2-hidroxifenil)-5-clorobenzotiazole • 2-(3,5-Di-ter-amil-2-hidroxifenil) benzotriazol • 2-(2'-Hidroxi-5'-ter-octilfenol) benzotriazol • 2-Hidroxi-4-metoxibenzofenona • 2-Hidroxi-4-octoxibenzofenona • 2,4-Dihidroxibenzofenona • 2-Hidroxibenzofenona • 2-Hidroxi-4 metoxi-4-clorobenzofenona • 2,2-Dihidroxi-4-metoxibenzofenona • 2,2-Dihidroxi-4-metoxibenzofenona • p-ter-Butilfenol salicilato • p-Octilfenol salicilato 	<ul style="list-style-type: none"> • Éster de ácido fosfórico • Polifosfatos clorados • Polifosfatos halogenados • Fosfato ácido alquilo • Tetrabromobisfenol A • 2,2-bis (4-Hidroxi-3,5-dibromofenil)propano • Fosfato trisecil • Tris (2-cloroetil) fosfato • Trióxido antimonio • Hidróxido de zirconio • Metaborato de bario • Óxido de estaño 	<ul style="list-style-type: none"> • Acetil tributil citrato • Dimetil sebacato • Trietil fosfato • Tri(2-etilhexilo)fosfato • Tri(p-cresil)fosfato • Gliceril triacetato • Gliceril tributirato • Dioctil adipato • Isopropil miristato • Butil estearate • Ácido láurico • Dibutil ftalato • Trioctil trimelitato • Dioctil glutarato 	<ul style="list-style-type: none"> • (Poli) metil metacrilato • Copolímeros de tipo metacrilato • Caucho acrílico Derivados de celulosa • (Poli) vinil acetato • (Poli) α-cianoacrilato

Fuente: Kida, Koichi c/o Mitsubishi Gas Chem. Com., Inc. Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, Method of producing a methyl methacrylate, EP 0 941 984, February 17 1999.

Para la elaboración de polímeros acrílicos, los monómeros más utilizados son los acrilatos y metacrilato, siendo estos dos tipos de monómeros usados en sistemas UV,

² Fillers: Material de relleno [22]

esto es, utilizan fotoiniciadores para la polimerización. El fotoiniciador juega el papel importante, controla la rapidez de iniciación de polimerización y la penetración de la luz incidente, debido a la profundidad de curado. La rapidez de polimerización depende de la reactividad del grupo funcional, su concentración en la viscosidad del polímero, así como la intensidad de radiación [22, 35].

Los fotoiniciadores generan radicales libres en dos maneras bajo radiación: Norrish tipo 1 y Norrish tipo 2. Norrish tipo 1, es un mecanismo de ruptura homolítica de un enlace carbono-carbono que conduce a dos radicales libres; Norrish tipo 2, implica eliminación del iniciador, la cual puede estar dentro de la misma molécula o entre dos moléculas [22, 36].

En los cianoacrilatos, existen diferentes técnicas que permiten controlar la velocidad de polimerización, entre ellas, se encuentra el uso de aceleradores que pueden añadirse a la mezcla de reacción como parte de la formulación de alguno de los componentes, o bien, pueden adicionarse al momento de la reacción. Otra opción es el uso de activadores en solución, los cuales se rocían directamente en las superficies a unir. Los aceleradores de curado incluyen anillos de esteres, componentes calixarenos (5, 11, 17, 23-tetra-ter-butilcalix [14] areno-25-26-39-28-tetrol) [37], componentes de anillos silicatos y aminas [18, 20].

Los esteres del ácido 2-cianoacrilico son electrofilicos, lo que los hace altamente reactivos, por lo tanto la humedad en la superficie de los materiales depositados puede actuar como iniciador de la polimerización. Los iones metálicos presentes en coordinación con el material depositado, mejoran la reactividad del doble enlace de la molécula del 2-cianoacrilato, por lo que la reacción de polimerización se ve favorecida. Este proceso produce un polímero lineal de estructura regular tipo cabeza-cola en los que se ven favorecidos enlaces entre radicales metil, etil, butil y alil de 2 cianoacrilatos, especialmente en la producción de adhesivos comerciales [13]. La polimerización radical en los cianoacrilatos se puede llevar a cabo mediante el componente generador de radicales como puede ser peróxido dibenzoilo utilizando 2, 4, 6-trifenilpiriliumtetrafluorobate (TPT) como fotoiniciador.

Además, los componentes ferrocenos y el 2-hidroxy-2metil-1-fenil-1-propano son adecuados para la iniciación de la polimerización de cianoacrilatos, siendo necesario un tiempo de radiación UV de 5 a 15 segundos [43].

Los espesantes son añadidos para incrementar la viscosidad de las composiciones de los adhesivos 2-cianoacrilatos. Los monómeros 2-cianoacrilatos generalmente tienen una baja viscosidad. La cantidad de espesantes generalmente utilizada en un adhesivo 2-cianoacrilato del 20% en peso o menos basado en el peso total de la composición del adhesivo [31].

Por otra parte, los estabilizadores son añadidos en general para incrementar la vida útil del compuesto, evitando que se lleve a cabo la polimerización prematura durante el almacenaje de los monómeros o mejorando las propiedades mecánicas del polímero. El estabilizador típico para prevenir la polimerización en radicales es la hidroquinona y para prevenir la polimerización anionica es el trifluoruro de boro [19].

Los aditivos plastificantes, son sustancias que se adhieren a los compuestos acrílicos para mejorar su flexibilidad [26]. Finalmente los fillers son usados para ampliar el material y modificar las propiedades, en algunos casos, los fillers son un componente principal en el sistema [22].

La adición de fillers orgánicos de tamaño de partículas de 2 a 200 μm en las composiciones, puede mejorar la tixotropía o el espesor en un polímero copolimérico o terpolimérica mejorando la resistencia al rasgado.

2.3 Polímeros fotosensibles

Los polímeros fotosensibles [44] son aquellos que al ser irradiados experimentan un cambio en sus propiedades, comportamiento o respuesta. Estos cambios por interacción con la luz son consecuencia de las reacciones fotoquímicas, que conducen a verdaderos cambios estructurales, y aquellos procesos previos como los procesos foto físicos.

Las ventajas de la luz como reactivo en estos procesos son:

- Control espacial: La luz se propaga en línea recta y solo induce la reacción deseada allí donde incide.
- Control temporal.: El proceso o reacción comienza / termina al encender/apagar la luz.
- Permite el trabajo a temperatura ambiente.

En principio, podemos dividir los fotopolímeros en dos grandes grupos según los efectos que produce la luz sobre ellos:

- Reacciones foto físicas producidas en el seno de un sistema polimérico
- Cambios químicos en la estructura del polímero.

2.3.1 Procesos foto-físicos

La absorción de luz se produce si la energía de radiación incidente se corresponde con la diferencia de energías entre los estados fundamental y excitado.

Los procesos de desactivación radiactivos son la fluorescencia y la fosforescencia. La fluorescencia es la desactivación radiactiva desde el estado excitado al fundamental, es decir, emite parte de la energía absorbida en forma de luz a una longitud de onda diferente a la absorbida y la otra parte es disipada en forma de calor. Se produce en un espacio de tiempo corto, es lo que la diferencia de la fosforescencia.

La fosforescencia es el proceso de desactivación radiactiva en el que existe un retraso temporal entre la absorción y la remisión de los fotones, por lo que se emite luz durante un tiempo más prolongado aún después del corte del estímulo que lo provoca.

Otro fenómeno generado por la luz es el fotocromatismo, que consiste en cambio de color reversible entre dos estados con diferente espectro de absorción, cuando la luz incide. El fotocromatismo se produce por alguna modificación estructural como la isomerización de valencia o la isomerización cis-trans, entre otras. En general, los polímeros que incorporan grupos que sufren isomerizaciones reversibles foto inducidas, experimentan cambios que modifican sus propiedades físicas, tanto en estado sólido como en disolución.

El efecto antena se produce cuando macromoléculas con grupos cromóforos aromáticos absorben la luz y son capaces de transferir la energía electrónica a otros atrapadores. Los fenómenos implicados son migración de energía y transferencia directa de energía.

Otro fenómeno es la fotoconductividad. La absorción de luz da lugar a excitones que son capturados por aceptores o donadores, los grupos funcionales se polarizan y se inducen separación de cargas. En muchas aplicaciones se combinan dos materiales, uno actúa como foto generador de cargas y el otro es el sustrato a través del que se produce el transporte de cargas. Los polímeros fotoconductores que se utilizan actualmente son polímeros con grupos fotoactivos unidos covalentemente o cromóforos embebidos en matrices poliméricas (polímeros dopados molecularmente).

2.3.2 Reacciones fotoquímicas

Las reacciones químicas de sistemas fotosensibles son, en su mayoría, reacciones de foto polimerización (y foto entrecruzamiento) y reacciones de fotocicloaddición [2+2], o foto polimerización por etapas.

La foto polimerización o polimerización foto iniciada consiste en exponer a radiación UV a monómeros en presencia de un foto iniciador, de esta manera, una sustancia que inicialmente estaba en estado líquido, se transforma rápidamente en un polímero sólido. Existen dos mecanismos de reacción polimerización foto iniciada.

En las reacciones de polimerización radical los monómeros comúnmente utilizados son prácticamente siempre monómeros acrílicos. Los fotoiniciadores utilizados principalmente son cetonas aromáticas.

Las reacciones de polimerización catiónica utilizan en general como monómeros estructuras que utilizan anillos epoxídicos. Los fotoiniciadores suelen ser sales de amonio que generan bajo radiación, las moléculas de ácido que inician la reacción.

Las reacciones de foto entrecruzamiento o fotocurado son aquellas en las que se realiza la polimerización de algún monómero poli funcional, obteniéndose una red tridimensional entrecruzada.

La fotopolimerización ha supuesto un gran avance en aplicaciones en recubrimientos, tintas de impresión, adhesivos y fabricación de circuitos impresos y discos ópticos.

La fotopolimerización o curado por UV, no solo tiene un gran número de aplicaciones en la industria, si no que es un proceso comercialmente rentable ya que se usan sistemas que no necesitan disolventes y que permiten ser transformados fácilmente a temperatura ambiente, sin grandes requerimientos energéticos.

La fotocicloaddición [2+2] o polimerización topoquímica también llamada fotopolimerización de cuatro centros. Se diferencia de la polimerización fotoiniciada en que necesita absorber un fotón por cada doble enlace que reacciona. Esta polimerización transcurre a través de la formación de anillos de ciclo butano mediante la absorción de un fotón por parte de un doble enlace. En general sucede en el estado sólido dentro de los propios cristales de monómero, ya que esta ordenación cristalina es la que permite la proximidad entre sí de los dobles enlaces que favorezca la formación de los anillos.

Con esta polimerización, se obtienen polímeros con alto grado de ordenación de los sustituyentes laterales. Así mismo, dependiendo de los sustituyentes laterales se pueden conseguir polímeros con características alternantes hidrofóbicas e hidrofílicas o con propiedades ópticas no lineales por presencia de sustituyentes donadores o aceptores de carga. Con esta reacción también se puede obtener polímeros entrecruzados.

El fotoinjerto se usa para modificar las superficies y consiste en la fotopolimerización de monómeros en la superficie de los materiales. Estas reacciones de foto injerto en polímeros permiten modificar muchas propiedades superficiales como el brillo, adhesividad, comportamiento anti-estático, antiniebla, estabilidad térmica, resistencia a la abrasión, incompatibilidad, permeabilidad selectiva, etc.

30 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Los principales avances conseguidos en las tecnologías de la información, la imagen y la electrónica, se deben al desarrollo de materiales fotosensibles, y principalmente a los polímeros fotosensibles o fotoreactivos.

3.Pruebas y ensayos

El crecimiento inusitado de las aplicaciones de los polímeros procede de sus costos competitivos y propiedades versátiles, estas propiedades únicas de los polímeros junto con su peso ligero hacen que sea la selección predilecta a comparación de los materiales metálicos y cerámicos en algunas aplicaciones. Los polímeros son tan complejos e impredecibles que se debe tener el conocimiento elemental de cómo está siendo influenciado y no solamente basta con tener los datos básicos que nos proporciona su fabricante, si no comprenderlos para así ser usado de la manera más eficaz en la ejecución de la impresión de prototipos. En este capítulo se describe las especificaciones del proceso para la impresión de los prototipos, de acuerdo a las características de la maquina Stratasys Objet Eden 260V (Ver Figura 3-1).

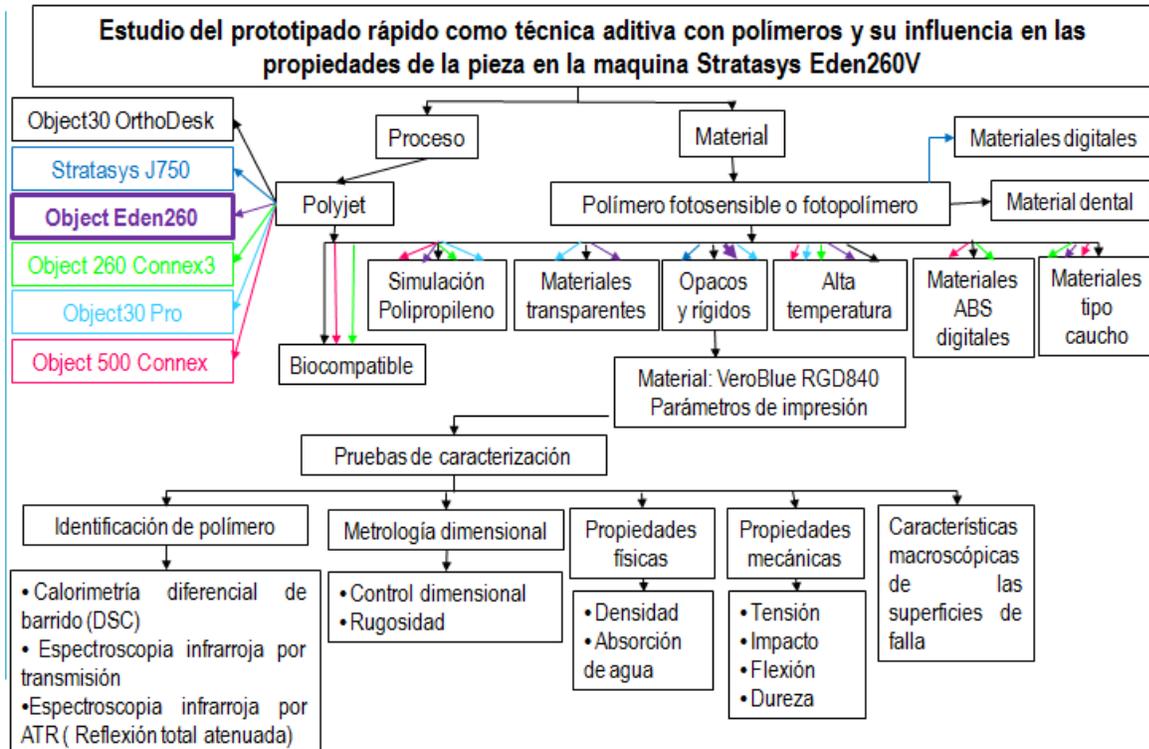
Figura 3-1 Especificaciones del proceso maquina Stratasys Eden 260V

Especificaciones del proceso de fabricación	
Predeterminadas	Variantes
Tamaño de la bandeja (X x Y x Z) : 260 x 260 x 200 mm.	Modo de impresión
	Alta calidad [HQ] 16 µm Alta velocidad [HS] 30 µm
Tamaño de construcción neto (X x Y x Z): 255 x 255 x 200 mm	Familia de materiales: Rígidos y Opacos, Similar al polipropileno, similar al caucho, resistente a altas temperaturas.
Software Objet Studio	Acabado (En la ultima capa de construcción)
	Matte (opaco) Glossy (Brillante)
Formato de archivo: STL y SLC	Orientación de la pieza a imprimir - Automático o de acuerdo al seleccionado por el usuario (0°, 45° y 90°)
Tiempo de curado con UV: 5 a 15 segundos	

Fuente: Ángela Cárdenas

Luego se precisa por medio de un mapa conceptual (Ver Figura 3-2), como es la estructura del procedimiento experimental, la cual se empleo ordenadamente de acuerdo a las pruebas de caracterización para así documentar los conceptos que se encuentran en este capítulo.

Figura 3-2 Mapa conceptual tesis



Fuente: Ángela Cárdenas

3.1 Material

En el proceso de impresión se utilizan dos tipos de materiales, un material modelo que es el que constituye el modelo o pieza trabajado y un material de soporte que llena los vacios y espacios en el modelo durante la impresión el cual se retira después con la mano o agua. Las impresoras 3D Polyjet ofrecen una amplia gama de opciones de materiales, clasificándola fundamentalmente en nueve familias específicas: Material digital, Material ABS Digital, Alta temperatura, Transparente, Rígido y Opaco, Simulación polipropileno, Similar al caucho, Biocompatible y Material dental. De esta clasificación se seleccionó: Rígido y Opaco debido a que ofrecen una excelente visualización de detalles,

son materiales fuertes, duraderos y por lo tanto los prototipos que se generen en cuanto a ajuste y forma serán precisos, incluso para partes móviles y de este grupo se seleccionó específicamente el material: VeroBlue RGD840, por sus principales propiedades, en especial por el alto porcentaje de alargamiento a la rotura y los datos facilitados por el fabricante, Tabla 3-1. Las propiedades del material de soporte SUP 705 no son facilitadas por el fabricante Stratasys.

Tabla 3-1 Propiedades VeroBlue RGD840

Propiedades	ASTM	Unidad	Valor
Resistencia a la tensión	D638-03	MPa	50-60
Alargamiento a la rotura	D638-05	%	15-25
Modulo de elasticidad	D638-04	MPa	2000-3000
Resistencia a la flexión	D790-03	MPa	60-70
Modulo de Flexión	D790-04	MPa	1900-2500
Temperatura de deflexión a 0.45 MPa	D648-06	°C	45-50
Temperatura de deflexión a 1.82 MPa	D648-07	°C	45-50
Resistencia al impacto izod	D256-06	J/m	20-30
Absorción de agua	D570-98 24hr	%	1.5 – 2.2
Temperatura de transición vítrea	DMA, E	°C	48-50
Dureza Shore	Scale D	Scale D	83-86
Dureza Rockwell	Scale M	Scale M	73-76
Densidad	D792	g/cm ³	1.18-1.19
Contenido de ceniza	USP281	%	0.21-0.22

Fuente: www.stratasys.com

3.2 Parámetros impresión

En el estudio previo se seleccionó las pruebas y ensayos a ejecutar con la posibilidad de ser desarrollados en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. Para constituir un fundamento absoluto se emplean las normas ASTM, algunas de las cuales son referenciadas por el fabricante Stratasys para el material VeroBlue RGD840, la cantidad de muestras por cada prueba serán las indicadas por cada norma. El modelamiento de las muestras se realizó en el software Solid Edge ST6, para obtener una mejor aproximación del modelo en CAD se guardan los archivos con extensión .STL y con estos parámetros:

34 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

- Formato de archivo: ASCII
- Tolerancia de desviación: 1 mm
- Tolerancia del ángulo: 4°.

En el software Objet Studio Eden 260V se preparan los archivos .STL de los modelos a ser construido; el cual permite configurar el paso a paso de los parámetros de la construcción de las muestras. Los parámetros seleccionados para ejecutar la impresión de las muestras son:

- Material: VeroBlue RGD840.
- Acabado: Matte (opaco) en la última capa construida.
- Acabado: Glossy (brillante) en la última capa construida.
- En High speed (HS) se obtiene un espesor de capa (resolución) de 30 micras.
- En High quality (HQ) se obtiene un espesor de capa (resolución) de 16 micras.
- Las orientaciones de las muestras en la bandeja de construcción serán de 0°, 45° y 90° de acuerdo a la selección para cada prueba
- El parámetro de soporte heavy (fuerte) en una característica del software de la máquina en donde el soporte queda más compacto es recomendado para construcciones de piezas largas.

De acuerdo a las normas ASTM se modelaron e imprimieron las muestras para los ensayos de densidad, absorción de agua, tensión, impacto, flexión y dureza. Para las pruebas de rugosidad y control dimensional las muestras se modelaron e imprimieron de acuerdo a datos establecidos, Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Parámetros muestras

Prueba	Características									
	Acabado Superficial		Total probetas por Calidad (Orientación)							
	Matte	Glossy	HQ (0°)	HS (0°)	HQ (45°)	HS (45°)	HQ (90°)	HS (90°)	HQ (0°) Soporte Heavy	HS (0°) Soporte Heavy
Densidad	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Absorción de agua	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Tensión	X	-	X	X	X	X	X	X	-	-
Impacto	X	-	X	X	X	X	X	X	-	-
Flexión	X	-	X	X	-	-	-	-	X	X
Dureza Shore D	X	-	X	-	X	-	X	-	-	-
Rugosidad	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Control dimensional	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-
	-	X	-	X	-	-	-	-	-	-

Fuente: Ángela Cárdenas

3.3 Identificación del polímero

Habitualmente existen métodos simples para la identificación de los polímeros (Solubilidad, Pirolysis, Llama, etc.) y en general estos podrían ser suficientes con el fin de asignar a una muestra desconocida un determinado grupo de plásticos. Sin embargo estos métodos simples en el momento que son empleados en el análisis de polímeros de una composición más compleja, solo se puede obtener información cualitativa. Por lo tanto para adquirir información química más detallada, es necesario utilizar métodos más avanzados para analizar un fotopolímero en este caso específico se usó la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para determinar las características térmicas de los polímeros tanto puros como modificados, la Espectroscopia Infrarroja (IR) permite la identificación de grupos funcionales en un compuesto en base a la excitación de modos normales de vibración característicos de dichos grupos y que se produce como consecuencia de la radiación electromagnética de frecuencias definidas dentro del rango infrarrojo y Espectroscopia infrarroja por ATR (Reflexión Total Atenuada) es un muestreo basado en la radiación infrarroja y del alto índice de refracción; debido a que estos métodos se efectúan rutinariamente en laboratorios analíticos y los instrumentos son

accesibles, además existen extensas colecciones y bancos de datos de resultados, lo cual permite tanto la identificación cualitativa y cuantitativa. No se utiliza la técnica de análisis termogravimétrico o termogravimetría (TGA) en donde se permite determinar cambios en la masa de una sustancia en función de la temperatura o del tiempo, ya sean motivados por transformaciones físicas o químicas, por ser una técnica cuantitativa y se necesita identificar el polímero de una manera práctica.

3.3.1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

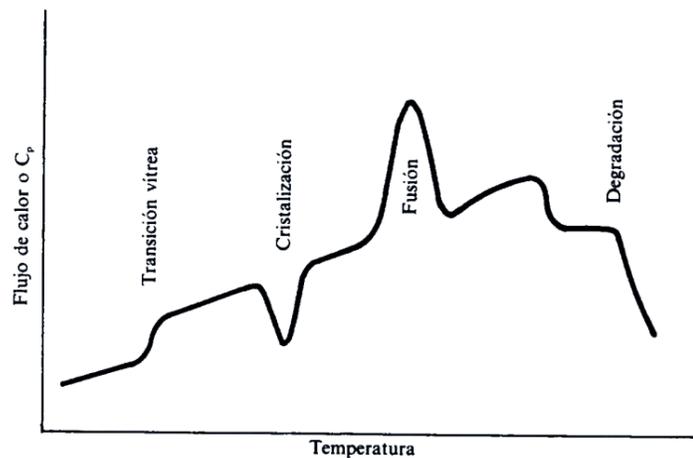
Es el método más simple y universalmente empleado para el estudio cuantitativo de transición térmica. En la calorimetría de barrido diferencial la muestra y la referencia inerte son calentadas en una atmosfera de oxígeno. Se someten a una temperatura que aumenta en forma continua; en este caso, se agrega calor sobre la muestra o la referencia, a modo de mantenerlas a una temperatura idéntica. El calor agregado que se registra, compensa el que se pierde o se gana como consecuencia de reacciones endotérmicas o exotérmicas que tienen lugar en la muestra. Se registra el valor de la energía que difiere entre la muestra y la referencia ($d\Delta Q/dT$) y también sus valores individuales. El material de referencia debe de cumplir con una serie de características para no desvirtuar la medida realizada:

- No debe experimentar eventos o procesos térmicos en el intervalo de temperatura a estudiar.
- No debe reaccionar con el portamuestras.
- Su conductividad térmica debe ser similar a la muestra.

La preparación de la muestra es importante para reducir la resistencia térmica en el sensor del equipo. Así se evitan gradientes de temperatura dentro de la muestra y el consiguiente fallo de la señal registrada. Por esta razón las muestras ideales son películas o muestras que ocupen perfectamente la parte inferior del portamuestras. Suele ser necesario cortar las muestras voluminosas en secciones lo más pequeñas posibles. A continuación, se sella el portamuestras con una tapa. Los datos son graficados en la ordenada, la energía que difiere entre la muestra y la referencia $d\Delta Q/dT$ contra la temperatura en la abscisa. Tales gráficos son llamados Termogramas ver Figura 3-3. Se determina la cantidad de calor que es absorbida o generada por una sustancia que sufre

un cambio físico o químico, el cual altera la energía interna de la sustancia. Esta técnica es útil también para medir efectos endotérmicos y exotérmicos que son debido a un aumento o disminución en la entalpía del espécimen de prueba e incluso, para medir la estabilidad térmica y la estabilidad a la oxidación de una sustancia.

Figura 3-3 Termograma típico de un polímero semicristalino [113]

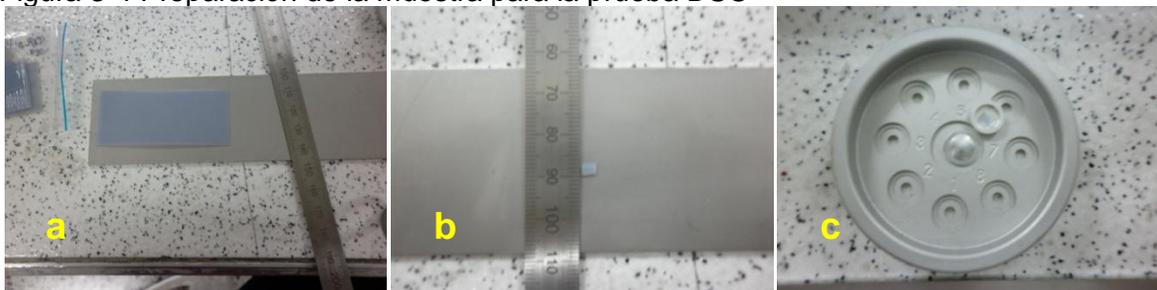


Fuente: Llorente Uceta, M.A; Horta Zubiaga, A. Técnicas de caracterización de polímeros. UNED, 1991.

Según la norma ASTM E1356, la preparación de la muestra es (Ver Figura 3-4):

- Se tomó una lámina de VeroBlue RGD840 sólido.
- Su dimensión es: 3 x 3 mm, espesor mínimo: 40 μm .
- Ubicar en el porta muestra de referencia: 1/3 ME 51119870 AL-CRUCIBLES 40 μl WITHOUT PIN ensamblado a presión con su contraparte de referencia 1/2 ME-51119871 AL-LIDS, usando una balanza analítica METTLER TOLEDO ME204 para un peso mínimo: 0.01 mg y un peso máximo: 220 g.

Figura 3-4 Preparación de la muestra para la prueba DSC



Fuente: Ángela Cárdenas

El encapsulado tiene un peso aproximado de 6 mg, con el analizador térmico METTLER TOLEDO ubicado en el Laboratorio de Química - Polímeros - Universidad Nacional de Colombia, se ejecutó la respectiva prueba, donde debe cumplir además con los requisitos de: temperatura de 20°C a 600° C, atmosfera oxidante, velocidad de calentamiento de 5°C x min. El rango de temperatura seleccionado es donde ocurren todas las transiciones térmicas de los polímeros y la velocidad de calentamiento usada permite aumentar la resolución del equipo y así se aumenta la separación de las transiciones.

3.3.2 Espectroscopia infrarroja por transmisión

Los polímeros y sus aditivos, como sustancias orgánicas, se pueden analizar tanto por transmisión como por reflexión. Los fotones de radiación infrarroja son absorbidos por los enlaces de una molécula pasando a niveles vibracionales superiores. Cada tipo de enlace absorbe radiación infrarroja a una frecuencia distinta, lo que permite determinar qué tipo de grupos funcionales posee la molécula en estudio. Los espectrofotómetros de infrarrojo trabajan en el infrarrojo medio y hacen un barrido desde los 400 cm^{-1} hasta los 40000 cm^{-1} . Tradicionalmente en el eje x de los espectros de infrarrojo se emplea el número de ondas. En el eje y se representa el porcentaje de radiación transmitida (transmitancia) que se representa por %T.

Experimentalmente, para obtener el espectro infrarrojo por transmisión de muestras poliméricas hay cuatro metodologías aplicables.

1. Tomar el espectro directamente de lámina, si y solo si, si esta tiene un espesor menor a 50 μm .
2. Si la muestra es de mayor espesor a 50 μm o son gránulos, se puede tomar el espectro por transmisión calentando el polímero por encima de su temperatura de transición vítrea y haciendo láminas lo suficientemente delgadas para tomar un espectro directamente (por presión).

3. Tomar una muestra del polímero líquido y poner unas gotas de la solución sobre una pastilla de KBr^3 que es transparente a la radiación infrarroja.
4. Hacer las pastillas de KBr con el polímero molido finamente para lo cual se mezcla exhaustivamente 1 mg de la muestra con aproximadamente 100 mg de KBr y posteriormente se prensa.

En el caso de estudio se eligió la tercera metodología donde se utiliza como material base para el análisis KBr por ser transparente y encontrarse en el espectro infrarrojo trabajado [46]. Al obtener una pequeña muestra directamente de VeroBlue RGD840 líquido se colocó en una pastilla de KBr , para ser analizada con el equipo Espectrómetro infrarrojo ubicado en el Laboratorio Grupo de Macromoléculas - Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, para así conocer sus principales grupos funcionales.

3.3.3 Espectroscopia infrarroja por ATR (Reflexión Total Atenuada)

Para el estudio de polímeros tiene una gran aplicación la espectrometría de reflexión en el infrarrojo medio, específicamente cuando el fenómeno de reflexión de la radiación es del tipo de reflexión total atenuada (ATR) porque ofrecen una ventaja adicional a la técnica IR y es la mínima preparación de la muestra, lo cual hace que sea una técnica muy rápida.

El principio de la técnica es el fenómeno de reflexión en la interfase entre un medio con alto índice de refracción y uno con índice de refracción menor. La reflexión es total si el ángulo de incidencia es mayor al ángulo crítico. La radiación penetra una distancia llamada profundidad de penetración en el medio con menor índice de refracción, antes de ser reflejada. Normalmente tiene magnitudes entre 0,1 y 10 μm . La radiación que penetra se denomina onda evanescente, la cual se atenúa si el medio absorbe dicha radiación. En las múltiples reflexiones que se dan, tiene lugar fenómenos de absorción y atenuación de la radiación [47].

³ KBr : Bromuro de potasio

En principio, la espectrometría por ATR suministra misma información que la obtenida por transmisión y los espectros obtenidos son similares. Sin embargo, se pueden citar ciertas diferencias, las cuales se presentan en la Tabla 3-3.

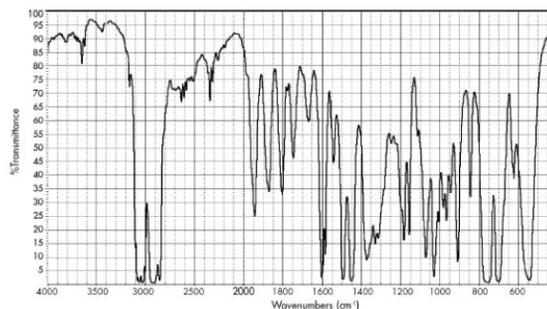
Tabla 3-3 Diferencias entre la espectroscopia infrarroja por transmisión y reflexión atenuada [47]

Espectroscopia Infrarroja por transmisión	Espectroscopia infrarroja por reflexión total atenuada
Espectros con intensidades mayores de las bandas a longitudes de onda corta	Espectros con intensidades menores de las bandas a longitudes de onda corta intensidades relativas diferentes
Espectros con absorbencias dependientes de la dimensión del camino óptico	Espectros con absorbencias independientes del espesor de película
Las señales pueden variar linealmente con la concentración	Las señales no varían linealmente con la concentración
Pérdida de muestra en el ensayo	Conservación de la muestra en el ensayo
Requiere preparación de las muestras sólidas	No requiere preparación de las muestras
La radiación interactúa con toda la muestra	La radiación interactúa solo con la superficie de la muestra

Fuente: Skoog, D., Holler, F., & Nieman, T. (2001). Principios de Análisis Instrumental. Madrid: McGraw Hill Interamericana de España

Para mostrar las diferencias en los espectros, se presentan como ejemplos espectros infrarrojos de poliestireno de alto impacto, tomados por transmisión (ver Figura 3-5) y por ATR (ver Figura 3-6). [48]

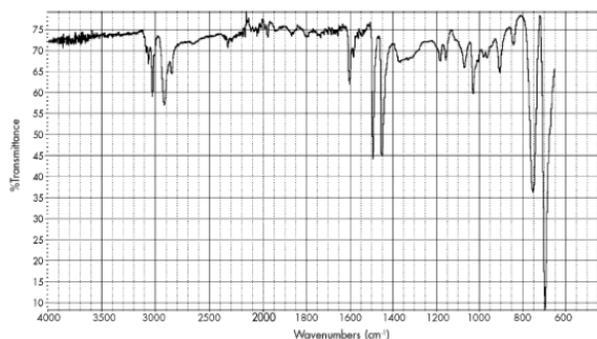
Figura 3-5 Espectro de transmisión de una lámina de poliestireno (HIPS) presionada a 130°C: HH101 BP CHEMICALS [48]



wavenumbers= número de onda y %transmittance= % transmitancia

Fuente: Forrest, M., Davies, J., & Davies, Y. (2007). The Rapra Collection of infrared Spectra of Rubbers, Plastics and Thermoplastic Elastomers. Smithers Rapra Publishing.

Figura 3-6 Espectro por ATR de una lamina de poliestireno (HIPS) HM101 BP CHEMICALS [48]



wavenumbers= número de onda y %transmittance= % transmitancia

Fuente: Forrest, M., Davies, J., & Davies, Y. (2007). The Rapra Collection of infrared Spectra of Rubbers, Plastics and Thermoplastic Elastomers. Smithers Rapra Publishing.

Debido a que el material cambia de estado por su reacción al efecto de la luz ultravioleta este es la causa para complementar con una prueba de espectroscopia infrarroja por ATR-IR para el VeroBlue RGD840 líquido y sólido. Esta prueba se efectuó en el Espectrómetro Infrarrojo del Laboratorio Química - Grupo de Macromoléculas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

3.4 Metrología dimensional

La finalidad de la metrología dimensional es determinar con la exactitud adecuada las magnitudes de lo que vamos a medir. En la fabricación se garantiza y verifica la

concordancia del producto con sus especificaciones de diseño. Hoy se precisa una mayor exactitud en las mediciones, esto es necesario por la mayor precisión operacional y mejores prestaciones en sistemas dinámicos, ensamblado automático de piezas, normalización, miniaturización y compactación de componentes, fiabilidad de máquinas y fabricaciones en general. Básicamente la metrología dimensional está dividida en dos grupos a) Micro y Nano geométrica: donde se abarca la ondulación, rugosidad y nano metrología; y b) Macro geométrica: abarca la dimensión, forma y ubicación. En la técnica de la medición generalmente se requiere de un instrumento como medio físico para determinar la magnitud de una variable y determinar el valor de una cantidad desconocida la cual no podría medirse utilizando la habilidad sensorial.

3.4.1 Control dimensional

En el modelamiento de las muestras se debe garantizar la calidad del proceso de impresión, por este motivo se debe incluir las tolerancias dimensionales (longitud y ángulos), tolerancias geométricas (forma, orientación, situación, excentricidad (de giro)). El modo de la selección y creación de la muestras fue basada en formas geométricas básicas (cubo, cuadrado, rectángulo, triangulo, radio) en donde sin importar la geometría de la pieza el software de modelamiento generará un enmallado simétrico basado en triángulos para cada muestra. Así cuando se impriman se controla la geometría y este debe ser acorde a la secuencia descrita en el numeral 3.2.

El análisis estadístico de datos de mediciones permite obtener una determinación analítica de la incertidumbre del resultado final, mediante mediciones repetidas de una variable en condiciones de operación, las condiciones de operación implican que las condiciones externas que controlan el proceso a partir del cual se obtiene el valor medido se mantienen en valores fijos mientras se realiza la prueba. El primer aspecto que se consideró en el control dimensional fue el de reconocer un sistema de medición apto formado por el instrumento y el usuario. En proporción los usuarios como el instrumento de medida provean dentro del sistema de medición dos tipos de variación: unas que se deben a una eventualidad y que son imposibles de eliminar y otras que se producen generalmente por descuido o accidente dentro del proceso y que pueden ser corregidas una vez que se detectan. El estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) permite

calcular la variabilidad de las medidas dentro de cualquier tipo de proceso y determinar si esta variación es aceptable o no. Los estudios de R&R de las mediciones determinan qué porcentaje de la variación observada en el proceso se debe a la interacción entre las partes (réplicas), al equipo, al usuario o a la interacción usuario vs parte. Se asumió que la principal fuente de variación del proceso es la máquina: Impresora Objet Eden 260V, debido a la manera en que elabora las muestras. En la Tabla 3-4. Se definen la cantidad de muestras que se modelaron, imprimieron y dimensión a las cuales se le efectuó medición.

Tabla 3-4 Muestras para control dimensional VeroBlue RGD840

Probeta	Cantidad	Instrumento	Número mediciones	Dimensión					
				Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Radio (mm)	Espesor (mm)	Angulo (°)
Cubo S1	2	Micrómetro	5	10	10	10	-	-	-
Cubo R1	2	Micrómetro	5	10	10	10	1	-	-
Cubo S2	2	Micrómetro	5	20	20	20	-	-	-
Cubo R2	2	Micrómetro	5	20	20	20	2	-	-
Rectángulo S1	2	Micrómetro	5	10	20	5	-	-	-
Rectángulo R1	2	Micrómetro	5	10	20	5	1	-	-
Rectángulo S2	2	Micrómetro	5	20	40	10	-	-	-
Rectángulo R2	2	Micrómetro	5	20	40	10	2	-	-
Cubo S4	1	Calibrador pie de rey	5	40	40	40	-	-	-
Cubo R4	1	Calibrador pie de rey	5	40	40	40	4	-	-
		Calibrador pie de rey	5	40	80	40	-	10	-
Escalera triangular	1		5	-	-	-	-	-	27
		Goniómetro	5	-	-	-	-	-	53
			5	-	-	-	-	-	90
Cuadrado agujero central sin radio	1	Calibrador pie de rey	5	40	40	20	-	5	-
Cuadrado agujero central con radio interno	1	Calibrador pie de rey	5	40	40	20	2.5	5	-

- 44 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Tabla 3-4 (Continuación)

Probeta	Cantidad	instrumento	Número mediciones	Dimensión					
				Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Radio (mm)	Espesor (mm)	Angulo (°)
Escalera sin radio	1	Calibrador pie de rey	5	20	40	40	2	3	-
Escalera radio externo	1	Calibrador pie de rey	5	20	40	40	2	3	-
Escalera radio interno	1	Calibrador pie de rey	5	20	40	40	2	3	-
Escalera radio completo	1	Calibrador pie de rey	5	20	40	40	2	3	-

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 3-5 indica las dimensiones de la muestra de geometría libre creación que se modeló e imprimió y las medidas a las cuales se efectuó su medición.

Tabla 3-5 Muestra geometría libre creación VeroBlue RGD840

Probeta	Cantidad	Instrumento	Número mediciones	Dimensión						Rosca	
				Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Radio (mm)	Espesor (mm)	Angulo (°)		
Geometría libre	1	Micrómetro	5	-	-	-	-	10	-	-	
		Galga	5	-	-	-	10	-	-	-	
			5	-	-	-	20	-	-	-	
		Calibrador pie de rey	5	50	55	60	-	-	-	-	
		Goniómetro	5	-	-	-	-	-	59	-	
			5	-	-	-	-	-	31	-	
			5	-	-	-	-	-	90	-	
		Galga	5	-	-	-	-	-	-	-	M10 x 1.5
			5	-	-	-	-	-	-	-	R11.11 x 1.814
				5	-	-	-	-	-	-	M30 x 2

Fuente: Ángela Cárdenas

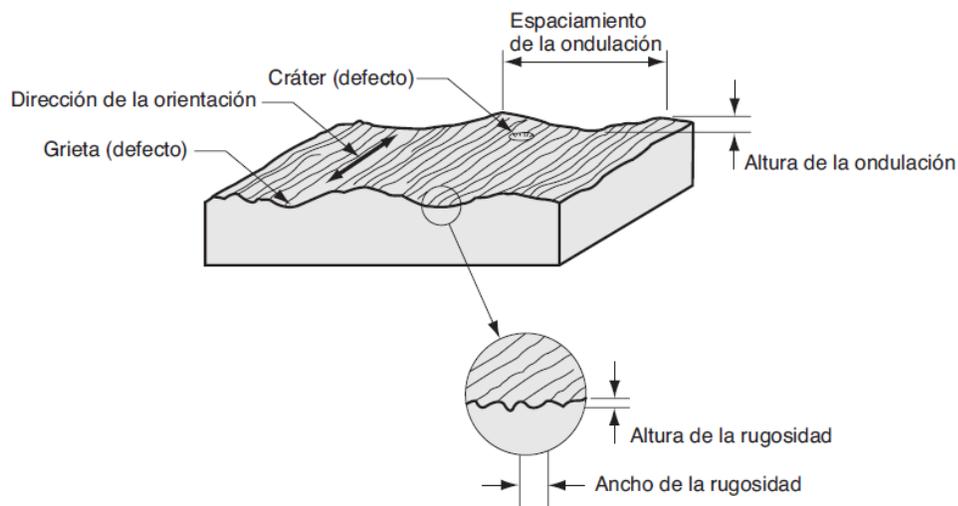
Los radios y las roscas están señalados en color rojo ya que es adecuado utilizar como instrumento de medición galgas de radios y roscas sin embargo estos son una réplica de una medida solo nos sirve para establecer un patrón y no un resultado apropiado para el estudio R&R.

Estas mediciones se efectuaron de acuerdo a la Norma NTC 4352 – Micrómetros para mediciones, exteriores, construcción normal. Conceptos, Requisitos y Ensayos, la NTC4303 Pie de Rey. Requisitos y ensayos en metrología en el Laboratorio de Ensayos y Materiales – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

3.4.2 Rugosidad

La textura de la superficie consiste en las desviaciones repetitivas o aleatorias de la superficie nominal de un objeto: la definen cuatro características: rugosidad, ondulación, orientación y defectos o fallas, como se observa en la Figura 3-7. [64]

Figura 3-7 Rasgos de la textura de una superficie [64]

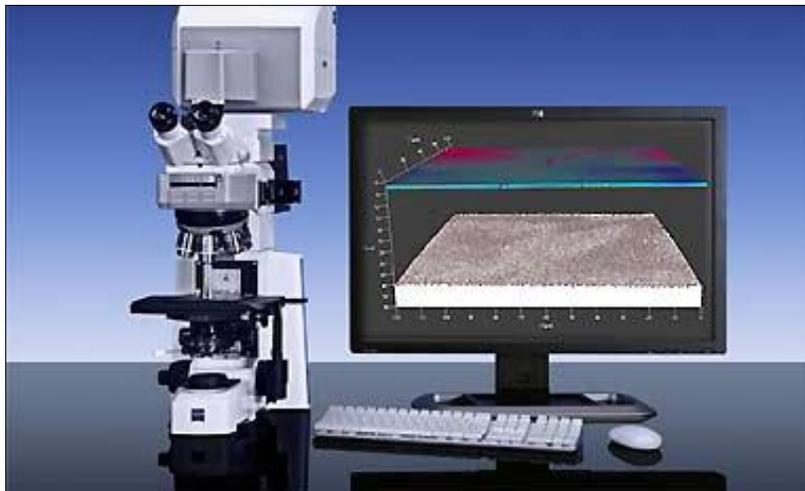


Fuente: Groover P. Mikell, Fundamentos de manufactura moderna. McGraw Hill. Tercera Edición. 2007.

La rugosidad se refiere a las desviaciones pequeñas, espaciadas finamente, de la superficie nominal y que están determinadas por las características del material y el proceso que formó la superficie. La ondulación se define como las desviaciones de

espaciamiento mucho mayor, ocurren debido a la deflexión del trabajo, vibraciones, tratamientos térmicos y factores similares. La rugosidad esta sobreimpuesta a la ondulación. La orientación es la dirección predominante o patrón de la textura de la superficie [64]. Una superficie perfecta es una abstracción matemática ya que cualquier superficie real por perfecta que parezca presenta irregularidades que se originan durante el proceso de fabricación. Para tomar la medida de rugosidad no se utilizó el rugosímetro HOMMEL T500 del Laboratorio de metrología - Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá por ser un método mecánico de contacto superficial y podría causar desgaste en la superficie, teniendo en cuenta la observación anterior las mediciones de rugosidad superficial se deben realizar pero sin contacto, por tal razón se sugiere usar métodos óptico-electrónico usando los equipos: Perfilómetro de Luz Blanca y Microscopio Confocal Láser Marca ZEISS/LSM 700 (Ver Figura 3-8), se encuentran ubicados en el Laboratorio de Tratamientos Térmicos y Superficies – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Figura 3-8 Microscopio Confocal Láser

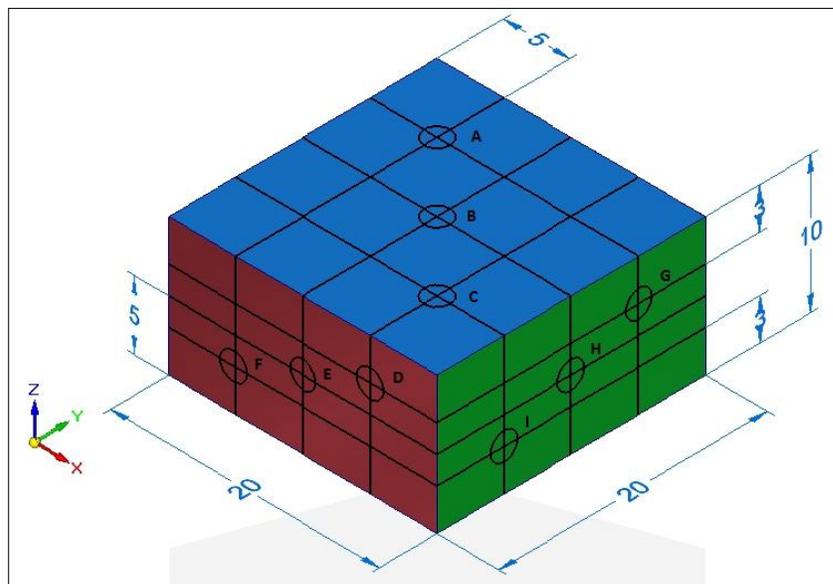


Fuente: Laboratorio de Tratamientos Térmicos y Superficies. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Para esta prueba solo se utilizó una muestra de acabado matte HQ 0°, con dimensiones: 20 x 20 x 10 mm. De acuerdo a la norma ASME B46.1-2009 Textura superficial (rugosidad superficial, ondulación y laxitud) en esta norma establece las directrices de las características dominantes de la superficie en la medición y si estas características son

relevantes. Como no existe una metodología para ejecutar las mediciones se elige el recorrido de manera simétrica y siguiendo la secuencia demarcada por el alfabeto comenzando con la letra A en la última capa de construcción plano X-Y (Azul) y con respecto a esa cara se continua en el plano Z-X (Rojo) y por ultimo en el plano Z-Y (Verde), Figura 3-9. Las condiciones de la muestra y el laboratorio debe tener la temperatura: $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa: $50 \pm 5\%$, además de minimizar la exposición del instrumento a las condiciones ambientales ya que pueden afectar los resultados de las pruebas.

Figura 3-9 Distribución de las posiciones para las mediciones de rugosidad (mm)



Fuente: Ángela Cárdenas

3.5 Propiedades físicas

Los materiales sólidos se encuentran rodeados de un medio que habitualmente contiene gases y líquidos. Las moléculas que se mueven libremente en los medios fluidos van a tener la oportunidad de interactuar y penetrar por la porosidad abierta del sólido, lo que afecta a las características y propiedades del mismo. El VeroBlue RGD840 es un material líquido el cual se encuentra contenido y sellado donde no es afectado por las condiciones del entorno.

En este ítem se investigó si la densidad y la absorción de agua del VeroBlue RGD840 sólido, son influenciadas por las condiciones del entorno debido al retiro del soporte y al estar en contacto con agua y/o ambiente húmedo puede generar los más mínimos cambios en su masa, volumen y dimensiones geométricas. En muchos polímeros el agua es capaz de introducirse entre las largas cadenas provocando swelling (hinchamiento) de la pieza. También existe algún caso excepcional en el que el agua provoca una disminución de volumen al favorecer la interacción entre las cadenas. Todos los cambios de dimensiones resultan muy perjudiciales para las aplicaciones de los polímeros.

3.5.1 Densidad

La densidad es la masa por unidad de volumen, habitualmente se expresa en gramos por centímetro cúbico. La densidad relativa o gravedad específica se define como la relación entre las masas de un volumen determinado de material y de un volumen equivalente de agua a 23 °C (densidad del agua 1 g/cm³). El resultado es adimensional es decir, sin unidades. La densidad aparente el cociente entre la masa de un determinado material sólido por unidad de volumen. Es decir cuánto ocupará dicho material considerando el volumen real debido a su morfología. Gran parte de los polímeros tienen una densidad entre 0.9 y 1.3. La densidad puede obtenerse de forma indirecta y de forma directa. Para la obtención indirecta de la densidad, se mide la masa y el volumen por separado y posteriormente se calcula la densidad. La masa se mide habitualmente con una balanza, mientras que el volumen puede medirse determinando la forma del objeto y midiendo las dimensiones apropiadas o mediante el desplazamiento de un líquido, entre otros métodos.

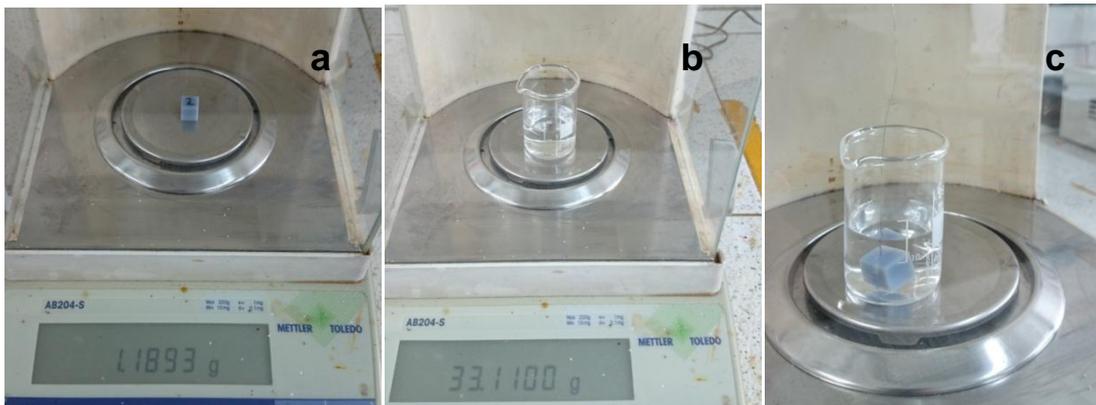
Si el sólido tiene poca superficie y mucho volumen, la cantidad total de agua que consigue penetrar en un tiempo determinado será comparativamente pequeña. Sin embargo, cuando el sólido tiene mucha superficie en relación a su volumen (láminas de pequeño espesor o sistemas dispersos de partículas finas) todo el volumen del sólido se sitúa a corta distancia de la superficie rica en agua y las condiciones de saturación se alcanzarán más rápidamente. Por tanto, para un tiempo fijo la absorción de agua depende también de la relación superficie/volumen del sólido. En definitiva, un estudio de los efectos de la absorción de agua en materiales sólidos debe incluir el seguimiento de

la variación de la absorción con el tiempo y con la temperatura para distintas condiciones ambientales de humedad relativa. Como se dijo anteriormente, la absorción provoca tanto variaciones de la masa como del volumen del sólido, y ambas características influyen en la densidad del sólido.

Según la norma ASTM D792 “Métodos de prueba estándar y densidad específica (densidad relativa) de plásticos por desplazamiento”, para la ejecución del ensayo, las muestras se preparan por el método A (Probetas de 1 a 50 g), la preparación de la muestra es (Ver Figura 3-10):

- Acondicionar las probetas a 23 ± 2 °C y $50 \pm 10\%$ de humedad relativa antes de un lapso de tiempo de 40 h, para después ser pesadas en una balanza digital marca METTLER TOLEDO Referencia AB204-S, con un rango de medición máx.: 220 g y min: 10 mg.
- Pesar el liquido (agua destilada) en la balanza.
- Pesar el liquido y la probeta sumergida en la balanza

Figura 3-10 Preparación de las probetas para el ensayo de densidad



Fuente: Ángela Cárdenas

Este ensayo se ejecuto en el Laboratorio de Ingeniería Química – Catálisis de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

3.5.2 Absorción de agua

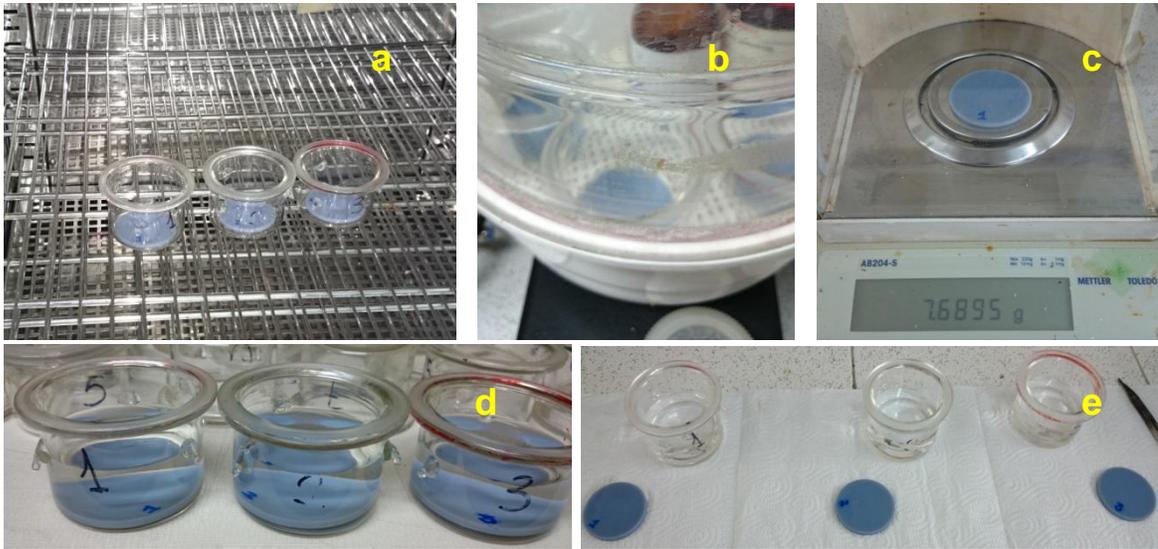
El agua existe en distintas formas en el interior del volumen que ocupa un material sólido, penetra y permanece atrapada por capilaridad dentro de los poros pequeños por mucho tiempo. Estas moléculas de agua se pueden eliminar colocando el material en un ambiente seco y cálido. Por otro lado el agua puede interaccionar con la superficie de los sólidos, es decir, las moléculas se anclan fuertemente en la superficie por fuerzas electrostáticas o eléctricas (fisisorción) o por un enlace químico (quimisorción). Esta situación se da tanto en la superficie externa del sólido como en la superficie interna de los poros. El agua quimisorbida o fisorbida es más difícil de eliminar que la de capilaridad, teniendo que recurrir a tratamientos térmicos más severos y prolongados en el tiempo. Finalmente, las pequeñas moléculas de agua también pueden penetrar por difusión en el material sólido. Dadas ciertas condiciones de humedad relativa, presión y temperatura, en el equilibrio existirá un determinado gradiente de concentración de moléculas de agua dentro del material. Las moléculas de agua que difunden en el sólido provocan, por lo general, un aumento de volumen. La masa también irá en aumento, de modo que la densidad aparente del sólido hidratado puede aumentar o disminuir, dependiendo de cómo varíe la masa en relación al volumen.

Según la norma ASTM D570-98 "Método de prueba estándar para la absorción de agua de plásticos" [80] para un tiempo de inmersión 24 horas, la preparación de la muestra es (Ver Figura 3-11):

- a) El condicionamiento o preparación física de las probetas se realizó en el horno marca LABITECH Modelo TEMI850, donde, se mantuvieron durante 24 horas a una temperatura de $\pm 50.3^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa 50%.
- b) Retirar del horno y colocar las probetas en un desecador para su respectivo enfriamiento.
- c) Retiradas las probetas del desecador, realizar la medición de cada una de las probetas en una balanza digital marca METTLER TOLEDO Referencia AB204S con un rango de medición máx.: 220 g y min: 10 mg.
- d) En recipientes de vidrio, colocar agua destilada a una temperatura de $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ en donde se deben sumergir completamente las probetas durante 24 horas.

- e) Al finalizar las 24 horas, se contará con un lapso de $\pm \frac{1}{2}$ hora, para retirar las probetas simultáneamente, limpiar el agua y pesar nuevamente en una balanza digital marca METTLER TOLEDO Referencia AB204S con un rango de medición máx.: 220 g y min: 10 mg. Para medir el contenido de agua a la saturación.

Figura 3-11 Preparación de las probetas para el ensayo de absorción de agua



Fuente: Angela Cardenas

Este ensayo se ejecutó en el Laboratorio de Ingeniería Química – Polímeros, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

3.6 Propiedades mecánicas

Dependiendo de la aplicación del polímero las propiedades mecánicas representan un papel muy importante, la metodología de las pruebas tienen que ser extremadamente rigurosas ya que si no se cumplen correctamente, no se puede explicar la reacción del material bajo carga mecánica. Cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo, el resultado: es la deformación. La forma en que se deforme el cuerpo depende de su comportamiento mecánico, geometría, dirección y valor de carga mediante la introducción de parámetros básicos permitiendo describir mejor su influencia en el material.

Se conoce de antemano que los materiales utilizados con tecnología Polyjet, están afectados por diversos factores durante el fotopolimerización entre capas por lo cual es

importante saber cómo se comportan estos materiales después de ser impresos. Factores como la luz UV que pueden degradar la calidad de las muestras, la orientación que es un factor de tipo adicional en las fabricaciones, con el fin de cambiar el sentido de aplicación de la carga para así demostrar si existe anisotropía en el material [49].

3.6.1 Tensión

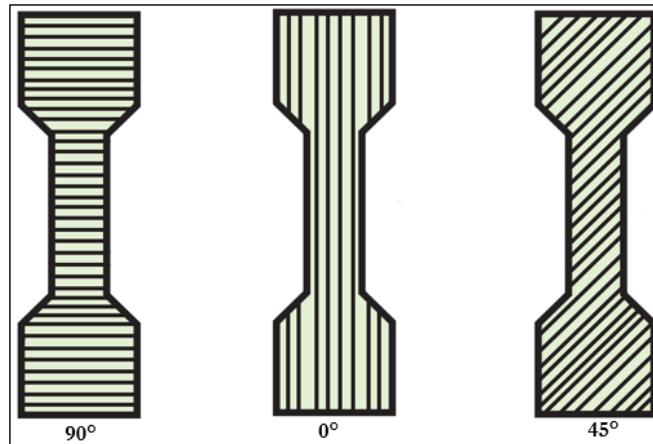
Se utiliza específicamente para medir la resistencia de un material sometido a una fuerza estática o que es aplicada lentamente, esto se logra por medio de una muestra normalizada que es sometida a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la misma.

Es considerada la prueba fundamental de materiales en las propiedades mecánicas, pero en la práctica hay gran variedad de modificaciones disponibles con los polímeros, se conocen los enfoques principales para ejecutar el ensayo de tracción que requiere diferentes especímenes, condiciones de carga y/o dispositivos de sujeción. Los objetivos prácticos son relativamente parámetros mensurables e informativos pueden utilizarse para evaluar propiedades para la garantía de calidad, selección de materiales y dimensionamiento, las principales áreas de aplicación en las pruebas con polímeros incluyen:

- Adquisición de propiedades de tracción de plásticos de moldeo y extrusión.
- Caracterización de propiedades de láminas y películas.
- Determinación de propiedades de plásticos reforzados con fibra isotrópica y ortotrópica.

En este estudio, los ensayos de tensión se ejecutaron de acuerdo a la norma ASTM D638 Método de prueba estándar para propiedades de tracción de plásticos [86], se evalúan las muestras en VeroBlue RGD840 en tres orientaciones diferentes, Figura 3-12 en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos – Universidad Nacional de Colombia, en el equipo Maquina Universal de Ensayos Referencia AG-IS 5 KN, Marca SHIMADZU con una celda de carga de 1KN.

Figura 3-12 Orientación de las probetas para pruebas de tensión [50]



Fuente: Es-Said O.S. Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. Materials and Manufacturing Processes. 2000

3.6.2 Impacto

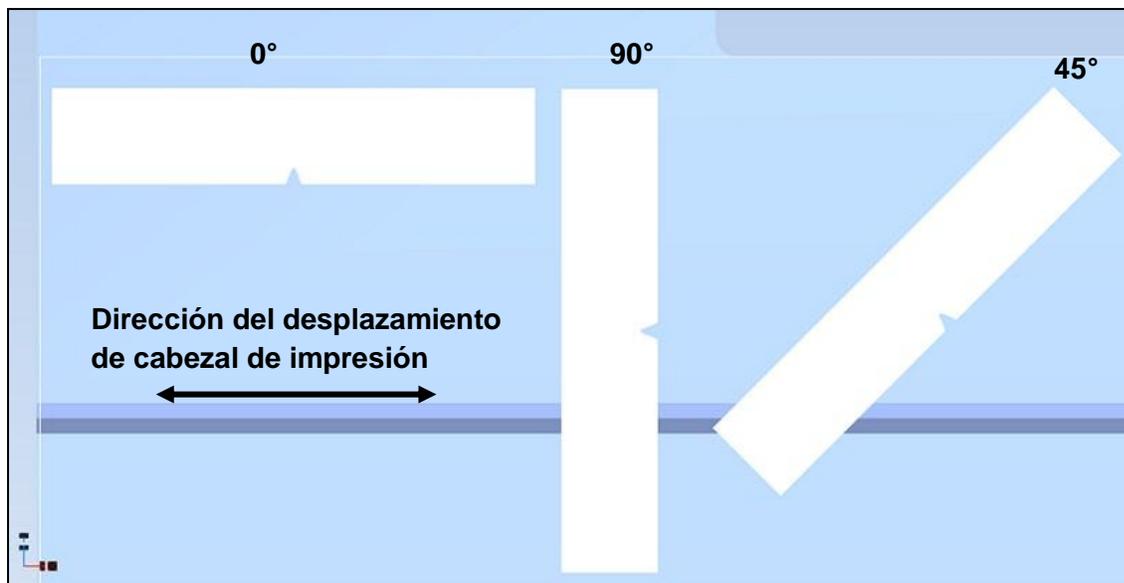
Se utiliza específicamente para estudiar la tenacidad del material, es de tipo mecánico dinámico, se ejecuta para determinar el comportamiento del material a velocidades de deformación elevadas, por medio del péndulo de impacto, se puede determinar la energía absorbida en el impacto por una probeta estandarizada.

Las fallas por fragilidad son ocasionadas por diversos factores que actuando, juntos o separadamente, modifican las características mecánicas. De los múltiples estudios realizados se pudo comprobar que tres son los causales más importantes de aquellos factores: la variación en la velocidad de la deformación producida por la rapidez en la aplicación de la carga, la aparición de estados complejos de tensiones generados por el “efecto de forma”, y las bajas temperaturas. Como la prueba se desarrolló con una velocidad de impacto y temperatura controlada; solo se pudo considerar hasta este punto como una de los factores principales en la falla un estado triaxial de tensiones el cual se genera por medio de la muesca generada en la probeta, donde se generan micro grietas de deformación y roturas en el arrancamiento de la prueba respectivamente. Para el estado de tensión creado por la solicitud dinámica de choque, la velocidad de aplicación de carga estandarizada es superior a la crítica de la rotura, por lo que la deformación será localizada con epicentro en la entalla.

En la prueba Izod se usaron las mismas condiciones de temperatura, velocidad de impacto, posición del péndulo y péndulo estándar, para descartar que estos fueron ítems que afectaron la prueba, por lo que las pruebas de impacto tienen como objeto de medir la resistencia al impacto en muestras con muesca fabricadas en un proceso de capa a capa.

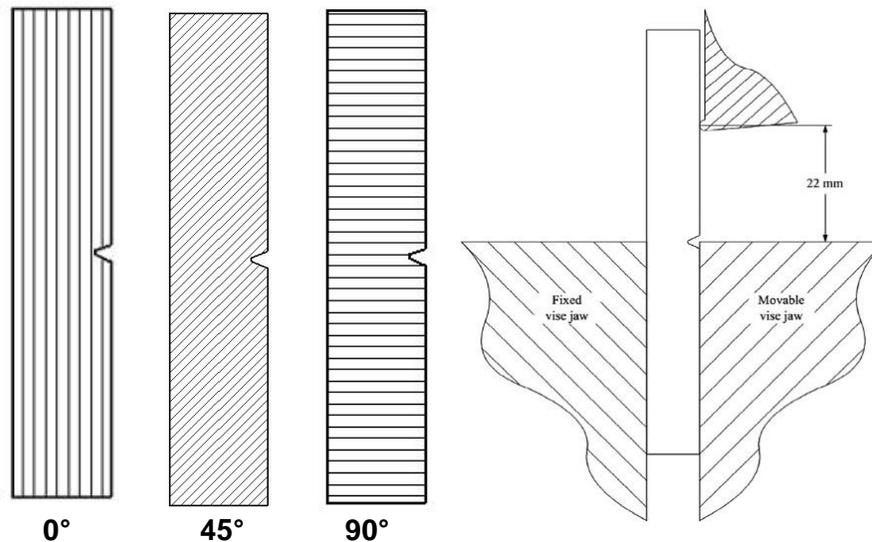
En este estudio, los ensayos de impacto Izod con muesca de acuerdo a la norma ASTM D256-06, Método A [96], se evalúan las muestras en VeroBlue RGD840 en tres orientaciones diferentes, Figura 3-13. Durante el ensayo, la parte inferior de la muestra es sujeta como una viga en voladizo. La parte superior de la muestra se golpea por la nariz del martillo del péndulo con una energía controlada. Como se muestra en la Figura 3-14, la distancia entre el soporte fijo y la línea de contacto se mantiene a 22 mm de acuerdo a la norma.

Figura 3-13 Orientación de las probetas en la bandeja de impresión de la maquina Stratasys Objet Eden 260V



Fuente: Ángela Cárdenas

Figura 3-14 Ilustración de la prueba impacto Izod con muesca y las respectivas probetas a utilizar de acuerdo a su orientación, durante el montaje



Fuente: Ángela Cárdenas

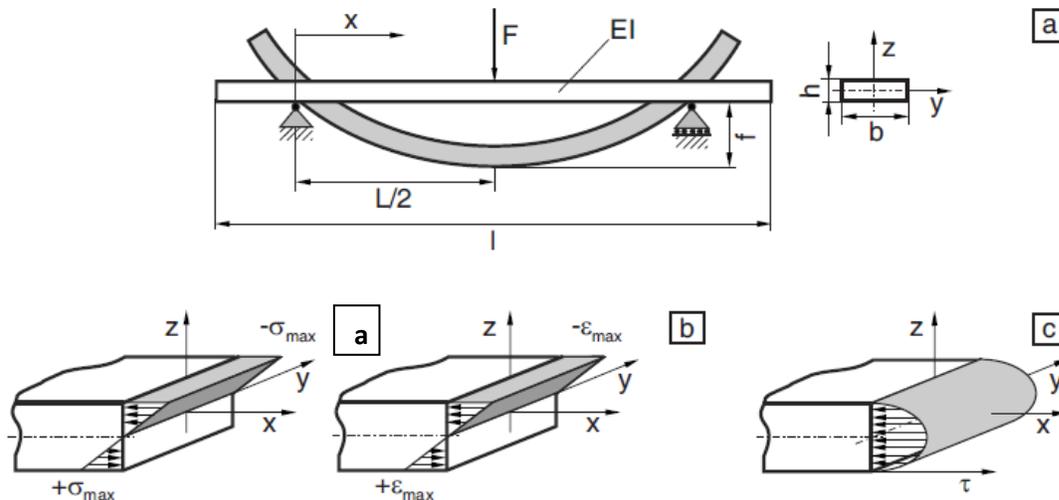
Este ensayo se ejecutó en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos - Universidad Nacional de Colombia, el equipo utilizado es la máquina de impacto marca PHYSICAL TEST SOLUTION.

3.6.3 Flexión

Es la deformación que se presenta en la probeta alargada en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. Para este caso se utilizó el método de ensayo de flexión en tres puntos, para este caso el momento máximo de flexión solo ocurre en el centro de la probeta. La prueba nos permite medir la resistencia a la flexión y el modulo de flexión de un plástico rígido de acuerdo a la norma ASTM D790-03 [76].

El modulo de flexión nos define la relación entre un esfuerzo de flexión y la tensión resultante. La deformación elástica es reversible y desaparece después de eliminar el esfuerzo, es decir, el material vuelve a su estado original. En los niveles más altos de esfuerzo, un material permanentemente se deforma y no volverá a su forma original. La resistencia a la flexión de un material es su capacidad para soportar fuerzas aplicadas en su eje longitudinal. Los esfuerzos inducidos por una carga de flexión son realmente una combinación de los esfuerzos de tracción, compresión y cizalla, Figura 3-15.

Figura 3-15 a) Distribución del esfuerzo y tensiones normales, b) Distribución de la tensión de corte y c) Sección transversal de la muestra [51]



Fuente: Grellmann Wolfgang, Seichler Sabine. Polymer Testing. Hanser Publisher. 2007.

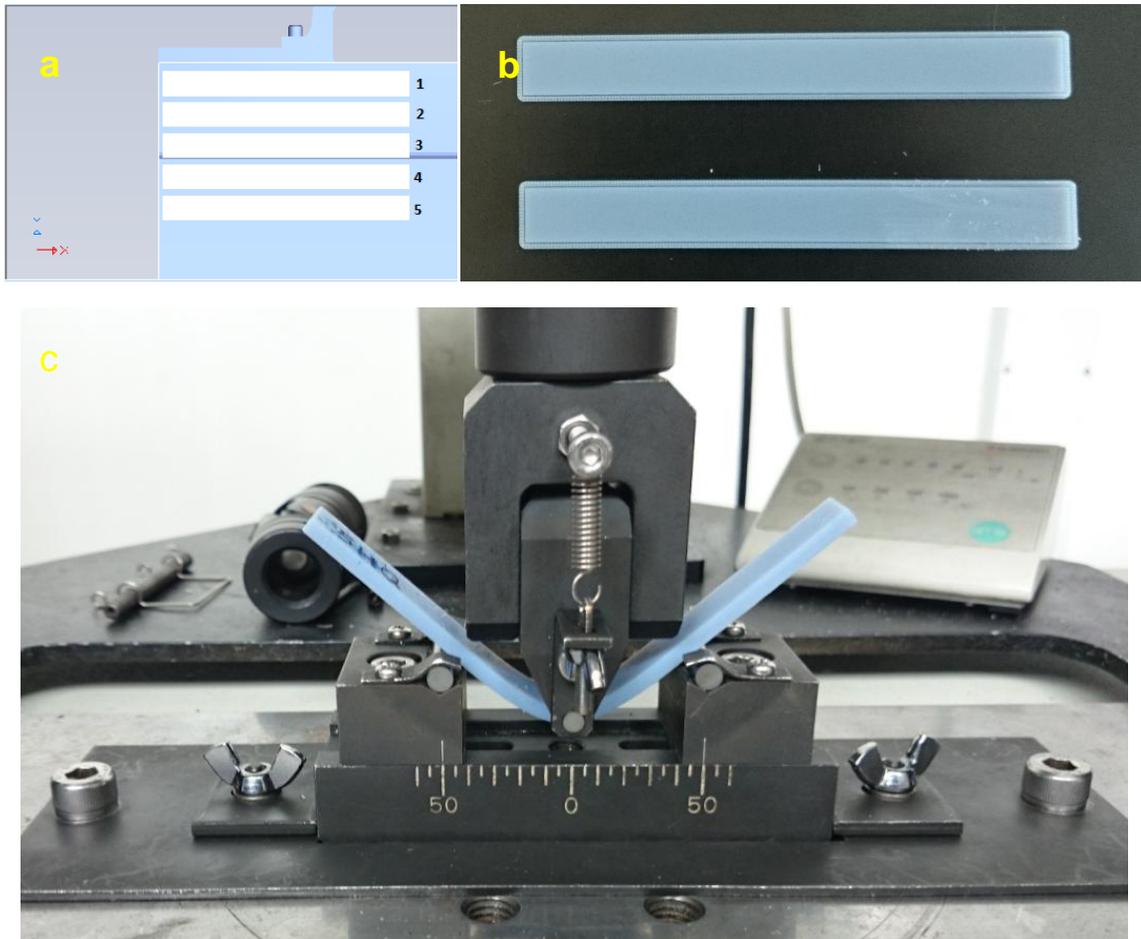
Las muestras modeladas para este ensayo tendrán una orientación a 0° debido a que su construcción es capa a capa, se considera que es un material anisotrópico, de tal manera que utiliza la dirección de la carga principal para adquirir valores, de igual forma se puede observar que las muestras no tengan curvas, redondeo, fisuras o marcas acentuadas, ya que si presenta estas características las muestras no pueden ser usadas.

En la Figura 3-16 se ilustra el ensayo de flexión:

- la orientación de las probetas de flexión en el software Objet Eden a 0° .
- Las probetas impresas en la bandeja de construcción.
- Ensayo de flexión por el método de tres puntos en la máquina universal de ensayos para las probetas impresas.

Este ensayo se ejecutó en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos - Universidad Nacional de Colombia, el equipo utilizado es la máquina universal de ensayos marca SHIMADZU, Referencia: AG-IS 5KN.

Figura 3-16 Ilustración de la prueba de flexión, a) Orientación de las probetas en la bandeja de impresión, b) Probetas impresas en la bandeja y c) Ensayo de flexión utilizando el método de tres puntos para la probeta 5 HS



Fuente: Ángela Cárdenas

3.6.4 Dureza

El término dureza se suele considerar como una medida de módulo derivada de la resistencia del material a la indentación, pero también se ha aplicado a la resistencia al rayado y a la resiliencia. El modo de deformación bajo un indentador es una mezcla de tensión, cizallamiento y compresión, y la dureza no es de ninguna manera una propiedad fundamental. El resultado depende de la geometría del indentador y del grado de indentación, así como del tiempo de indentación después del cual se realiza la medición. Las pruebas de dureza son atractivas debido a su aparente simplicidad y en formas diversas se han ideado métodos para la mayoría de los tipos de material. Aunque la dureza está casi inevitablemente incluida en las propiedades de los cauchos y muy

comúnmente aplicada a los metales, se ha usado con menor frecuencia para los plásticos. Esto se debe probablemente a que no se ha visto que tenga el mismo significado para caracterizar plásticos. Sin embargo, más recientemente las mediciones de micro dureza se han encontrado cada vez más útiles para monitorear los cambios debidos a las influencias ambientales.

La fuerza de indentación puede aplicarse de tres maneras:

- a. Aplicación de una fuerza constante, midiéndose la indentación resultante.
- b. Medición de la fuerza requerida para producir una indentación constante, y
- c. Uso de un muelle que da lugar a una variación de la fuerza de indentación con profundidad de indentación.

Cuando se formularon métodos estándar, la medición de la fuerza habría sido mucho más complicada que con los transductores de fuerza moderna, y por consiguiente el enfoque b) no ha sido seriamente adoptado. Los instrumentos de banco generalmente usan el enfoque a) pero los instrumentos portátiles, usualmente llamados durómetros, usan siempre un sistema de carga de muelles. Debido a que los resortes no se consideran elementos de medición de precisión, y debido a que la fuerza varía con la indentación, los métodos de referencia estándar utilizan pesos para aplicar una fuerza constante.

Se utilizan una variedad de geometrías de indentador, especialmente una bola, un cono truncado y una pirámide. La forma de la pirámide se deriva de los métodos desarrollados para los metales y se aplica comúnmente a los plásticos rígidos, mientras que una bola se favorece para los cauchos y se puede aplicar a los materiales relativamente suaves. La forma más utilizada de durómetro utiliza un cono truncado.

En la prueba de metales, la medición de la indentación se realiza normalmente después de retirar la fuerza de indentación, mientras que en los cauchos siempre se realiza con la fuerza aplicada. La diferencia es una consecuencia de los diferentes niveles de fuerza involucrados y, particularmente, porque con los metales la deformación es permanente,

mientras que con los cauchos es casi totalmente elástica. Los plásticos son algo entre los dos y ambos enfoques se utilizan.

Las pruebas normales usan indentadores con dimensiones del orden de milímetros, pero también hay microtest que se reducen aproximadamente en un orden de magnitud que permiten utilizar probetas más delgadas y, en materiales rígidos, producen menos daño. Con cauchos, la prueba de dureza es esencialmente no destructiva.

Si las piezas de prueba son demasiado delgadas en relación con el indentador y la carga utilizada, el material de base tiene un efecto. También se pueden obtener resultados diferentes en superficies curvas. Las medidas realizadas en piezas de ensayo no estándar se denominan a veces dureza aparente.

Figura 3-17 Durómetro



Fuente: Laboratorio de metalografía – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

La norma ASTM D2240-05 usada es la Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness [102], con una escala de dureza Shore D es la recomendada para utilizar en plásticos duros, razón por la cual este ensayo se ejecutó en el Laboratorio de

Metalografía – Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, el equipo utilizado es un Durómetro (Ver Figura 3-17) marca REX GAUGE COMPANY, INC escala D.

3.7 Características macroscópicas de las superficies de falla

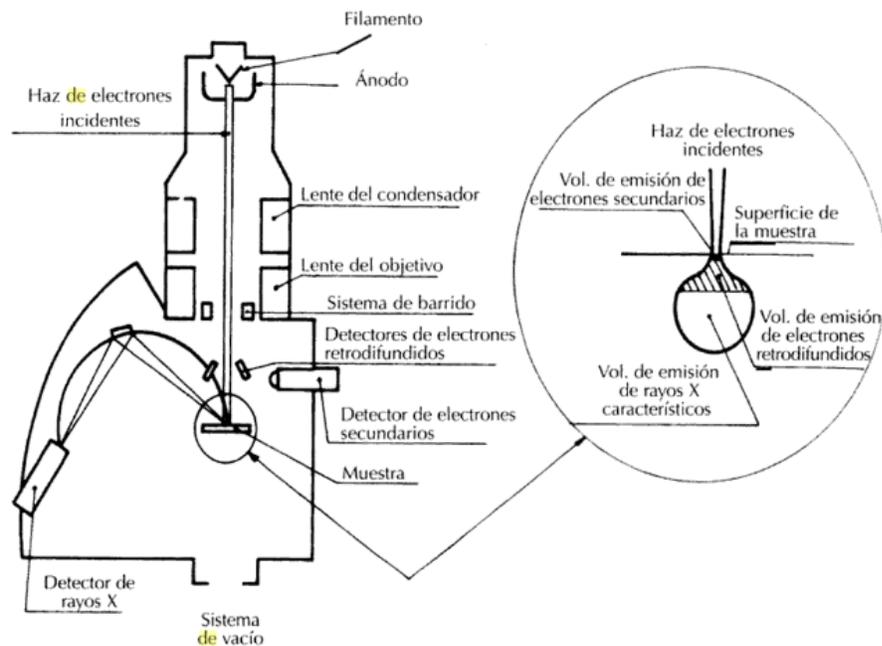
Los resultados de las pruebas ejecutadas para impacto y tensión permiten estudiar el comportamiento del material durante la fractura por medio del estudio de imágenes de alta resolución obtenidas por microscopia electrónica de barrido (SEM) y así obtener características macroscópicas de las superficies de falla.

La principal diferencia entre un microscopio óptico y uno electrónico, radica en que el primero utiliza luz para enfocar el objeto, en cambio el microscopio electrónico lo enfoca mediante un haz de electrones. La imagen se obtiene rastreando la superficie de la muestra con un haz electrónico. Este haz de electrones incide sobre la muestra e interactúa con los átomos de dicha muestra, gracias a esto se generan señales que son captadas por alguno de los detectores del microscopio.

El microscopio electrónico está formado básicamente por tres partes, Figura 3-18:

- **Fuente de electrones** que ilumina la muestra (objeto). El haz de electrones que incide sobre la muestra es generado por un filamento de tungsteno.
- **Lentes electromagnéticas** (convergentes) que dirigen el haz de electrones hacia la muestra. Las lentes electromagnéticas son las encargadas de enfocar el haz de electrones, las cuales se componen esencialmente de un conjunto de placas mantenidas a un diferente potencial, esta diferencia, acelera el haz de electrones. Estas placas tienen un orificio en el centro por donde pasan los electrones y la curvatura del campo eléctrico que se genera permite el enfoque de la imagen.
- **Sistema que capta e interpreta la imagen.** Depende de la muestra y del tipo de análisis que se quiera realizar.

Figura 3-18 Esquema del microscopio electrónico de barrido [65]



Fuente: G. Gavelli, del Istituto Donegani di Novara: Metodo e Scienza, Sansoni Editore, 1982, pag 276.

Los detectores del microscopio electrónico son:

- Detector de electrones secundarios (SEI: Secondary Electron Image)**, este se utiliza para obtener imágenes de alta resolución.
- Detector de electrones retrodispersados (BEI: Backscattered Electron Image)**, este detector permite obtener imágenes de composición y topografía de la superficie.
- Detector de energía dispersiva (EDS: Energy Dispersive Spectrometer)**, este detector captura los rayos X generados por la muestra, lo que permite obtener mediante un software la composición elemental de la muestra.

Para la obtención de las imágenes de alta resolución las muestras deben cumplir con unas condiciones específicas:

- La muestra no necesita ser perfectamente plana.

- Se toman las imágenes en alto vacío para obtener un haz uniforme de electrones, pero es necesario que la muestra sea conductora.
- La muestra por ser un polímero no es conductora, para que cumpla con esta condición, se les realizó un recubrimiento respectivamente, las muestras de impacto (oro), las muestras de tensión (grafito).

Al utilizar el SEM las imágenes suministradas son más realistas, por lo que la representación del objeto que ofrecen este microscopio es tridimensional y se ejecuta la toma de imágenes de acuerdo a la secuencia temporal de cada punto explorado, el cual es establecido por el usuario permitiendo que sea registrado fotográficamente.

La fractura está definida como una desintegración parcial del material por esfuerzo a causa de la formación de una nueva superficie dentro de un cuerpo. La fractura es sinónimo de rotura o de la acción de quebrar pero no de falla. El último término es más general y también hace referencia al colapso no-mecánico por calor (falla térmica) o degradación medioambiental (ataque químico, irradiación) [52].

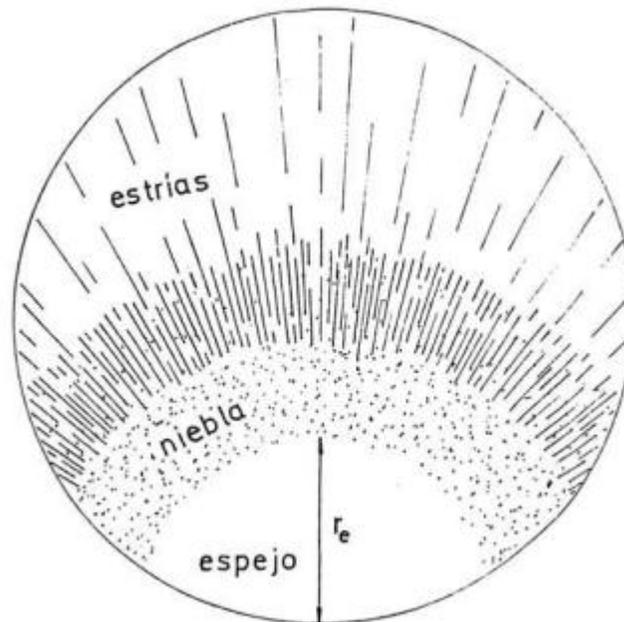
El estudio y análisis de la forma y tipo de fractura de un material es lo que se conoce con el nombre de fractografía. La fractografía, pues, no es ni más ni menos que la visualización y estudio de la fractura. En el análisis fractográfico interesa el aspecto general que presentara la fractura, las grietas que aparecen, el recorrido de las mismas y la forma como se ha propagado la fractura. Una fractura se puede nuclear en una grieta, en un defecto o en una heterogeneidad. El tamaño de la grieta inicial también es muy significativo. El análisis fractográfico se realiza generalmente sobre superficies de fractura que pertenecen al material en masa o al producto terminado.

La fractura entre los materiales plásticos y los vidrios indican una semejanza estructural debido a que presentan zonas muy parecidas [111]. Cuando un vidrio se fractura debido a un esfuerzo de tracción, se puede observar tres zonas perfectamente delimitadas en la superficie de fractura, Figura 3-19.

- Zona de espejo (mirror)

- Zona de niebla (mist).
- Zona de estrías (hackle).

Figura 3-19 Diferentes zonas que se observan en la fractografía de una varilla de vidrio [112]



Fuente: Holloway, D. G.; The Physical Properties of Glass. Ed. Wykeham Publications, London, Ltd. London and Winchester, 1973.

La zona de espejo es lisa y brillante, aunque si la tensión de rotura es muy grande puede llegar a ser algo nebulosa. La posición de la zona de espejo indica el origen de la fractura. La forma nos da idea de la distribución de las tensiones. El tamaño nos indica la magnitud de la tensión que generó la fractura y la distribución de esta zona respecto de las demás, nos indica que normalmente las grietas que provocan la fractura están invariablemente en la superficie del material. También esta zona es útil para identificar grietas debidas a inclusiones [112].

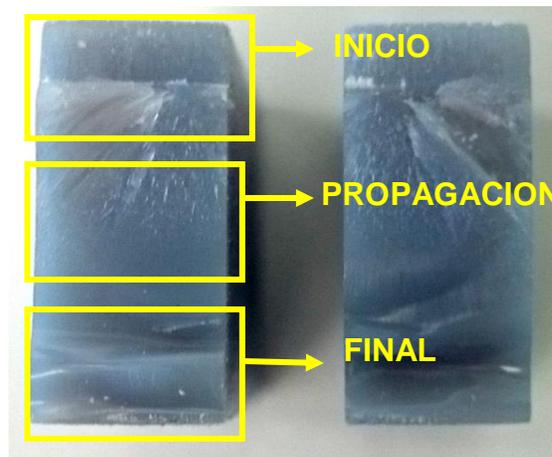
La zona de niebla está formada por un arco estrecho que rodea la zona de espejo y su superficie de fractura presenta un aspecto rugoso. Después de la zona de niebla se encuentra la zona de estrías o zona de fractura propiamente dicha. Está formada por dos tipos de líneas, que corresponden a la interacción con defectos del material de las dos ondas de propagación: la transversal y la longitudinal. Por un lado tenemos las líneas radiales que parten de la zona de niebla (mist) y siguen paralelamente a la dirección de propagación, y por otro lado, se observan una sucesión de ondas de fractura. Más allá de

esta zona se suelen desprender fragmentos pequeños. Si la tensión es elevada, la zona de niebla y estrías se forman cerca del origen de la fractura. [111].

De acuerdo a estas consideraciones se prepararon unas áreas respectivas para la toma en las secuencias temporales de los puntos explorados en el registro fotográfico, estos son:

- **Impacto.** El área seleccionada es donde ocurre la fractura se divide en tres partes, se tomaron respectivamente las probetas que mayor y menor absorción de energía tuvieron, Figura 3-20:

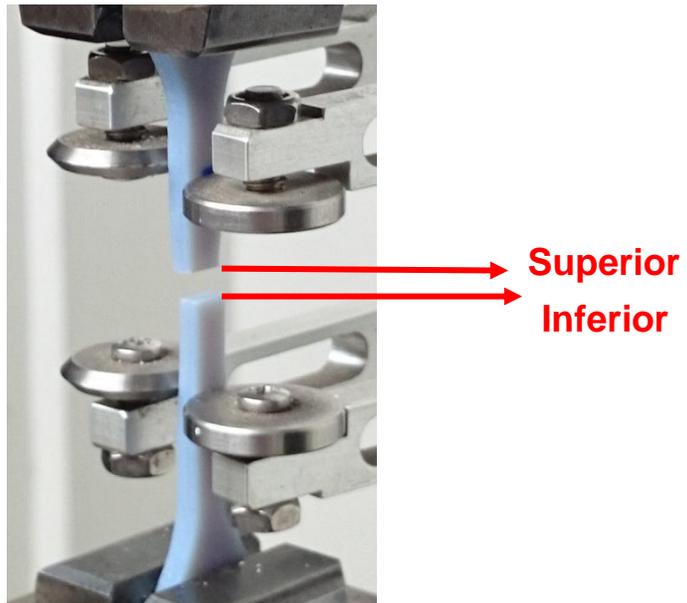
Figura 3-20 Área seleccionada SEM para muestras de impacto



Fuente: Ángela Cárdenas

1. inicio (ubicada en la zona de la muesca).
 2. propagación (ubicada en la zona central de la muestra fracturada).
 3. final (ubicada en la zona final de la muestra fracturada).
- **Tensión.** El área seleccionada se ubica en el área paralela de la fractura en la muestra se tomaron las de mayor y menor resistencia a la tensión, cada parte de la probeta son las secciones: a) superior y b) inferior, Figura 3-21.

Figura 3-21 Área seleccionada SEM para probetas de tensión



Fuente: Ángela Cárdenas

4. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados de los datos obtenidos. Mediante las pruebas y ensayos planteados se espera interpretar los resultados en función de hallazgos de otros investigadores, considerando además las alternativas a los fenómenos descritos y que además presente la coherencia con los trabajos realizados en el mismo campo, además de sugerir nuevas posibilidades de investigación.

4.1 Identificación del polímero

En las pruebas de polímeros contemporáneas, los métodos para determinar las propiedades térmicas de los plásticos se resumen en el concepto de "método de análisis térmico" y "métodos ópticos". Con la ayuda de los métodos de análisis térmico, las propiedades físicas y/o químicas se miden como funciones de temperatura y tiempo. Para ello, los especímenes están sujetos a un programa de temperatura definido en hornos especiales a una atmósfera de gas definida (por ejemplo, aire, gases inertes) con lo que se registran las correspondientes curvas de calentamiento o enfriamiento. Dichas curvas de calentamiento o enfriamiento exhiben dependencias específicas a partir de las cuales pueden determinarse su temperatura de transición vítrea, temperatura de fusión, entalpías de fusión, por ejemplo, y también los rangos de temperaturas de regiones de relajación secundarias, degradación térmica y grado de cristalinidad. Con la ayuda de métodos de análisis térmico, se puede demostrar [68]:

- Cambios estructurales (transición vítrea, fusión/cristalización, reticulación, volatilización, sublimación, transiciones de fase en estado sólido y líquido).
- Propiedades mecánicas (comportamiento elástico, amortiguación).
- Propiedades térmicas (expansión/contracción, capacidad calorífica específica, temperatura de fusión / cristalización, coeficiente de expansión).

- Reacciones químicas (descomposición y estabilidad térmica en diferentes ambientes, reacciones químicas en soluciones o en fase líquida, reacciones con gas de purga, deshidratación).

En el análisis térmico por DSC se obtienen las temperaturas características, tales como temperatura de fusión T_m y temperatura de transición vítrea T_g , y cantidades calóricas, tales como capacidad calorífica específica C_p , cantidades de morfología, tales como cristalinidad K , así como prueba de recocido y curado. Se mide el flujo de calor dQ/dt a una muestra en comparación con una referencia.

Con la ayuda de los métodos ópticos se puede analizar los polímeros y sus aditivos. La espectroscopia IR es un método espectroscópico de absorción que opera a longitudes de onda que van desde aprox. 780 nm a 1 mm. El rango espectral más importante para el análisis de polímeros es el de las longitudes de onda infrarrojas de gama media de 2,5 a 25 μm . La gama espectral se expresa a menudo como longitud de onda recíproca en cm^{-1} , denominado número de onda n , es decir, el IR mediano corresponde a números de onda de aprox. 4000 a 400 cm^{-1} . Las bandas de absorción presentes en los espectros IR pueden estar asociadas con la oscilación de valencias particulares dentro de moléculas poliméricas o grupos enteros de átomos (grupos funcionales). Estas bandas se identifican utilizando bases de datos de espectro IR.

4.1.1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

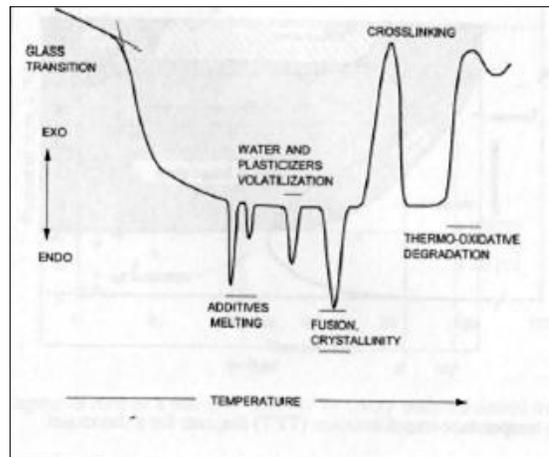
La calorimetría diferencial de barrido es una técnica térmica que mide los cambios de entalpía, junto con diversos eventos físicos y químicos, sufridos por una muestra bajo determinada temperatura-tiempo. Utilizando la técnica DSC, es posible evaluar el calor absorbido o emitido por una muestra durante varios eventos térmicos, incluyendo transición vítrea, fusión, cristalización, reticulación, reacción química, evaporación y descomposición química. Adicionalmente, la información de inicio, finalización, picos y rango de temperaturas, con las cuales trabajar el material adecuadamente era algo desconocido. El rango permitido de temperaturas de este ensayo es de -180°C a 600°C y las muestras con un rango < 20 mg.

En la parte experimental se encontraron los valores de:

- Temperatura de transición vítrea (T_g): es una propiedad en los polímeros amorfos y semicristalinos. Es la temperatura a la que se detiene el mecanismo de relajación de las macromoléculas cuando el polímero se enfría, como consecuencia, cuando el polímero alcanza la temperatura de transición vítrea se observa una naturaleza muy rígida y frágil. [67]
- Temperatura de fusión (T_m): Como un polímero semicristalino se calienta por encima de T_g , a una cierta temperatura los dominios cristalinos se desegregan y se obtiene un fluido viscoelástico. Esta transición termodinámica se denomina generalmente temperatura de fusión, T_m . T_m se observa en la técnica DSC como un pico endotérmico en la capacidad calorífica o en el flujo de calor, por lo que se puede determinar una temperatura máxima (así como temperatura de inicio y final) y un área de pico (cambio de entalpía durante la fusión).
- Temperatura de cristalización (T_c): A medida que se enfría un polímero semicristalino, a una cierta temperatura se reordenan los dominios cristalizados y se obtiene un polímero cristalino. Esta transición termodinámica se designa generalmente como cristalización, y ocurre alrededor de una temperatura llamada temperatura de la cristalización, T_c . T_c se observa en la técnica DSC como un pico exotérmico en la capacidad calorífica o en el flujo de calor, por lo que se puede determinar una temperatura máxima (así como temperatura de inicio y final) y un área de pico (cambio de entalpía durante la cristalización).
- Temperatura de degradación: La degradación térmica se acompaña generalmente de una reacción exotérmica que puede resultar de la oxidación. Tal reacción puede ser fácilmente detectada en el DSC como una salida. del material.

Al observar un esquema de un termograma DSC se ilustra todos los posibles eventos térmicos de un compuesto, Figura 4-1.

Figura 4-1 Eventos térmicos de una muestra medida por DSC [66]

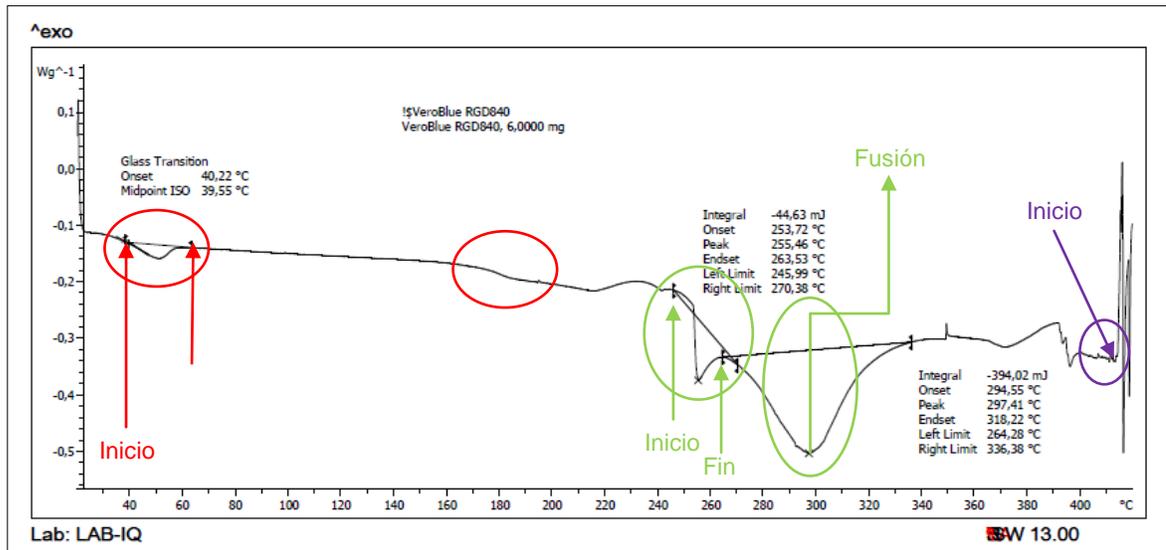


Fuente: A. Naranjo, M. P. Noriega, T. Osswald, A. R. Álzate, J. D. Sierra, *Plastics Testing and Characterization Industrial Applications*, Hanser Publishers, Munich, 2008.

La Figura 4-2 muestra la curva de temperatura contra flujo de calor obtenida de la muestra VeroBlue RGD840 sólida. El termograma solo presenta cambios endotérmicos, los cambios más significativos ocurren en cinco zonas identificadas plenamente:

- Las dos primeras zonas marcadas en color rojo muestran dos cambios en la línea básica debido al aumento de la capacidad de calor en la muestra, en donde la primera inicia a 40.22°C y finaliza a 55°C y la segunda comienza a 170°C y finaliza a 190°C, estos cambios corresponden a zonas de transición vítreas.
- Las dos siguientes zonas marcadas en color verde muestran zonas de fusión, el polímero semicristalino se calienta por encima de la T_g y los cristales se funden con el levantamiento correspondiente en la línea básica, esto se observa como un pico endotérmico (con temperaturas de inicio y final), en donde la primera zona inicia a 253.72 °C y finaliza 263.53 °C y la segunda zona inicia a 294.55°C y finaliza a 328.22°C.
- La última zona marcada en color violeta inicia a 418°C, en este punto se consideró la degradación del material debido a la inestabilidad de la línea básica del termograma que se visualiza como picos exotérmicos y endotérmicos.

Figura 4-2 Termograma del análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) VeroBlue RGD840 sólido



Fuente: Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC). Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá D.C. Facultad de Ingeniería Química

Con el resultado de este primer termograma (ver Figura 4-2), donde solo se efectuó un primer barrido es decir una sola velocidad de calentamiento es muy alta para maximizar la sensibilidad de detectar cualquier cambio térmico menor ahora bien solo se conoció la temperatura de degradación del material, no se puede concluir con exactitud un valor o área de la temperatura de transición vítrea (T_g) y un valor o área de la temperatura de fusión (T_m) ya que para cada caso existen dos posibles resultados. La temperatura T_g no fue la única obtenida a partir de una curva de calentamiento demostrando que esta temperatura es de naturaleza cinética y depende de la historia termomecánica del material.

En los resultados del primer termograma DSC, solo se estableció adecuadamente la temperatura de degradación a los 418°C, cumpliendo los rangos permitidos que es hasta 600°C, pero al observar tantas transiciones térmicas en el termograma nos fundamentaremos en la norma ASTM D3418-15 “Método de prueba estándar para temperaturas de transición y entalpías de fusión y cristalización de polímeros por calorimetría diferencial de barrido” [67] y en el libro “Thermal Analysis of Polymeric Materials” [68], para ejecutar un segundo DSC donde la velocidad de calentamiento sea menor con una atmosfera de alta conductividad, para generar una máxima resolución en

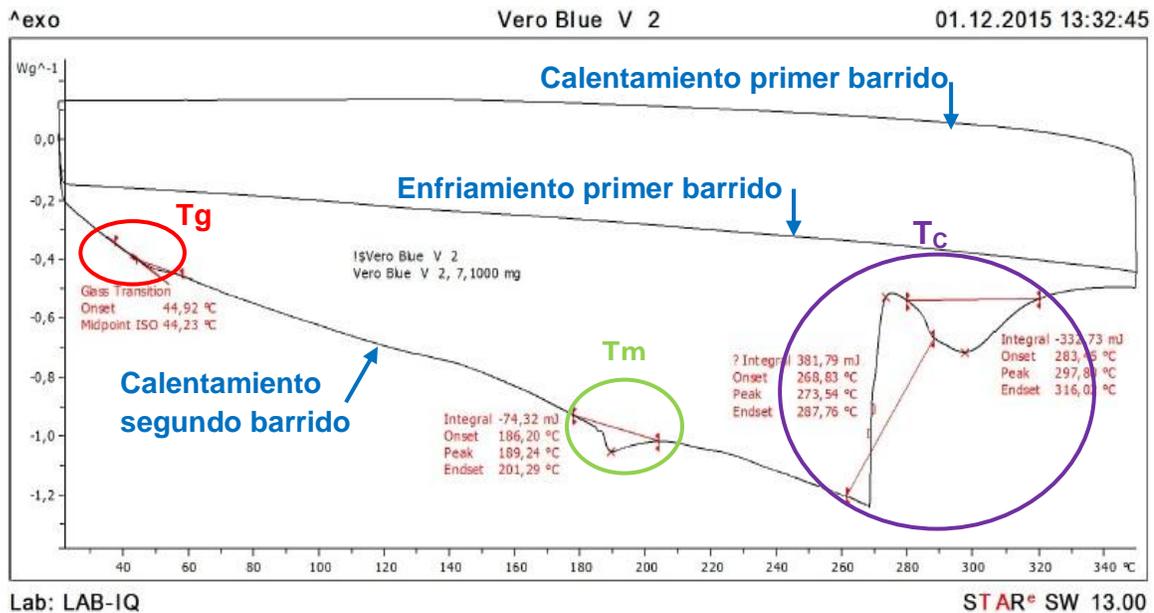
los resultados, por esto el DSC debe ser con doble barrido, para que durante el primer barrido (calentamiento-enfriamiento) sea controlado y así borrar la histórica termomecánica del material y en el segundo barrido (calentamiento) se puedan visualizar las transiciones.

Como ya se conoce la temperatura de degradación del VeroBlue RGD840 sólido; se realiza un segundo DSC con una temperatura de hasta 350°C, donde la velocidad de calentamiento es menor, en el primer barrido se hizo el calentamiento hasta la temperatura de 350°C para después dejar enfriar esto con el fin de borrar la histórica termomecánica del material y en el segundo barrido nuevamente se aumenta la temperatura hasta 350°C, esto permite percibir las transiciones térmicas del VeroBlue RGD840 sólido con mayor facilidad, por lo tanto es una técnica cuantitativa.

En la Figura 4-3 se observa la curva de temperatura contra flujo de calor obtenida de la muestra VeroBlue RGD840 sólida. Se observa en el termograma de doble barrido que presentó cambios endotérmicos y exotérmicos, los cambios más significativos ocurren en tres zonas identificadas plenamente:

- La primera zona marcada en color rojo muestra una perturbación en la línea básica de la muestra caracterizándose por ser de tipo endotérmico, correspondiente a T_g que ocurre a 44.92°C.
- La segunda zona marcada en color verde corresponde a T_m que ocurre a 189.24°C.
- La tercera zona en color violeta hay un cambio de tipo endotérmico y exotérmico, que inicia a una temperatura de 268.83°C y finaliza a 316.02°C, donde hay un alto aumento de energía en el proceso continuo lo cual indica que parte del polímero se cambio por una reacción o hay una reacción química en donde hay entrecruzamiento. [66] En esta área entre las temperaturas de 270°C y 280°C se encuentra el valor de la temperatura de cristalización T_c , visualizándose como el pico exotérmico.

Figura 4-3 Termograma doble barrido del análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) para el material VeroBlue RGD840 en su segundo barrido



Fuente: Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC). Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá D.C. Facultad de Ingeniería Química

De esta forma con nuestro segundo termograma se cumplen las condiciones de temperatura dentro de 600°C, rango de la muestra <20 mg, encontrar los valores de eventos térmicos más importantes de material: Tg, Tm, área de cristalización y degradación del material, de acuerdo a las descripciones dadas en la figura 4-1, ASTM D3418-15 y Thermal Analysis of Polymeric; los resultados obtenidos son coherentes con la teoría, por lo tanto pueden ser aplicables a las características del material VeroBlue RGD840 sólido.

4.1.2 Espectroscopia infrarroja por transmisión

La espectroscopia infrarroja permite la identificación de grupos funcionales presentes en un compuesto en base a la excitación de modos normales de vibración característicos de dichos grupos y que se produce como consecuencia de la absorción de radiación electromagnética de frecuencias definidas dentro del rango infrarrojo. En particular, los modos vibracionales detectables mediante espectroscopia infrarroja son aquellos asociados a cambios en el momento dipolar de la molécula o compuesto. El número de bandas obtenidas en el espectro infrarrojo depende del número de átomos y de la

simetría del sólido o molécula, mientras que su posición e intensidad son función de la naturaleza química del mismo.

El primer IR realizado corresponde al VeroBlue RGD840 líquido, los resultados del espectro se deben correlacionar con la estructura química de la frecuencia (bandas de absorción) ya existentes en bases de datos [46,67-73], para esta investigación no se asocia el espectro con frecuencias de grupos de polímeros, ni de grupos de aditivos durante los IR. En la Tabla 4-1 se presenta las frecuencias asociadas a la estructura química básica [46].

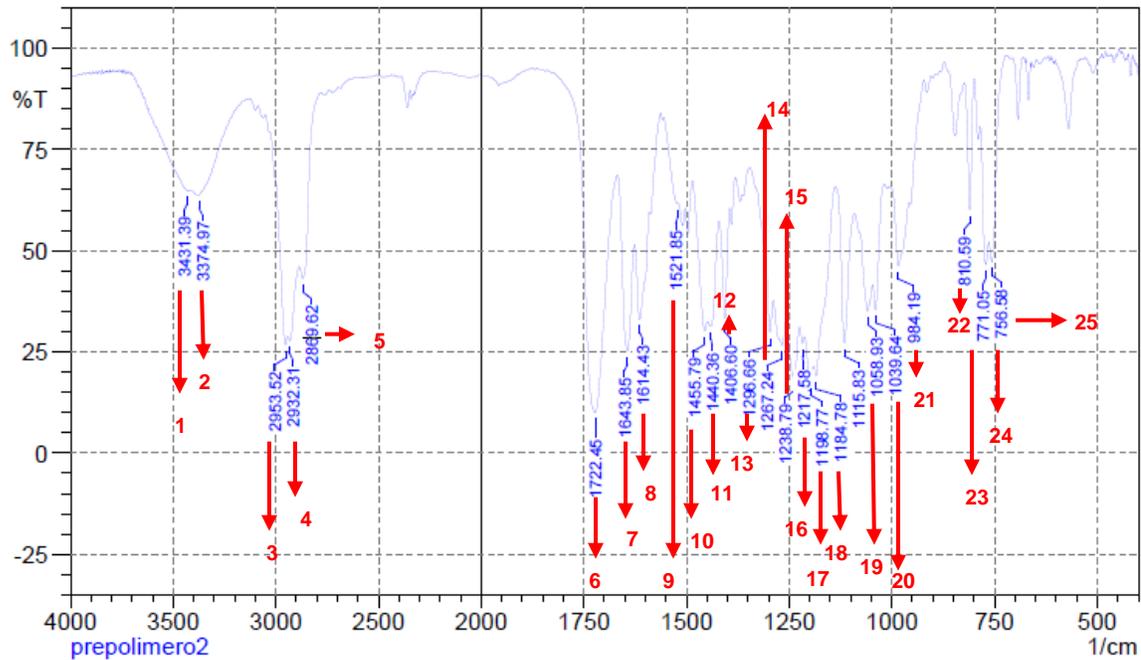
Tabla 4-1 Correlación de las frecuencias asociadas a su estructura química [46]

Frecuencia	Estructura Química
De 4000 a 3200 cm ⁻¹	Vibración X – H Unidos a heteroátomos
De 3200 a 2800 cm ⁻¹	Vibración de tensión de C – H, O – H y N – H.
De 2500 a 2000 cm ⁻¹	Vibración de tensión de triples enlaces y dobles enlaces acumulados.
De 2000 a 1500 cm ⁻¹	Vibración de tensión de C = O, C = N y C = C.
De 1500 a 600 cm ⁻¹	Vibración de flexión de enlaces CH, CO, CN, CC, etc., zona de huella dactilar

Fuente: Hummel, D.O. (2012). Atlas of Plastics Additive: Analysis by Spectrometric Methods. Springer Science & Business Media

En la Figura 4-4 se observa el resultado del primer IR, en donde los valores de las frecuencias obtenidas se comparan con bases de datos [46, 67-73] para identificar la estructura química y sus grupos funcionales. En la Tabla 4-2 se registraron estos resultados.

Figura 4-4 Espectro IR VeroBlue RGD840 líquido



Fuente: Espectroscopio Infrarrojo IR. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Laboratorio Grupo de Macromoléculas.

Tabla 4-2 Correlación de la estructura química y el espectro IR del VeroBlue RGD840 líquido

Dato	Frecuencia (1/cm)		Grupo funcional asociado
	Rango	Valor (Figura 4-4)	
1	3500 – 3200	3431.39	O – H, Alcoholes, enlace H
2	3500 – 3200	3374.97	O – H, Alcoholes, enlace H
3	3000 – 2850	2953.52	C – H, Alcanos (tensión)
4	3000 - 2850	2932.31	C – H, Alcanos (tensión)
5	2900 - 2800	2869.62	C – H, aldehídos
6	1740 - 1720	1722.45	C = C, Aldehído
7	1670 - 1640	1643.85	C = C, Amida
	1690 - 1640		C = C, iminas y oximas
8	1650 - 1550	1614.43	N – H, Aminas y amidas primarias y secundarias (flexión)
9	1650 - 1550	1521.85	N – H, Aminas y amidas primarias y secundarias (flexión)
10	1550 – 1350	1455.79	N = O, Nitro (R – NO ₂)
11	1550 – 1350	1440.36	N = O, Nitro (R – NO ₂)

- 76 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Tabla 4-2 (Continuación)

Dato	Frecuencia (1/cm)		Grupo funcional asociado
	Rango	Valor (Figura 4-4)	
12	1550 - 1350	1406.60	N = O, Nitro (R – NO ₂)
13	1350 - 1000	1296.66	C – N, Aminas
14	1350 - 1000	1287.24	C – N, Aminas
15	1350 - 1000	1238.79	C – N, Aminas
16	1350 - 1000	1217.58	C – N, Aminas
17	1200 – 1140	1198.77	S = O, sulfatos, sulfoamidas
	1350 – 1000		C – N, Aminas
18	1200 – 1140	1184.78	S = O, sulfatos, sulfoamidas
	1350 – 1000		C – N, Aminas
19	1400 – 1000	1115.83	C – X, Fluoruro
	1350 – 1000		C – N, Aminas
20	1400 – 1000	1058.93	C – X, Fluoruro
	1350 – 1000		C – N, Aminas
21	1400 – 1000	1039.64	C – X, Fluoruro
	1350 – 1000		C – N, Aminas
22	1000 – 650	984.19	C – H, Alquenos (fuera del plano de flexión)
23	1000 – 650	810.59	C – H, Alquenos (fuera del plano de flexión)
24	800 – 600	771.05	C – X, Cloruro
	1000 – 650		C – H, Alquenos (fuera del plano de flexión)
25	800 – 600	756.58	C – X, Cloruro
	1000 – 650		C – H, Alquenos (fuera del plano de flexión)

Fuente: Ángela Cárdenas

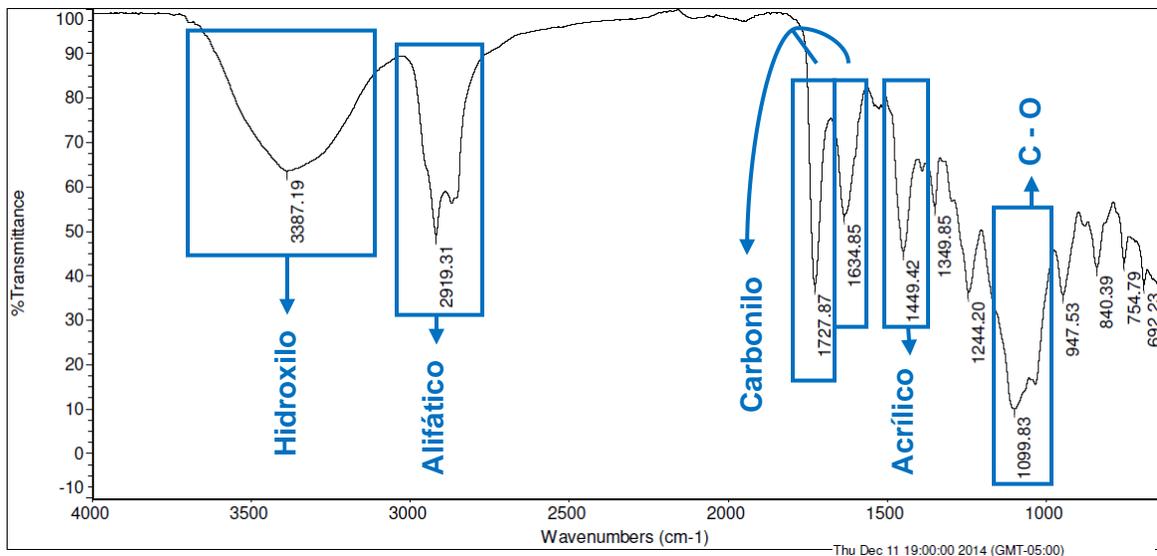
El espectro IR que posee el VeroBlue RGD840 liquido tiene diversos grupos funcionales lo cual indica una respectiva mezcla de varios grupos funcionales permitiendo formar diversos compuestos y no es viable definir cuáles son los grupos funcionales que reaccionaran con la luz ultravioleta porque no hay un IR del VeroBlue RGD840 sólido para ser comparados respectivamente, por lo tanto hay que complementar esta técnica con IR- ATR para concluir mejor estos valores en las frecuencias.

4.1.2 Espectroscopia infrarroja por ATR (Reflexión Total Atenuada)

Los especímenes que son gruesos o inadecuados para la medición de la transmisión, tales como polímeros reforzados con fibra, etc., se miden mediante espectroscopia de reflexión o ATR. Entonces sólo se mide la superficie del espécimen sobre qué cambios ocurren debido al envejecimiento o influencias químicas. [51] lo cual permite ver las frecuencias de los grupos funcionales que cambian durante el proceso de impresión, cuando el material VeroBlue RGD840 líquido se transforma a VeroBlue RGD840 sólido.

En la Figura 4-5 se observa el resultado del IR-ATR del VeroBlue RGD840 líquido, esta muestra es cuando el material no ha sido impreso, ni ha reaccionado con la luz UV en donde los valores de las frecuencias obtenidas se comparan con bases de datos [46, 67-73], para identificar la estructura química y sus grupos funcionales. En la Tabla 4-3 se registraron estos resultados.

Figura 4-5 Espectro IR-ATR VeroBlue RGD840 líquido



Fuente: Espectroscopia Infrarroja IR. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Laboratorio Grupo de Macromoléculas.

- 78 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Tabla 4-3 Correlación de la estructura química y el espectro IR-ATR del VeroBlue RGD840 líquido

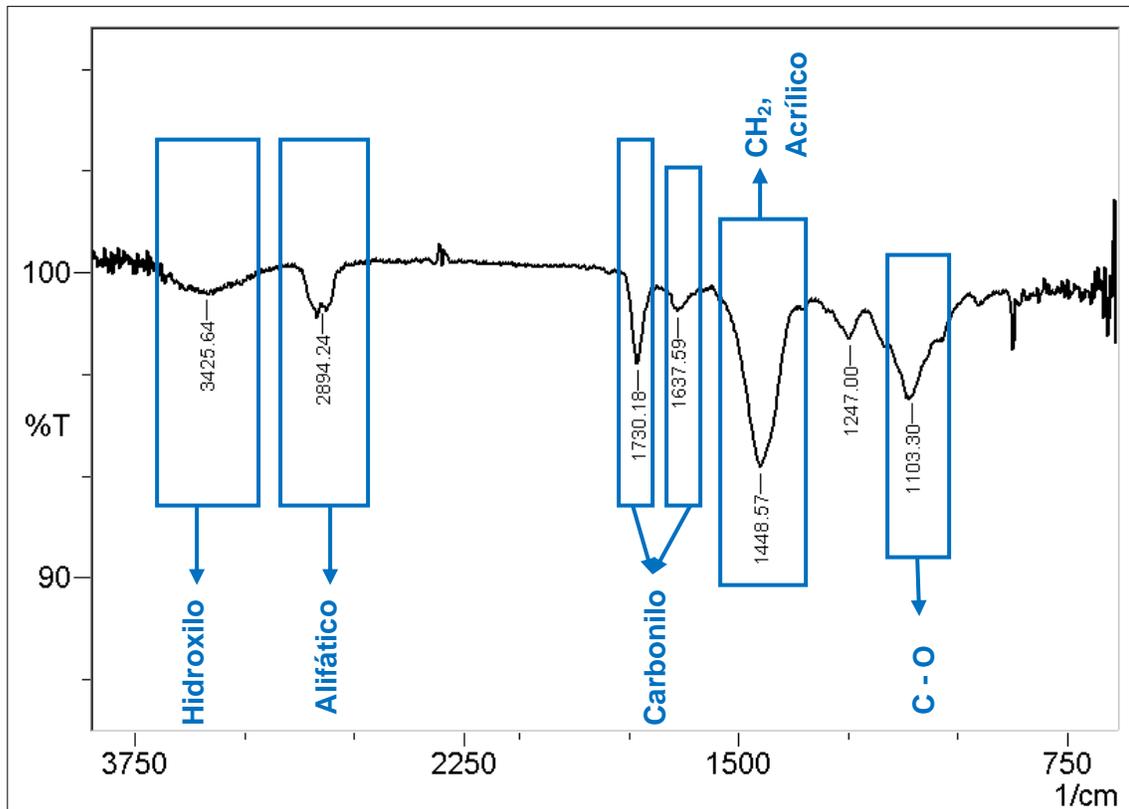
Dato	Frecuencia (cm^{-1})		Grupo funcional asociado
	Rango	Valor (Figura 4-5)	
1	3400 – 2400	3387.19	O – H, ácidos carboxílicos
2		2919.31	C – H, Alifático
3	1740 - 1720	1727.87	C = C, Aldehído
4	1690 - 1640	1634.85	C = C, iminas y oximas
5	1550 - 1350	1449.42	N = O, Aminas
6	1550 - 1350	1349.85	N = O, Aminas
	1400 - 1000		C – X, Fluoruro
7	1400 - 1000	1244.20	C – X, Fluoruro
8	1400 - 1000	1099.83	C – X, Fluoruro
9	1000 - 650	947.53	C – H, Alquenos (fuera del plano de flexión)
10	1000 - 650	840.39	C – H, Alquenos (fuera del plano de flexión)
	900 - 690		C – H, Aromáticos (fuera del plano de flexión)
11	800 – 600	754.79	C – X, Cloruro
	900 - 690		C – H, Aromáticos (fuera del plano de flexión)
12	800 – 600	692.23	C – X, Cloruro
	900 - 690		C – H, Aromáticos (fuera del plano de flexión)

Fuente: Ángela Cárdenas

Del IR-ATR del VeroBlue RGD840 líquido, Figura 4-5 y Tabla 4-3, se observa que el margen de las frecuencias (longitudes de onda) va desde 3425.64 cm^{-1} a 692.23 cm^{-1} donde se encontraron doce valores con su respectivo estructura química asociada a comparación del IR del VeroBlue RGD840 líquido, Figura 4-4 y Tabla 4-2, se observa que el margen de las frecuencias (longitudes de onda) va desde 3431.39 cm^{-1} a 756.58 cm^{-1} donde se encontraron veinticinco valores con su respectiva estructura química asociada en otras palabras estos resultados representan la teoría representada en la Tabla 3-3 [47], en donde estas diferencias se representan en las intensidades de los espectros, las absorbencias y la radicación. De esta manera los resultados dados por el IR-ATR del VeroBlue RGD840 líquido serán los que se utilizaran para comparar con los resultados del IR-ATR VeroBlue RGD840 sólido.

En la Figura 4-6 se observa el resultado del IR-ATR del VeroBlue RGD840 sólido, esta muestra es cuando el material ya está impreso y ha fotopolimerizado con la luz UV en donde los valores de las frecuencias obtenidas se comparan con bases de datos [46. 67-73], para identificar la estructura química y sus grupos funcionales. En la Tabla 4-4 se registraron estos resultados.

Figura 4-6 Espectro IR-ATR VeroBlue RGD840 sólido



Fuente: IR. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá D.C. Laboratorio de Macromoléculas, Facultad de Ingeniería Química

Tabla 4-4 Correlación de la estructura química y el espectro IR-ATR del VeroBlue RGD840 sólido

Dato	Frecuencia (cm^{-1})		Grupo funcional asociado
	Rango	Valor (Figura 4-5)	
1	3500 - 3200	3425.64	O - H, Alcoholes enlace H
2	3400 - 2400	2894.24	O - H, Ácidos carboxílicos
3	1725 - 1700	1730.18	C = C Ácidos carboxílicos
4	1670 - 1640	1637.59	C = C, Amida

Tabla 4-4 (Continuación)

Dato	Frecuencia (cm ⁻¹)		Grupo funcional asociado
	Rango	Valor (Figura 4-5)	
5	1450 y 1350		C – H, - CH ₃ (flexión)
	1435 - 1470	1448.57	C – H , CH ₃ Alcano CH ₂ , Acrílico
6	1200 – 1140	1247.00	S = O, sulfatos, sulfoamidas
7	1400 - 1000	1103.30	C – X, fluoruro

Fuente: Ángela Cárdenas

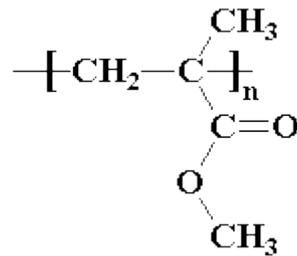
Del IR-ATR del VeroBlue RGD840 sólido, Figura 4-6 y Tabla 4-4, se observa que el margen de las frecuencias (longitudes de onda) va desde 3425.64 cm⁻¹ a 1103.30 cm⁻¹ se encontraron siete valores con su respectiva estructura química asociada.

Al comparar los resultados del IR-ATR del VeroBlue RGD840 líquido (ver Tabla 4-3) vs VeroBlue RGD840 sólido (ver Tabla 4-4), se concluye:

- En el margen de longitudes de onda que va desde 3425.64 cm⁻¹ a 1103 cm⁻¹ hay seis espectros que coinciden.
- Su composición básicamente es de la misma naturaleza, por lo que se comienza a descartar grupos funcionales específicos para definir una posible estructura.
- En las longitudes de onda se aprecian algunas diferencias y algunas señales no aparecen en el espectro ATR-IR del VeroBlue RGD840 sólido por lo tanto se establece que los enlaces de los grupos alquenos, aminas, aromáticos y cloruros no existen después de la fotopolimerización por lo cual estos se descartan.
- En seguida tomando como referencia los datos: espectros característicos grupos de polímeros [71-73], Tg = 48 ± 50 °C valor dado por el fabricante y el Tm = 189,24 °C obtenido durante la prueba de calorimetría diferencial de barrido (DSC) se busca una estructura básica de un polímero aproximado.
- En los grupos identificados plenamente en ambos IR-ATR (ver Figura 4-5 y 4-6), se encuentro: Hidroxilo, Alifático, Carbonilo, Acrílico, CH₂, C-O. se comparan entre sí observando en los espectros que disminuyo la forma geométrica, el cambio más significativo ocurre en el grupo funcional acrílico debido a que se

formó durante la fotopolimerización, es cuando se formó un grupo funcional nuevo que denominaremos “J”, este solo se formó si tiene un doble enlace y ocurre por algún radical libre del componente que sea <10%, lo cual permite identificar todos los grupos funcionales existentes en este material, por este motivo la posible estructura que se sugiere de este material sea un metacrilato o metilmetacrilato, Figura 4-7.

Figura 4-7 Estructura del metacrilato o metilmetacrilato [57]



Fuente: <https://www.chemwiki.uc.davis.edu>

Se ha identificado como componente principal el monómero de estructura del metacrilato o metilmetacrilato. El polimetacrilato de metilo procede del ácido acrílico y de su polimerización. El ácido acrílico se utiliza como materia prima en la producción de ésteres acrílicos y como monómero para ácidos y sales poliacrílicos. El polímero acrilato más simple es el poliácido acrílico, cuyo monómero es el poliácido acrílico. El poliácido acrílico absorbe enormes cantidades de agua. El ácido acrílico da lugar, entre otros ésteres, al acrilato de metilo y al metacrilato de metilo. El acrilato de metilo y metacrilato de metilo se polimerizan produciendo poliacrilato de metilo y polimetacrilato de metilo respectivamente. Dentro de sus propiedades es un plástico duro, resistente, transparente, de excelentes propiedades ópticas con alto índice de refracción, buena resistencia al envejecimiento y a la intemperie. Su resistencia a la rotura es siete veces superior a la del cristal a igualdad de espesores, por lo que resulta más resistente a los golpes. Es un material ligero con una densidad de 1.19 presenta buena resistencia mecánica y estabilidad. A pesar de su ligereza puede soportar una sobrecarga de 70 Kg/m². La transparencia de este plástico está comprendida entre el 85% y el 92%, por lo que deja pasar casi todos los rayos UV y su poder de difusión es casi nulo. Tiene una gran opacidad a las radiaciones nocturnas del suelo. En cuanto a sus inconvenientes el

principal de ellos es su elevado costo, que junto con el tipo de estructura requerida hacen que las construcciones con este material sean de costos elevados. El metacrilato es fácil de rallar con cualquier instrumento, con lo que habrá que considerar este aspecto como factor negativo [104-105].

Al identificar el polímero por medio de su análisis térmico, no se establece gran diferencia entre el estado sólido y líquido del VeroBlue RGD840, solo la espectrometría nos da algunos indicios del grado de transformación en la estructura semicristalina del polímero de estado líquido a sólido y por medio de las bases de datos es que se puede concluir el componente principal, pero no se puede definir con exactitud en qué porcentaje se encuentra. Este tipo de pruebas nos aporta información sobre los polímeros cuando este tiene algún tipo de transformación durante su adaptación a nuevas tecnologías como es el caso de la tecnología Polyjet.

4.2 Metrología dimensional

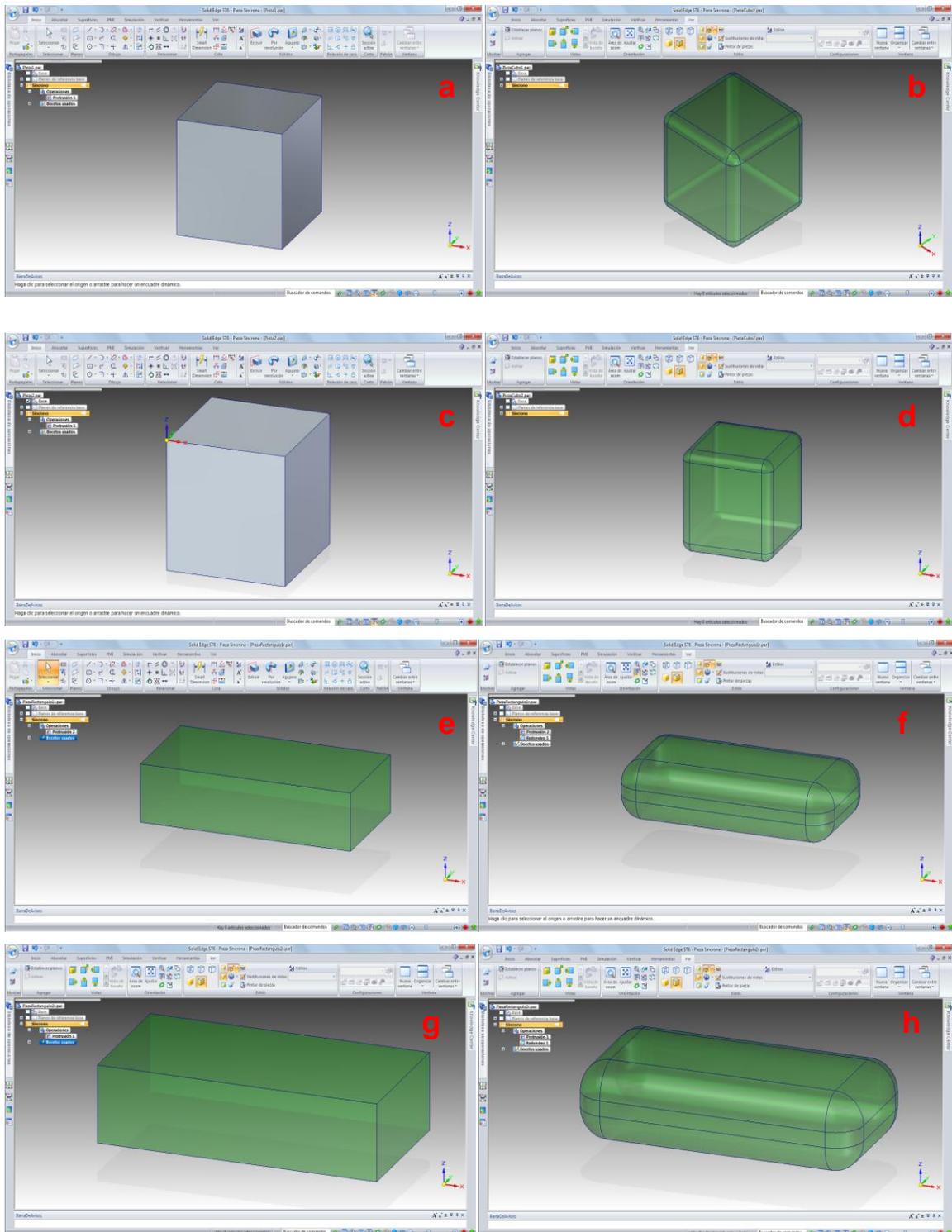
Dentro de los resultados se mostrarán alguna toma características, los resultados se mostrarán en los anexos A y B.

4.2.1 Control dimensional

Se utilizó el método de promedios y rangos para homologar la repetibilidad y la reproducibilidad de la prueba además de encontrar las posibles dispersiones que se obtienen y concluir si las desviaciones son acertadas o posibles, siguiendo la metodología descrita (Ver Anexo A)

Se modelaron respectivamente las muestras de acuerdo a la Tabla 3-4 y Tabla 3-5 para su respectivo procesamiento e impresión, Figura 4-8 y Figura 4-9.

Figura 4-8 Modelamiento de muestras: a) Cubo S1, b) Cubo R1, c) Cubo S2, d) Cubo R2, e) Rectángulo S1, f) Rectángulo R1, g) Rectángulo S2, h) Rectángulo S2,, i) Cubo S4, j) Cubo R4, k) Escalera triangular, i) Cuadrado agujero central sin radio



Fuente: Angela Cardenas

84 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Figura 4-8 (Continuacion)

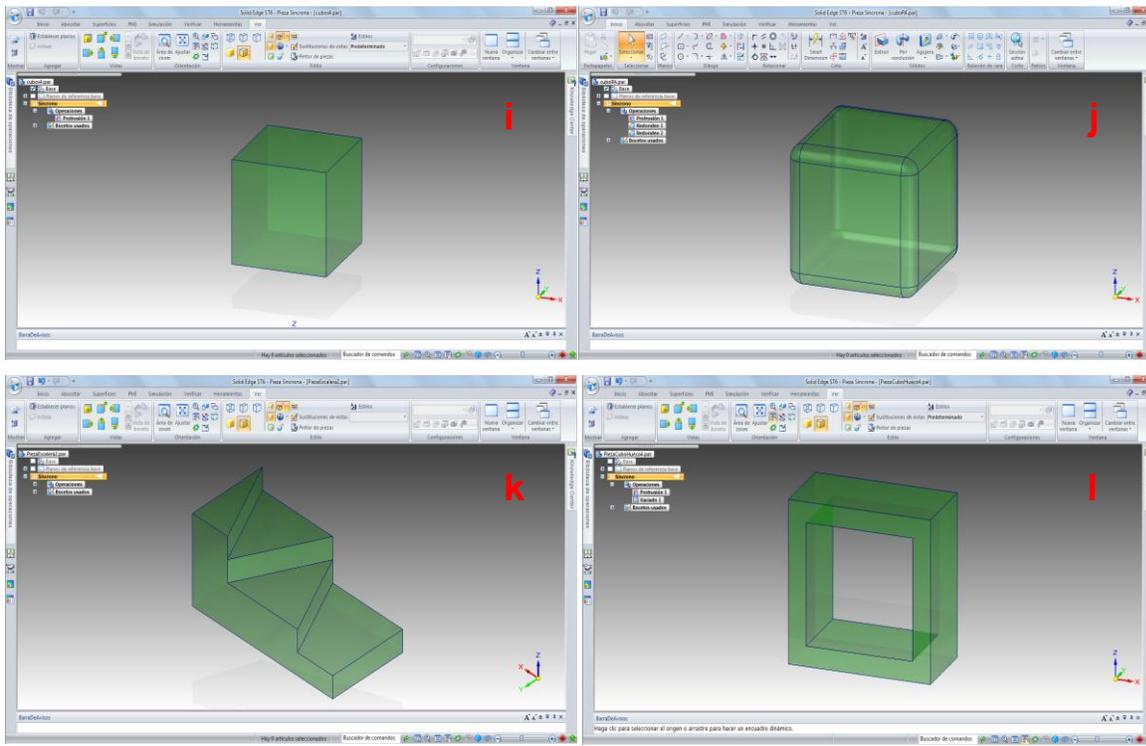


Figura 4-9 Modelamiento de muestras: m) Cuadrado agujero central con radio interno, n) Escalera sin radio, o) Escalera radio externo, p) Escalera radio interno, q) Escalera radio completo, r) Geometría libre elección

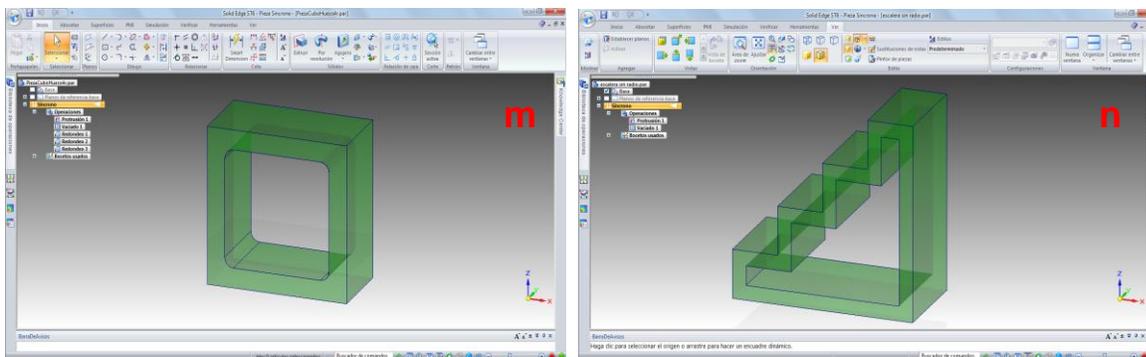
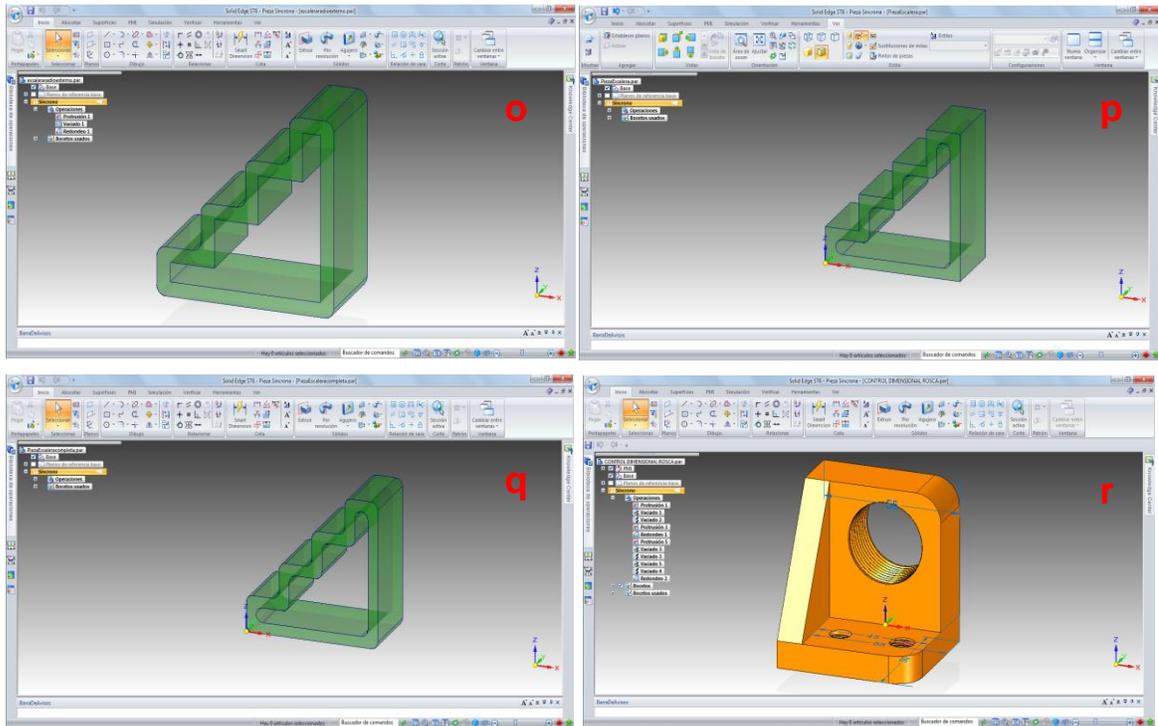


Figura 4-9 (Continuación)



Fuente: Angela Cardenas

En la recopilación de datos, dos personas ejecutarán la toma de cinco mediciones de cada dimensión de las probetas en forma aleatoria. La especificación asignada para las geometrías por cada pieza es ± 0.05 mm. En la Tabla 4-5 se encuentra un resumen de la recopilación de datos de la prueba ejecutada en el Laboratorio de Metrología – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá con los instrumentos mencionados en la Tabla 3-5 y Tabla 3-6, todos los instrumentos usados fueron de tipo mecánico y división de escala de 0.01 mm.

Tabla 4-5 Resumen datos control dimensional

Probeta	N° probetas	Dimensión (mm)	Promedio	Desviación Estándar	Error medida promedio
Cubo S1	2	Ancho: 10	10.336	0.221	0.656
		Largo: 10	10.337	0.221	0.657
		Alto: 10	10.076	0.028	0.396
Cubo R1	2	Ancho: 10	10.012	0.004	0.332
		Largo: 10	10.011	0.004	0.331
		Alto:10	10.387	0.174	0.707
Cubo S2	2	Ancho: 20	20.445	0.006	1.145
		Largo: 20	20.481	0.007	1.181
		Alto: 20	20.016	0.007	0.716
Cubo R2	2	Ancho: 20	20.018	0.006	0.718
		Largo: 20	20.447	0.007	1.147
		Alto: 20	20.481	0.006	1.181
Rectángulo S1	2	Ancho: 10	10.162	0.011	0.482
		Largo: 20	20.116	0.005	0.816
		Alto: 5	5.291	0.239	0.611
Rectángulo R1	2	Ancho: 10	10.075	0.053	0.395
		Largo: 20	20.095	0.024	0.795
		Alto: 5	5.001	0.003	0.321
Rectángulo S2	2	Ancho: 20	20.357	0.223	1.057
		Largo: 40	40.135	0.222	1.120
		Alto: 10	10.369	0.174	0.689
Rectángulo R2	2	Ancho: 20	20.059	0.016	0.759
		Largo: 40	40.079	0.011	1.064
		Alto: 10	10.389	0.193	0.709
Cubo S4	1	Ancho: 40	40.391	0.024	1.376
		Largo: 40	40.376	0.187	1.361
		Alto: 40	40.470	0.008	1.455
Cubo R4	1	Ancho: 40	40.457	0.006	1.442
		Largo: 40	40.334	0.196	1.319
		Alto: 40	40.457	0.006	1.442
Escalera Triangular	1	Angulo: 27°	27.200	0.837	0.2
		Angulo: 53°	53.400	1.1.40	0.4
		Angulo: 90°	90.400	1.140	0.4
		Alto: 40	40.376	0.187	1.361
		Ancho: 40	40.470	0.008	1.455
		Largo: 80	80.334	0.196	1.319
		Espesor: 20	20.457	0.006	0.642
Cuadrado agujero central sin radio	1	Ancho: 40	40.366	0.187	1.351
		Largo: 40	40.069	0.016	1.054
		Alto: 40	40.069	0.011	1.054
		Espesor: 5	5.389	0.193	0.479

Tabla 4-5 (Continuación)

Probeta	N° Probetas	Dimensión (mm)	Promedio	Desviación estándar	Error medida promedio
Cuadrado agujero central con radio interno	1	Ancho: 40	40.376	0.187	1.361
		Largo: 40	40.049	0.016	1.034
		Alto: 40	40.079	0.011	1.064
		Espesor: 5	5.399	0.193	0.489
Escalera sin radio	1	Ancho: 20	20.445	0.006	0.630
		Largo: 40	40.491	0.007	1.476
		Alto: 40	40.016	0.007	1.001
		Espesor: 3	3.018	0.006	0.108
Escalera radio externo	1	Ancho: 20	20.445	0.006	0.630
		Largo: 40	40.481	0.007	1.466
		Alto: 40	40.017	0.007	1.002
		Espesor: 3	3.028	0.006	0.118
Escalera radio interno	1	Ancho: 20	20.445	0.006	0.640
		Largo: 40	40.481	0.007	1.466
		Alto: 40	40.016	0.007	1.001
		Espesor: 3	3.018	0.006	0.108
Escalera radio completo	1	Ancho: 20	20.455	0.006	0.640
		Largo: 40	40.491	0.007	1.476
		Alto: 40	40.026	0.007	1.011
		Espesor: 3	3.018	0.006	0.108
Geometría Libre	1	Espesor: 10	10.162	0.011	0.482
		Ancho: 50	50.291	0.239	1.276
		Largo: 55	55.075	0.053	1.060
		Altura: 60	60.095	0.024	1.080
		Angulo: 59°	59.400	1.140	0.4
		Angulo: 31°	30.800	0.837	-0.2
		Angulo:90°	89.000	1.581	-1

Fuente: Ángela Cárdenas

En donde las muestras medidas en su análisis respectivo de repetibilidad y reproducibilidad en sus dimensiones seleccionada demuestran que sus valores de % R & R < 10, por lo tanto el sistema de medición seleccionado y que se está utilizando es aceptable.

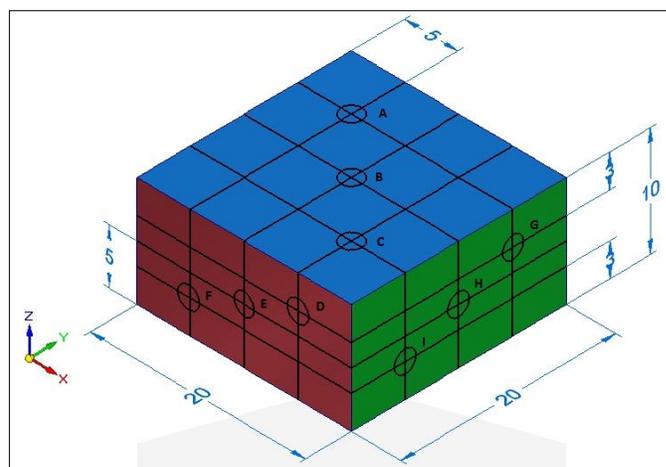
El verdadero valor de una magnitud a medir jamás se puede determinar exactamente. Tanto el instrumento de medida como el método de medición están intrínsecamente sujetos a error. La diferencia existe entre los valores medidos leídos y el valor real se denomina error de medida. La indicación efectiva es la indicación observada en el instrumento; indicación teórica es la indicación que debería proporcionar un instrumento que estuviera exento de error [107]. En los valores medidos se halló que el error de medida o absoluto máximo promedio es de 1.476 mm, este valor obtenido pudo ser

originado porque al efectuar las mediciones, las efectuó la misma persona, sobre la misma pieza, con el mismo instrumento, el mismo método y en el mismo ambiente (repetibilidad), los errores surgen debido a la imperfección de los sentidos, de los medios, de la observación, de las teorías que se aplican, de los aparatos de medición, de las condiciones ambientales y de otras causas. En pocas palabras este valor hallado de error de medición es la incertidumbre que tendremos como en las mediciones y será considerado un error estadístico porque se pueden cometer con igual probabilidad tanto por defecto como por exceso. Por tanto, midiendo varias veces y promediando el resultado es posible reducirlos considerablemente. Este tipo de errores a los que comúnmente hace referencia la teoría estadística de errores de medición [106-109], el encontrar esos datos aportan que existe dispersión durante el proceso de medición por la gran cantidad de datos recolectados y que se debe encontrar el valor del error estadístico que fue de 1.476 mm.

4.2.2 Rugosidad

En principio se debía determinar cual instrumento y/o equipo perteneciente a los métodos óptico-electrónico, cumplía los requisitos para evaluar la rugosidad. Se valoraron dos equipos: perfilómetro de luz blanca y microscopio confocal láser, en el punto de referencia A ubicado en el plano X-Y (Azul), Figura 4-10.

Figura 4-10 Distribución de las posiciones para las mediciones de rugosidad (mm)



Fuente: Ángela Cárdenas

En el perfilómetro de luz blanca, se utilizó un lente con aumento de 5x, donde se pretende visualizar el conjunto de irregularidades, correspondiente a las huellas dejadas en la superficie real por el proceso de impresión, las condiciones para el manejo del perfilómetro están resumidas en la Tabla 4-6.

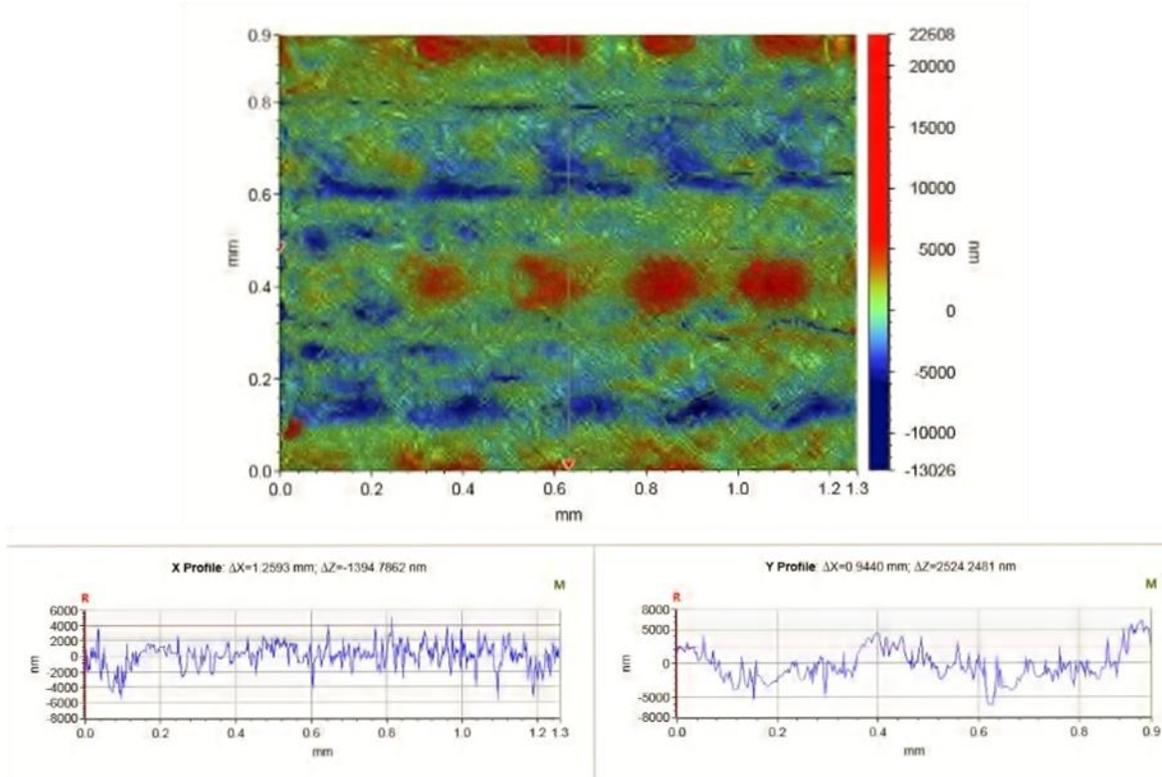
Tabla 4-6 Condiciones para el manejo perfilometro de luz blanca

Características				
Área estudio (mm)	Tamaño Pixel (µm)	Perfil transversal X	Perfil transversal Y	R _a (nm)
x=1.3 y=0.9	-	Y= 0.5 mm	X= 0.6 mm	1750.241

Fuente: Perfilómetro de Luz Blanca

En la Figura 4-11 se contempla la imagen obtenida con el perfilómetro de luz blanca correspondiente a la rugosidad en el punto de referencia A, con los resultados de sus perfiles transversales y la imagen del plano X-Y para el punto A de acuerdo al área de estudio del equipo respectivo (ver Tabla 4-6).

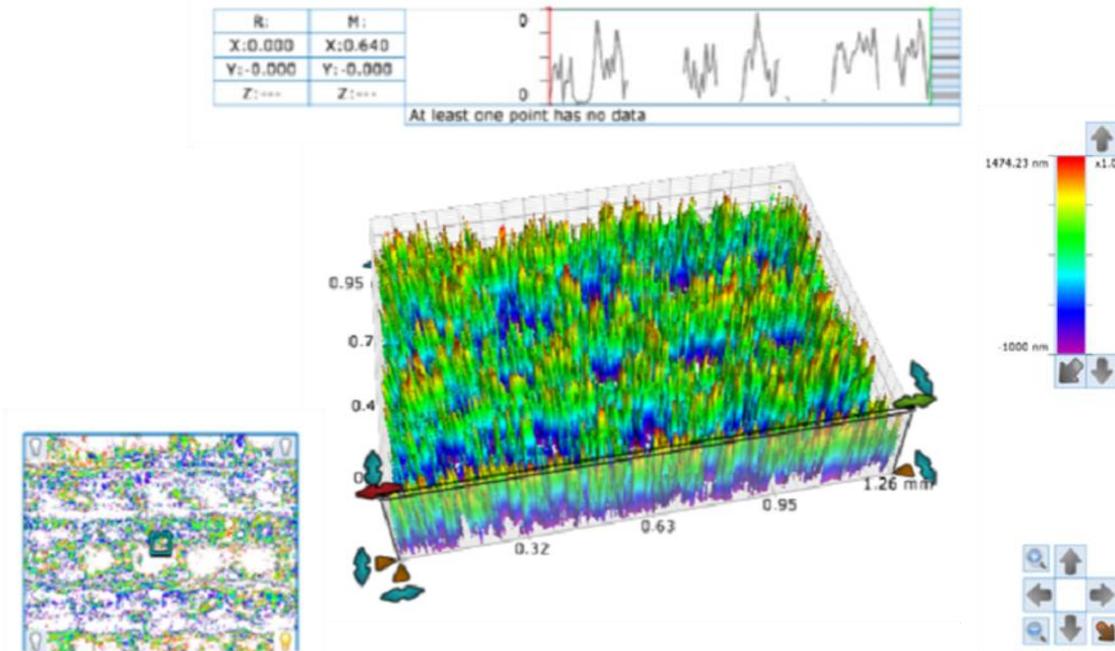
Figura 4-11 Perfilometro luz blanca, Resultados plano X-Y, punto A



Fuente: Perfilómetro luz blanca

En la Figura 4-12 se contempla la topografía (ondulaciones) del punto A de acuerdo al área de estudio del equipo, pero la información que suministra el equipo no es completa por el rango del lente del aumento que es 5x y se procedió a utilizar el microscopio confocal láser.

Figura 4-12 Topografía 3D área evaluada punto A referencia: cuadrante azul

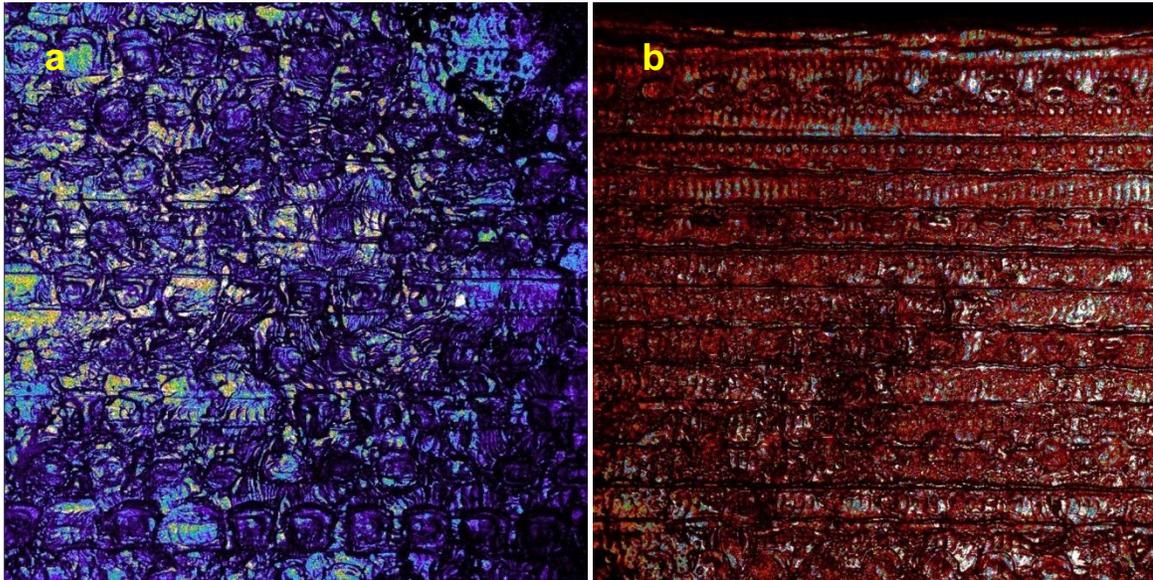


Fuente: Perfilómetro luz blanca

En el microscopio confocal láser permite visualizar varios resultados:

- Permite ver imágenes de la superficie real, la fuente de iluminación está compuesta de dos longitudes de onda: laser azul (405 nm) y laser verde (555 nm). Se tomaron imágenes interpretadas por el software para el punto A, con un lente de aumento 5x, Figura 4-13.

Figura 4-13 Superficie real punto A, lente aumento 5x, a) Altura: nivel bajo, b) Altura: nivel alto



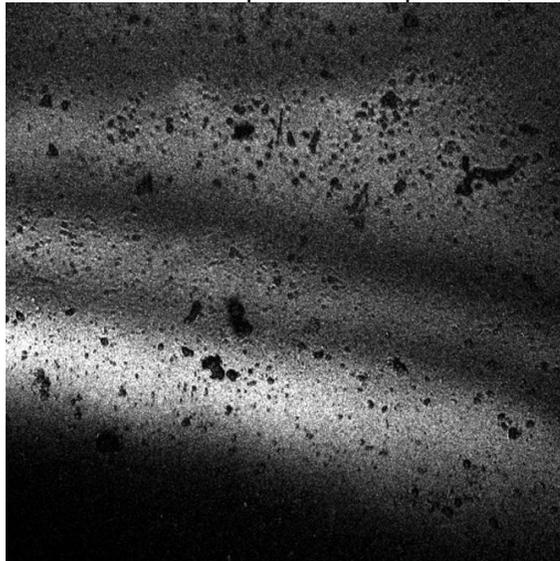
Fuente: Microscopio Confocal – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Al comparar las imágenes se observa:

- En la imagen **a** se observa como el VeroBlue RGD840 sólido después de su proceso de fotopolimerización presentó forma de puntos distribuidos continuamente, algunos se compactaron con otros.
- En la imagen **b** se observa como el VeroBlue RGD840 sólido después de su proceso de fotopolimerización presentó geometría lineal y compactación generada por el movimiento de la deposición del VeroBlue RGD840 de izquierda a derecha y su respectiva transformación por las lámparas UV.

Como la imagen de la superficie real con un lente de aumento de 5x no proporciona un área de estudio adecuada para evaluar la rugosidad, se sugirió tomar nuevamente la imagen de la superficie real con un lente de aumento de 50x en el punto A, Figura 4-14.

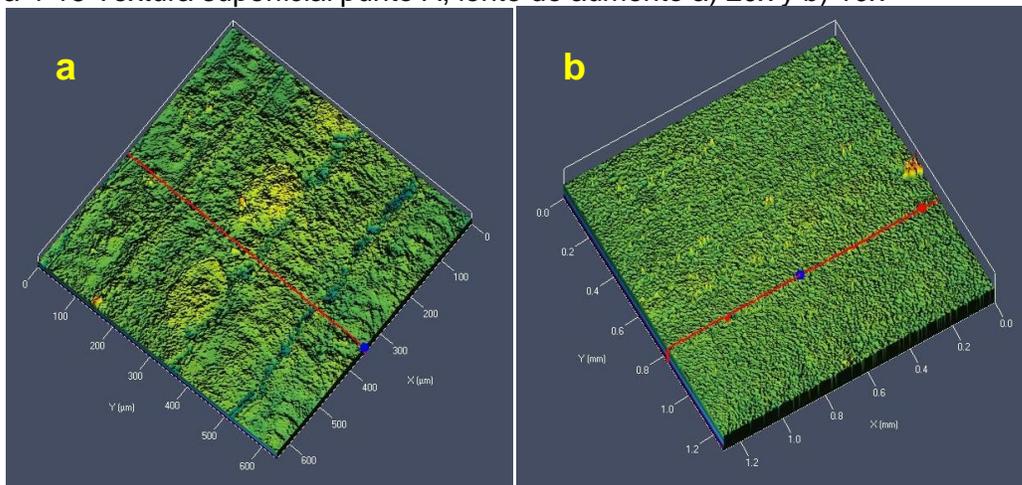
Figura 4-14 Imagen monocromática de superficie real punto A, lente aumento 50x



Fuente: Microscopio Confocal – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

La imagen de la superficie real con aumento de 50x, no es una selección adecuada porque exhibe aberturas y esta característica no corresponde a la evaluada en este ítem, ni a la realidad del VeroBlue RGD840, por lo que se opta por tomar un lente de aumento 20x y 10x pero visualizando las huellas de textura superficial en el punto A, Figura 4-15.

Figura 4-15 Textura superficial punto A, lente de aumento a) 20x y b) 10x



Fuente: Microscopio Confocal – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

Al comparar las imágenes de la textura superficial se observa:

- Con un lente de aumento 20x no es el más idóneo para trabajar, algunas ubicaciones podrían considerarse aberturas y el valor promedio de rugosidad tendría alta dispersión de valores.
- Con un lente de aumento de 10x es el más idóneo para trabajar porque permite tomar las mediciones de unas posiciones fijas, con el mínimo valor de dispersión.

En el microscopio confocal láser, para evaluar la rugosidad, se utilizó un lente de aumento de 10x, donde las condiciones para el manejo del microscopio están resumidas en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7 Condiciones para el manejo microscopio confocal láser

Área estudio (mm)	Tipo de filtro	Referencia		Ubicación de la marca para generar perfil transversal (mm)
		X ó Z	Y	
X= 2.5	Pasa alto	1	4	0.75
Y=2.5		2	5	1.25
		3	6	2

Fuente: Ángela Cárdenas

En el análisis de las mediciones este equipo analiza los parámetros de rugosidad, perfil primario y ondulación, Tabla 4-8.

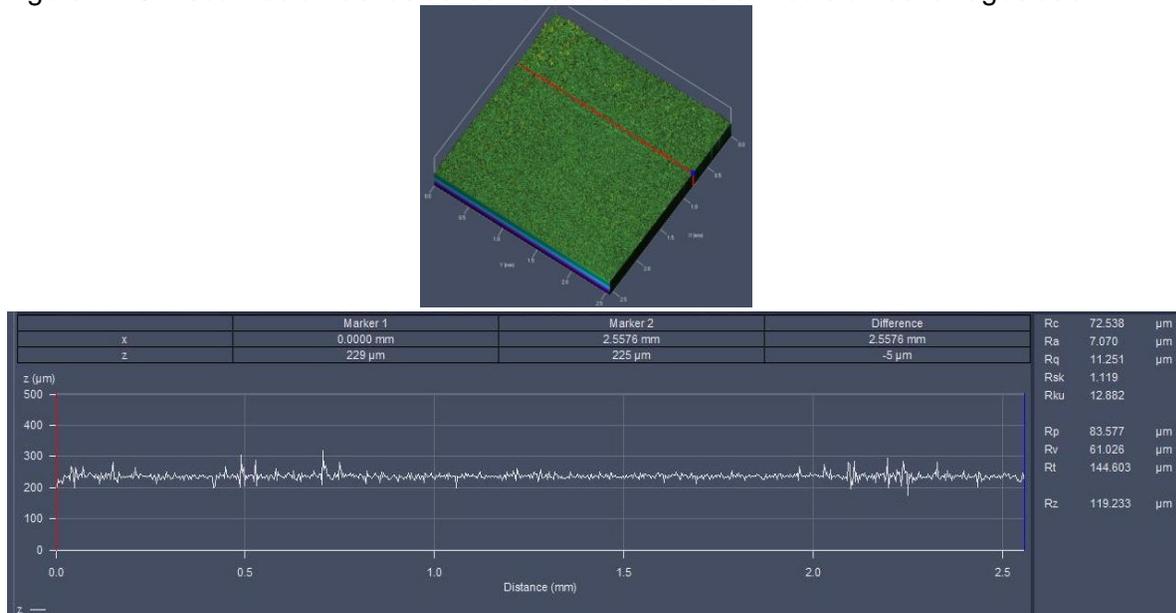
Tabla 4-8 Parámetros básicos que se pueden obtener con el microscopio confocal láser

Parámetros	Formato de datos			
	Rugosidad	Perfil Primario	Ondulación	
Media Altura Z	Rc	Pc	Wc	
Dispersión	Desviación media aritmética	Ra	Pa	Wa
	Desviación Raíz cuadrada	Rq	Pq	Wq
Asimetría	Oblicuidad	Rsk	Psk	Wsk
Nitidez	Curtosis	Rku	Pku	Wku
	Pico más alto	Rp	Pp	Wp
	Valle más bajo	Rv	Pv	Wv
Extremos	Pico absoluto en valle	Rt	Pt	Wt
	Pico promedio al valle	Rz	Pz	Wz
	Pico máximo al valle	Rmax	Pmax	Wmax

Fuente: Ángela Cárdenas

Los resultados al evaluar la rugosidad (R_a , R_c , R_z), se encuentran en la Tabla 4-9, Tabla 4-16 y Tabla 4-23 y estos datos son extraídos de las imágenes, se presenta la Figura 4-16 de manera explicativa.

Figura 4-16 Visualización de los datos hallados durante la medición de la rugosidad



Fuente: Microscopio confocal láser

Tabla 4-9 Resultados obtenidos para evaluar rugosidad (R_a , R_c , R_z)

Muestra HQ 0° (μm)										
Referencia	Posición	R_c	Promedio	Desviación Estándar	R_a	Promedio	Desviación Estándar	R_z	Promedio	Desviación Estándar
X	A1	72.538			7.070			119.233		
	A2	58.007	68.538	9.207	5.610	6.510	0.787	145.919	131.182	13.560
	A3	75.068			6.849			128.394		
	A4	66.427			7.314			104.411		
Y	A5	71.384	71.099	4.536	6.762	7.325	0.569	139.765	126.564	19.303
	A6	75.485			7.899			135.517		
X	B1	64.882			5.798			146.559		
	B2	43.731	56.987	11.550	4.901	5.909	1.067	77.415	120.905	37.866
	B3	62.348			7.027			138.740		
Y	B4	71.160			6.665			130.741		
	B5	59.702	61.865	8.424	6.146	6.237	0.390	100.536	111.508	16.711
	B6	54.733			5.901			103.248		
X	C1	71.738			7.878			152.113		
	C2	75.195	78.476	8.847	7.759	8.061	0.424	135.544	151.574	15.767
	C3	88.494			8.546			167.065		

Tabla 4-9 (Continuación)

	C4	64.873			6.752			88.008		
Y	C5	64.391	67.746	5.399	7.569	7.416	0.602	118.894	108.998	18.187
	C6	73.974			7.927			120.091		

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-10, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_C en el plano X.

Tabla 4-10 Resumen análisis ANOVA R_C en plano X-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	$R_C - X$	2	693.945	346.972	3.511	4.250	0.518
Denominador	Error	6	592.862	346.972			
Total		8	1286.806				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 3.511$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es C.

En la Tabla 4-11, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_C en el plano Y.

Tabla 4-11 Resumen análisis ANOVA R_C en el plano X-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	$R_C - Y$	2	131.087	65.544	1.629	4.250	0.518
Denominador	Error	6	241.385	65.544			
Total		8	372.472				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 1.629$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es A.

En la Tabla 4-12, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_a en el plano X.

Tabla 4-12 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano X-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R²
Numerador	Ra - X	2	7.400	3.700	5.727	4.250	0.518
Denominador	Error	6	3.877	3.700			
Total		8	11.277				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 5.727$ es mayor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media, el mejor punto en la toma de mediciones es C.

En la Tabla 4-13, se presenta el resumen análisis ANOVA, para Ra en el plano Y

Tabla 4-13 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano X-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R²
Numerador	Ra - Y	2	2.581	1.290	4.618	4.250	0.518
Denominador	Error	6	1.676	1.290			
Total		8	4.257				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 4.618$ es mayor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es C.

En la Tabla 4-14, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_z en el plano X.

Tabla 4-14 Resumen análisis ANOVA Rz en el plano X-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R²
Numerador	$R_z - X$	2	1462.065	731.033	1.175	4.250	0.518
Denominador	Error	6	3732.548	731.033			
Total		8	5194.614				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 1.175$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es C.

En la Tabla 4-15, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_z en el plano Y.

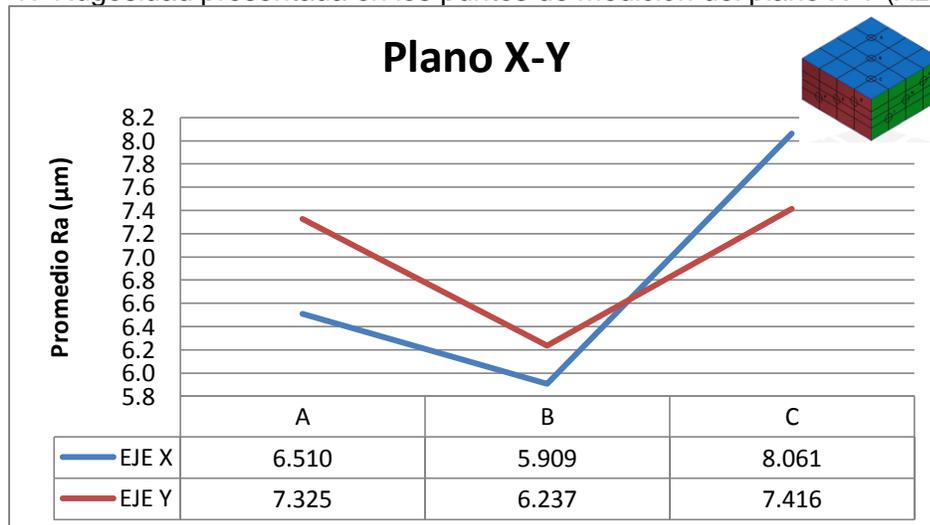
Tabla 4-15 Resumen análisis ANOVA R_z en el plano X-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	$R_z - Y$	2	541.574	270.787	0.827	4.250	0.518
Denominador	Error	6	1965.264	270.787			
Total		8	2506.839				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.827$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es A.

Figura 4-17 Rugosidad presentada en los puntos de medición del plano X-Y (Azul)



Fuente: Ángela Cárdenas

La rugosidad promedio encontrada en la superficie de la última capa de construcción, plano X-Y (Azul), se evalúan las medidas de tipo perpendicular, el valor dado por el

fabricante para precisión es de $200 \mu\text{m} = 0.2 \text{ mm}$ y los valores hallados por la rugosidad están entre $5.909 \mu\text{m}$ y $8.061 \mu\text{m}$. La Figura 4-17 presenta valores más altos en el extremo y más bajos en el centro, al realizar las mediciones en X y Y presentan la misma tendencia.

Tabla 4-16 Resultados obtenidos para evaluar rugosidad (Ra, Rc, Rz)

Muestra HQ 0° (μm)										
Referencia	Punto	Rc	Promedio	Desviación Estándar	Ra	Promedio	Desviación Estándar	Rz	Promedio	Desviación Estándar
X	D1	69.696			8.121			187.528		
	D2	69.401	68.444	1.919	8.789	8.519	0.352	100.259	143.782	43.635
	D3	66.235			8.648			143.559		
	D4	69.513			7.808			152.716		
Z	D5	76.530	67.818	9.671	8.032	7.561	0.632	138.907	125.002	36.698
	D6	57.412			6.843			83.384		
	E1	63.785			7.574			91.368		
X	E2	81.209	73.615	8.925	8.271	8.133	0.505	163.924	133.345	37.597
	E3	75.852			8.555			144.742		
	E4	61.620			7.659			109.940		
Z	E5	67.169	63.245	3.415	7.232	7.392	0.233	89.022	99.437	10.459
	E6	60.947			7.285			99.348		
	F1	66.698			7.984			138.097		
X	F2	63.873	73.959	15.089	7.315	8.418	1.373	124.306	165.563	59.914
	F3	91.306			9.956			234.286		
	F4	80.766			8.074			143.825		
Z	F5	72.599	73.986	6.203	7.636	7.936	0.260	112.943	114.383	28.749
	F6	68.594			8.097			86.381		

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-17, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_c en el plano X.

Tabla 4-17 Resumen análisis ANOVA R_c en el plano Z-X

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	$R_c - X$	2	57.276	28.638	0.276	4.250	0.518
Denominador	Error	6	622.033	28.638			
Total		8	679.309				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.276$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250.

Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es F.

En la Tabla 4-18, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_C en el plano Z

Tabla 4-18 Resumen análisis ANOVA R_C en el plano Z-X

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R²
Numerador	$R_C - Z$	2	174.326	87.163	1.820	4.250	0.518
Denominador	Error	6	287.342	87.163			
	Total	8	461.667				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 1.820$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es F.

En la Tabla 4-19, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_a en el plano X.

Tabla 4-19 Resumen análisis ANOVA R_a en el plano Z-X

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R²
Numerador	$R_a - X$	2	0.231	0.116	0.150	4.250	0.518
Denominador	Error	6	4.612	0.116			
	Total	8	4.843				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.150$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es D.

En la Tabla 4-20, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_a en el plano Z

100 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Tabla 4-20 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano Z-X

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R²
Numerador	R _a - Z	2	0.465	0.232	1.338	4.250	0.518
Denominador	Error	6	1.042	0.232			
Total		8	1.506				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 1.338$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es F.

En la Tabla 4-21, se presenta el resumen análisis ANOVA, para Rz en el plano X.

Tabla 4-21 Resumen análisis ANOVA Rz en el plano Z-X

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R²
Numerador	R _Z - X	2	1621.371	810.685	0.352	4.250	0.518
Denominador	Error	6	13814.421	810.685			
Total		8	15435.792				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.532$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es F.

En la Tabla 4-22, se presenta el resumen análisis ANOVA, para Rz en el plano Z.

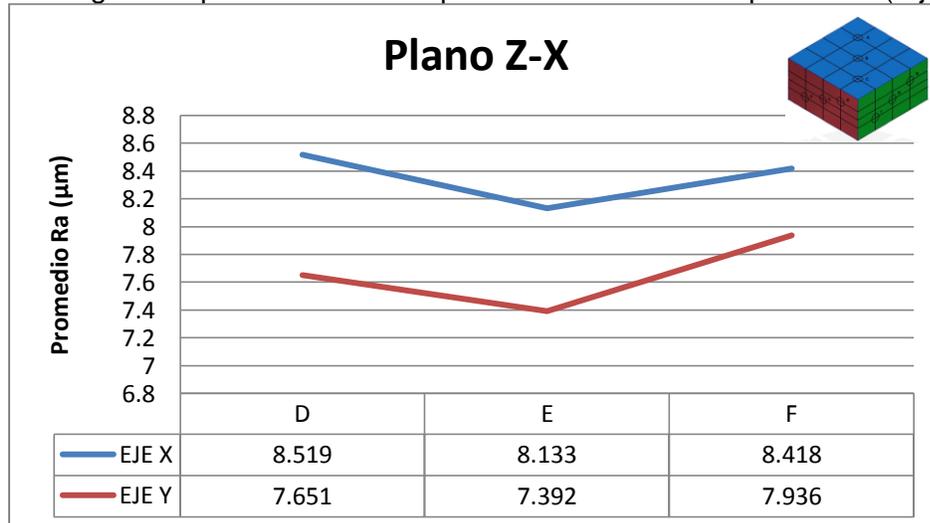
Tabla 4-22 Resumen análisis ANOVA Rz en el plano Z-X

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	R _Z - Z	2	989.766	494.883	0.650	4.250	0.518
Denominador	Error	6	4565.283	494.883			
Total		8	5555.049				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.650$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es D.

Figura 4-18 Rugosidad presentada en los puntos de medición del plano Z-X (rojo)



Fuente: Ángela Cárdenas

La rugosidad promedio encontrada en la superficie del plano Z-X (Rojo), evalúa las medidas de tipo perpendicular, el valor dado por el fabricante para precisión es de $200 \mu\text{m} = 0.2 \text{ mm}$ y los valores hallados por la rugosidad están entre $7.392 \mu\text{m}$ y $8.519 \mu\text{m}$. La Figura 4-18 presenta los valores más altos en los extremos para el punto D Y F y los más bajos en el centro, punto E. Aunque las mediciones de rugosidad en el plano Z-X presentan el mismo comportamiento gráfico, el Plano X tiene los valores más altos en todos los puntos de referencia y el plano Z está representado por el Eje Y tiene los valores más bajos en todos los puntos de referencia.

102 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Tabla 4-23 Resultados obtenidos para evaluar rugosidad (Ra, Rc, Rz)

Muestra HQ 0°(μm)										
Referencia	Posición	Rc	Promedio	Desviación Estándar	Ra	Promedio	Desviación Estándar	Rz	Promedio	Desviación Estándar
Z	G1	84.916			9.257			149.535		
	G2	61.000	75.598	12.802	6.916	8.483	1.357	145.523	137.392	17.673
	G3	80.878			9.275			117.117		
Y	G4	91.450			8.737			125.441		
	G5	72.724	77.906	11.837	8.370	8.529	0.188	127.735	116.888	16.839
	G6	69.544			8.479			97.489		
Z	H1	75.065			8.841			104.530		
	H2	79.028	77.057	1.982	8.987	9.178	0.463	143.802	127.028	20.252
	H3	77.078			9.706			132.751		
Y	H4	77.969			7.935			153.519		
	H5	70.915	73.831	3.682	8.170	8.216	0.307	116.746	123.517	27.255
	H6	72.609			8.544			100.286		
Z	I1	63.431			8.123			114.259		
	I2	143.136	89.579	46.386	11.360	9.223	1.851	347.164	184.491	141.316
	I3	62.169			8.185			92.049		
Y	I4	78.465			8.303			127.144		
	I5	66.309	70.520	6.884	7.962	8.120	0.172	81.445	105.736	22.986
	I6	66.787			8.096			108.619		

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-24, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_C en el plano Z.

Tabla 4-24 Resumen análisis ANOVA R_C en el plano Z-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	$R_C - Z$	2	354.380	177.190	0.229	4.250	0.518
Denominador	Error	6	4639.037	177.190			
Total		8	4993.417				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.229$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es I.

En la Tabla 4-25, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_C en el plano Y.

Tabla 4-25 Resumen análisis ANOVA Rc en el plano Z-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	R _c - Y	2	82.114	41.057	0.613	4.250	0.518
Denominador	Error	6	402.126	41.057			
Total		8	484.241				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.613$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es G.

En la Tabla 4-26, se presenta el resumen análisis ANOVA, para Ra en el plano Z.

Tabla 4-26 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano Z-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	R _a - Z	2	1.033	0.517	0.283	4.250	0.518
Denominador	Error	6	10.965	0.517			
Total		8	11.998				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.283$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es I.

En la Tabla 4-27, se presenta el resumen análisis ANOVA, para Ra en el plano Y.

Tabla 4-27 Resumen análisis ANOVA Ra en el plano Z-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	R _a - Y	2	0.274	0.137	2.574	4.250	0.518
Denominador	Error	6	0.319	0.137			
Total		8	0.592				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 2.574$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es G.

En la Tabla 4-28, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_z en el plano Z.

Tabla 4-28 Resumen análisis ANOVA R_z en el plano Z-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	$R_z - Z$	2	805.356	402.678	0.038	4.250	0.518
Denominador	Error	6	62925.873	402.678			
Total		8	63731.229				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.038$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es I.

En la Tabla 4-29, se presenta el resumen análisis ANOVA, para R_z en el plano Y.

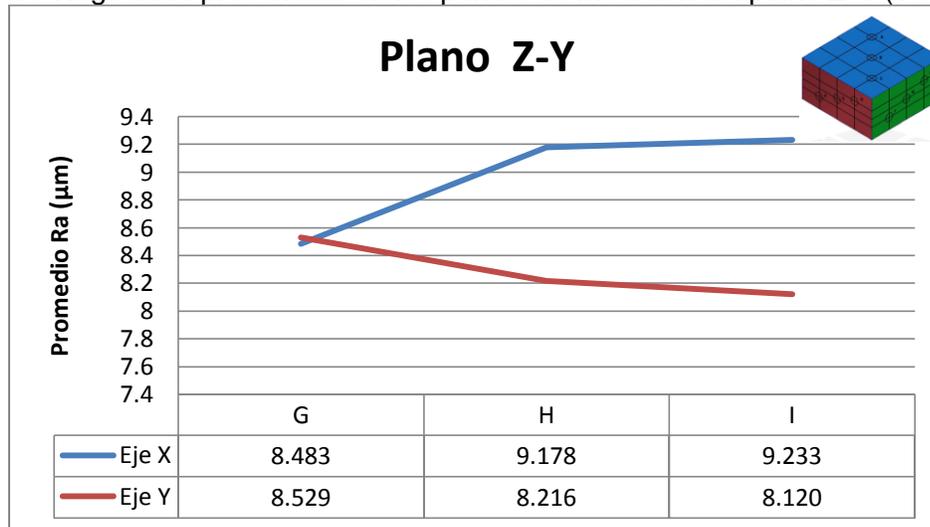
Tabla 4-29 Resumen análisis ANOVA R_z en el plano Z-Y

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	$R_z - Y$	2	484.478	242.239	0.467	4.250	0.518
Denominador	Error	6	3109.445	242.239			
Total		8	3593.923				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.467$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95% es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor punto en la toma de mediciones es H.

Figura 4-19 Rugosidad presentada en los puntos de medición del plano Z-Y (Verde)



Fuente: Ángela Cárdenas

La rugosidad promedio encontrada en la superficie del plano Z-Y (Verde), evalúa las medidas de tipo perpendicular, el valor dado por el fabricante para precisión es de $200 \mu\text{m} = 0.2 \text{ mm}$ y los valores hallados para la rugosidad están entre $8.120 \mu\text{m}$ y $9.233 \mu\text{m}$. La Figura 4-19 presenta los valores observados, en el caso del punto G los valores de rugosidad son cercanos entre sí, pero al ir tomando la rugosidad en los puntos H e I cambian debido a que los valores de rugosidad para el Eje X (representa el plano Z) aumentan y para el Eje Y disminuyen.

La Figura 4-18 proporciona información en el plano Z-X, en donde la rugosidad superficial de la pieza va condicionada con la velocidad de fabricación, las piezas son fabricadas por adición de capas de VeroBlue RGD840 en proceso de fotopolimerización y así construir una pieza sólida, este efecto es irremediablemente apreciable en la superficie lo que tiene una influencia directa con el tiempo de fabricación final, mientras se seleccione HQ que posee menor espesor el tiempo será más alto a comparación de HS. En la Figura 4-19 del el plano Z-Y se concluye en la gráfica como fue la deposición de las capas de VeroBlue RGD840, en donde el movimiento del cabezal de izquierda a derecha deposita el material y se produce la fotopolimerización y la repetición de este movimiento permite finalizar la construcción de nuestra probeta [83].

En la Figura 4-17 Plano X-Y no se puede relacionar las dos características mencionadas anteriormente en la Figura 4-18 y Figura 4-19, porque la Figura 4-17 es la última capa de

fabricación así mismo la rugosidad de la superficie sufre las mismas clases de deficiencias que cualquier medida única utilizada para valorar un atributo físico complejo. Esta falla se detecta en los patrones de orientación, de modo que la rugosidad de la superficie puede variar significativamente, dependiendo de la dirección en la que se mida [62].

Los valores de rugosidad encontrados en la Figura 4-17 y Figura 4-18 son menores en el centro, esto quiere decir que en los procesos de solidificación con respecto a los extremos es diferente. Los extremos son libres y no hay limitantes por lo tanto la rugosidad es más alta, la causa posible de las menores rugosidades en las zonas centrales del los planos X-Y y Z-X son zonas limitadas en el movimiento de las macromoléculas por ser la zona interna de estas superficies y por el movimiento lineal del cabezal, propio del proceso.

Como característica del proceso de metrología dimensional, se refleja una buena calidad dimensional, que además existe anisotropía y se ve reflejada en los valores de rugosidad más no en los valores de control dimensional.

4.3 Propiedades físicas

El VeroBlue RGD840 sólido posiblemente experimente deterioro mediante las interacción con el ambiente, esto es una degradación fisicoquímica que implica fenómenos físicos y químicos, además de reacciones y consecuencias adversas, posiblemente presente degradación por hinchamiento, reacciones químicas, radiación UV, generalmente va acompañada de una disminución de la integridad mecánica. Debido a la complejidad química de los polímeros, los mecanismos de su degradación no se conocen suficientemente [77].

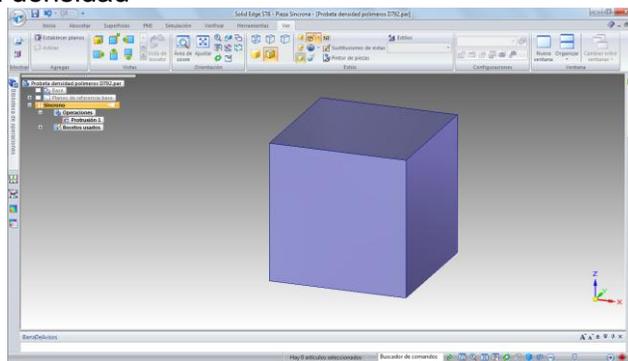
4.3.1 Densidad

La densidad o su recíproco, el volumen específico, es una propiedad comúnmente utilizada para materiales poliméricos. Como con otras propiedades, el volumen específico es muy afectado por la temperatura. La presión atmosférica para algunos polímeros se utiliza como temperatura de funcionamiento. Sin embargo, el volumen específico también

se ve afectado por la presión de procesamiento y, por lo tanto, a menudo se representa en función de la presión, así como de una temperatura, en lo que se conoce como un diagrama.

En la Figura 4-20. Se visualiza el modelamiento de la muestra, según la referencia dimensional de la norma ASTM D792-98 [78].

Figura 4-20 Muestra densidad



Fuente: Ángela Cárdenas

Los resultados obtenidos de la prueba de densidad se resumen en la Tabla 4-30.

Tabla 4-30 Prueba densidad VeroBlue RGD840 solido

Probeta	Sp gr 23/23 °C	D ^{23C}	\bar{D}^{23C}	σ^{D23C}
Fabricante	-	1.18-1.19	1.19	0.01
1HQ	1.21	1.21	1.18	0.03
2HQ	1.16	1.16		
1HS	1.19	1.19	1.18	0.01
2HS	1.18	1.18		

Fuente: Ángela Cárdenas

No se aplica análisis ANOVA debido a que ser una prueba de igualdad debe existir tres o más medias para ser realizado, los datos fueron obtenidos de acuerdo a la norma ASTM D792-98 [78].

Al visualizar los resultados de la Tabla 4-30, reflejan que se encuentran en los valores dados por el fabricante inicialmente y no es afectado por la alta calidad (HQ), ni por la alta velocidad (HS), debido a que la densidad es una propiedad de tipo molecular básica

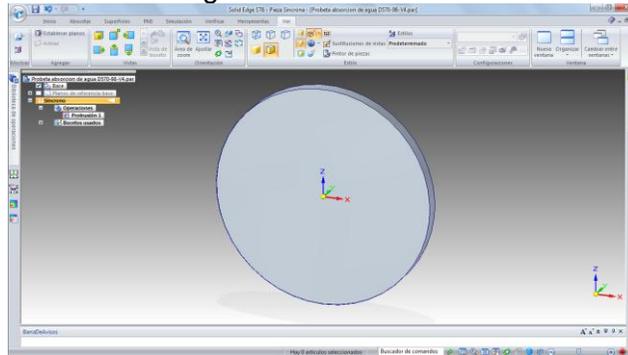
puede llegar a afectar la mayoría de propiedades esenciales y no hay cambio alguno. De acuerdo al resultado promedio de densidad este se correlacionó con tablas de densidades para polímeros encontrando que la densidad de 1.18 corresponde al polímero polimetacrilato de metilo [79], el cual tiene la misma estructura que fue hallada en la identificación del polímero (Ver 4.1 Identificación del polímero).

4.3.2 Absorción de agua

Mientras que todos los polímeros absorben agua hasta cierto grado, algunos son suficientemente hidrofílicos que absorben grandes cantidades de agua para afectar significativamente su rendimiento. El agua hará que el polímero se hinche y sirva como un plastificante, disminuyendo consecuentemente su rendimiento, tal como en el comportamiento eléctrico y mecánico.

En la Figura 4-21, se visualiza la muestra modelada tomando como referencia las dimensiones dadas por la norma ASTM D570-98 [80]. Los resultados obtenidos de prueba absorción de agua se resumen en la Tabla 4-31.

Figura 4-21 Muestra absorción de agua



Fuente: Ángela Cárdenas

Tabla 4-31 Prueba absorción de agua VeroBlueRGD840 sólido

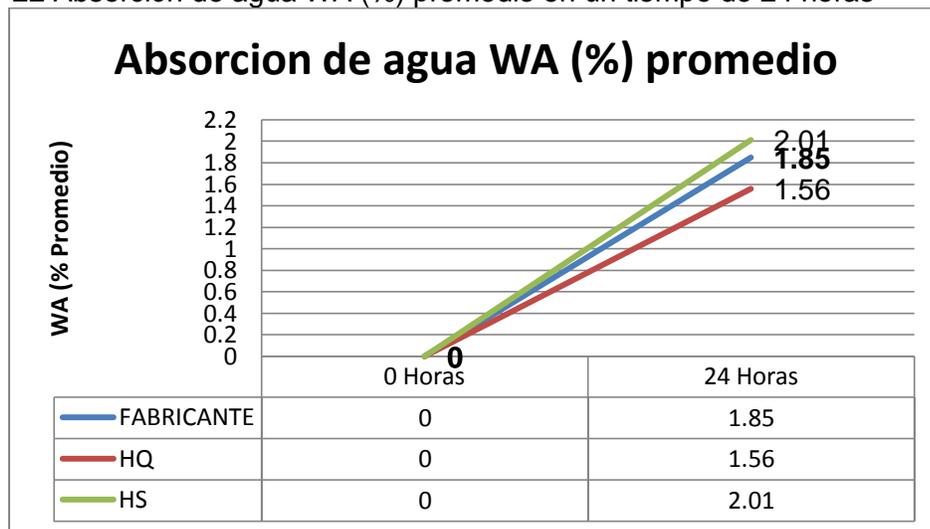
Probeta	Mo (g)	M _t (g)	M%	M perdido %	WA (%)	WA (%) Promedio
Fabricante	-	-	-	-	1.5 - 2.2	1.85
1HQ	7.69	7.79	1.26	0.00	1.26	1.56
2HQ	7.69	7.76	0.95	0.00	0.95	
3HQ	7.57	7.76	2.47	0.00	2.47	
1HS	7.64	7.83	2.49	0.00	2.49	2.01
2HS	7.60	7.81	2.74	0.00	2.74	
3HS	7.77	7.83	0.80	0.00	0.80	

Fuente: Ángela Cárdenas

No se aplica análisis ANOVA debido a que ser una prueba de igualdad debe existir tres o más medias para ser realizado, los datos fueron obtenidos de acuerdo a la norma ASTM D570-98 [80].

La Figura 4-22. muestra las diferencias promedio que se observaron en WA (%) para las muestras durante un lapso de 24 horas hay una notable diferencia entre HQ y HS, donde HQ = 2.01% y HS = 1.56%, esta diferencia en la absorción de agua se puede relacionar en la manera como se construye la probeta capa a capa, en HQ se obtienen espesores de capa de 16 micras y en HS se obtienen espesores de 30 micras, el valor del espesor de HS es mucho menor lo cual sugiere que entre capa y capa quedan espacios entre las macromoléculas por los cuales ocurre la absorción de agua.

Figura 4-22 Absorción de agua WA (%) promedio en un tiempo de 24 horas



Fuente: Ángela Cárdenas

Si bien estos valores de WA (%) están dentro del rango establecido por el fabricante, físicamente hay una ganancia de masa después de estar en contacto con el agua, pero al estar dentro de estos rangos esta condición, el agua no actúa como un agente plastificante⁴, esto hace que el polímero sea más plástico. En cierto sentido, lubrica las cadenas en la región amorfa. Como la absorción de humedad no aumentó del 2.2% y basándose en textos [51, 81] se concluye que la temperatura de transición vítrea, esfuerzo a la cedencia, modulo elástico, dimensiones, masa, volumen no están afectados por la absorción de agua y que la relación de cambio entre el volumen y la superficie de la pieza se comporta de manera homogénea de acuerdo a las condiciones del entorno durante la prueba.

4.4 Propiedades mecánicas

Los ensayos mecánicos permiten evaluar la respuesta de un material a la acción de una fuerza aplicada [85] Las propiedades mecánicas evaluadas en este ítem aplican a algunas respuestas del comportamiento del VeroBlue RGD840 a corto plazo.

4.4.1 Tensión

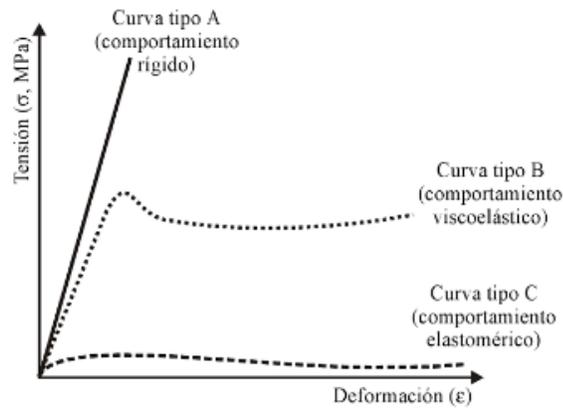
Los materiales polímeros suelen presentar tres tipos principales de curvas, que se indican en la Figura 4-23.

Las curvas de la Figura 4-23 no corresponden necesariamente con un determinado tipo de polímero, en cuanto a su composición o a su clasificación por familias, sino que se refieren a los comportamientos más habituales de los polímeros a tracción. Este comportamiento es muy sensible a las variaciones de temperatura y a la velocidad de deformación. [85].

En la Figura 4-24. Se observa el modelamiento de la probeta para el ensayo de tensión de acuerdo a las dimensiones dadas por la norma ASTM D638 [86].

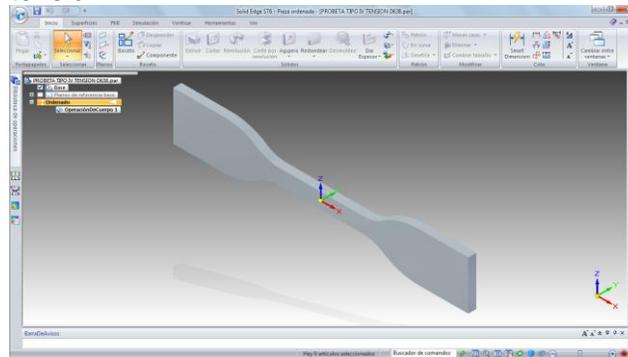
⁴ Plastificante: la mayor parte de los polímeros son adversamente afectados por la radiación ultravioleta (como la de la luz solar) y por el oxígeno; estos debilitan y rompen los enlaces primarios, causando la escisión (división) de las moléculas de cadena larga. El polímero entonces se degrada haciéndose rígido y frágil [81]

Figura 4-23 Curvas de tracción características de materiales poliméricos [85]



Fuente: M. N. S. Ballesteros, Tecnología de proceso y transformación de materiales, Universitat Politecnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, Dec 31, 2005

Figura 4-24 Probeta tensión



Fuente: Ángela Cárdenas

Esta prueba se ejecutó en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos - Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, el equipo utilizado fue la máquina universal de ensayos Referencia AG-IS Marca SHIMADZU, para una carga 5 KN. En la Tabla 4-32, se presentan los resultados obtenidos de resistencia a la tensión para las probetas impresas en HQ en sus tres orientaciones asignadas.

112 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Tabla 4-32 Resultados resistencia a la tensión, probetas HQ VeroBlue RGD840 sólido
Resistencia a la Tensión (MPa)

Código	Probeta	Resultado	Promedio	Desviación Estándar
Fabricante	-	50-60	55	7.071
	1	43.848		
	2	42.171		
HQ (0°)	3	45.402	44.426	1.481
	4	44.767		
	5	45.939		
	1	47.664		
	2	39.828		
HQ (45°)	3	38.818	40.957	3.775
	4	39.600		
	5	38.875		
	1	44.800		
	2	45.931		
HQ (90°)	3	44.849	44.950	0.608
	4	44.914		
	5	44.255		

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-33, se presenta el resumen análisis ANOVA, para resistencia a la tensión HQ.

Tabla 4-33 Resumen análisis ANOVA para resistencia a la tensión HQ

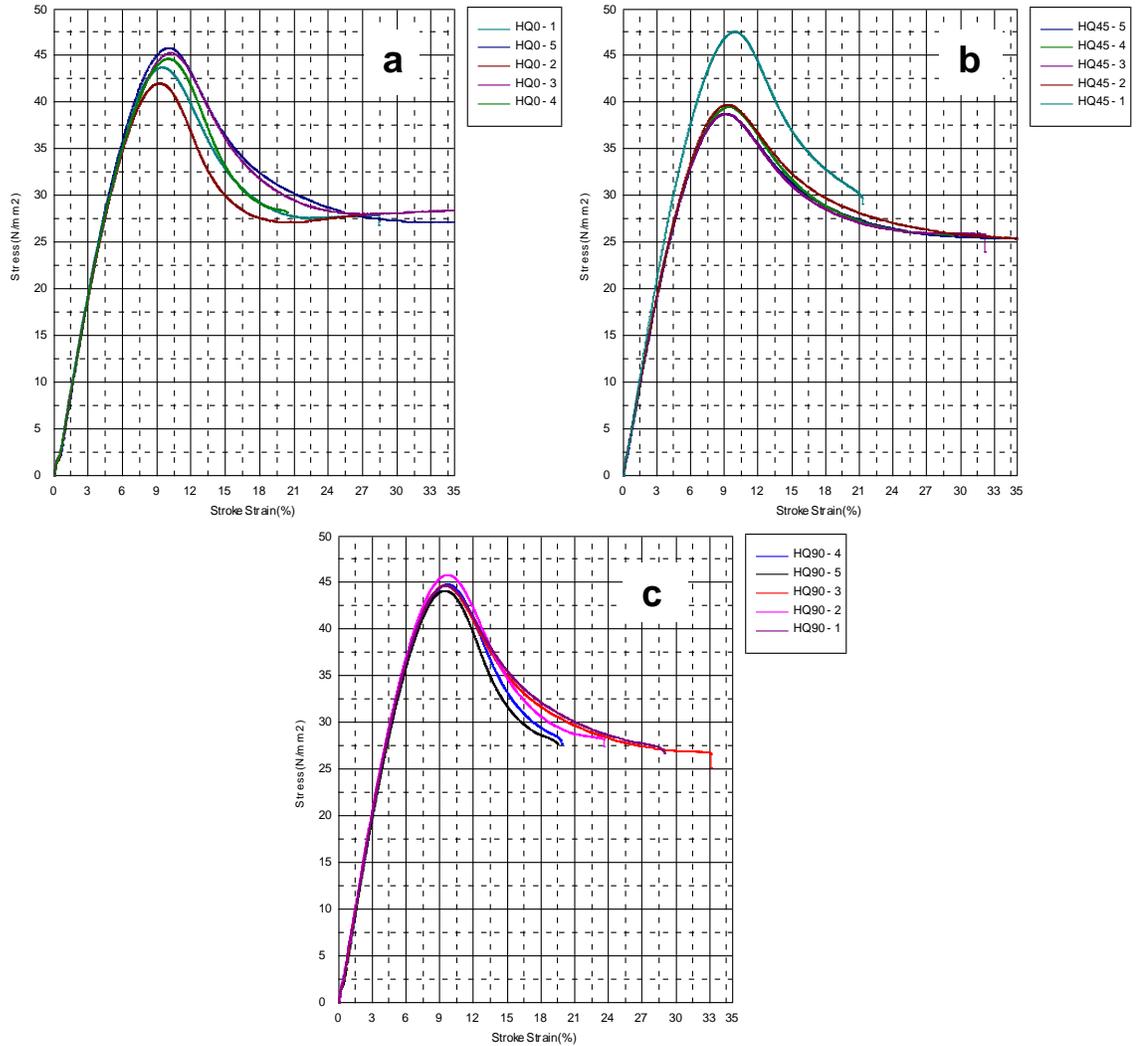
RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	Resistencia a la tensión	2	47.079	23.539	4.199	3.890	0.518
Denominador	Error	12	67.266	23.539			
	Total	14	114.345				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o=4.199$ es mayor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 12 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 3.890. Se concluye que las tres orientaciones a nivel estadístico producen diferencias significativas, pero teniendo en cuenta las medias la mejor orientación es HQ 90°.

En la Figura 4-25 se visualizan las gráficas de la curva esfuerzo – deformación de acuerdo la Tabla 4-32.

Figura 4-25 Curva esfuerzo-deformación probetas HQ, orientaciones a) 0°, b) 45° y c) 90°



Fuente: Máquina universal de ensayos – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogota

En la Tabla 4-34, se presentan los resultados de resistencia a la tensión para las probetas impresas en HS en sus tres orientaciones asignadas.

114 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Tabla 4-34 Resultados resistencia a la tensión, probetas HS VeroBlue RGD840 sólido
Resistencia a la Tensión (MPa)

Código	Probeta	Resultado	Promedio	Desviación Estándar
Fabricante		50-60	55	7.071
HS (0°)	1	42.196	39.072	3.121
	2	36.637		
	3	37.231		
	4	36.548		
	5	42.749		
HS (45°)	1	42.749	43.021	0.229
	2	42.855		
	3	43.107		
	4	43.335		
	5	43.058		
HS (90°)	1	40.080	39.009	2.759
	2	37.370		
	3	39.982		
	4	35.230		
	5	42.383		

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-35, se presenta el resumen análisis ANOVA, para resistencia a la tensión para probetas HS.

Tabla 4-35 Resumen análisis ANOVA para resistencia a la tensión probetas HS

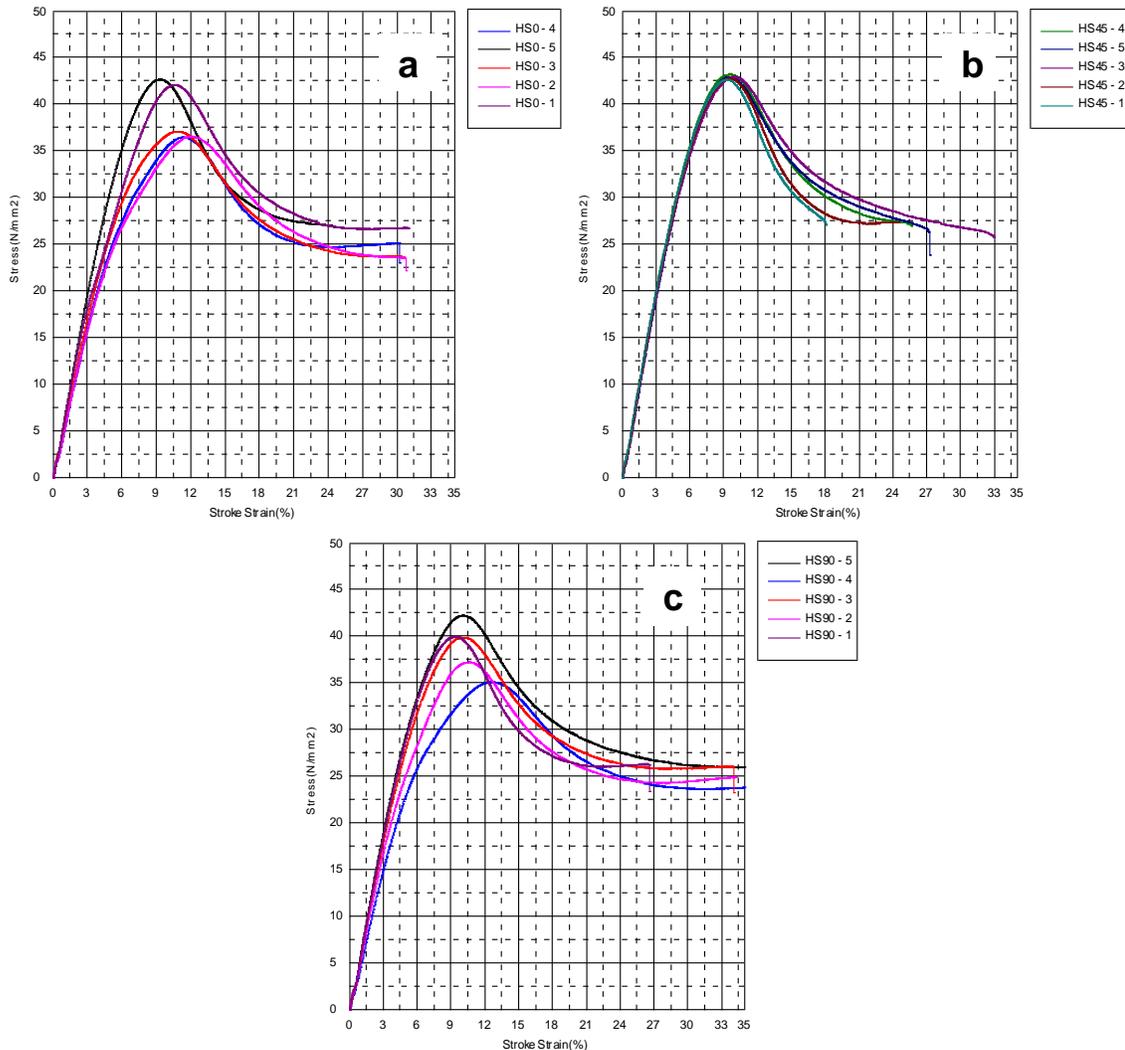
RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	Resistencia a la tensión	2	52.817	26.408	4.552	3.890	0.518
Denominador	Error	12	69.622	26.408			
	Total	14	122.439				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o=4.552$ es mayor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 12 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 3.890. Se concluye que las tres orientaciones a nivel estadístico producen diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media la mejor orientación es HS 45°.

En la Figura 4-26 se visualizan las gráficas de la curva esfuerzo – deformación de acuerdo a la Tabla 4-34.

Figura 4-26 Curva esfuerzo-deformación probetas HS, orientaciones a) 0°, b) 45° y c) 90°



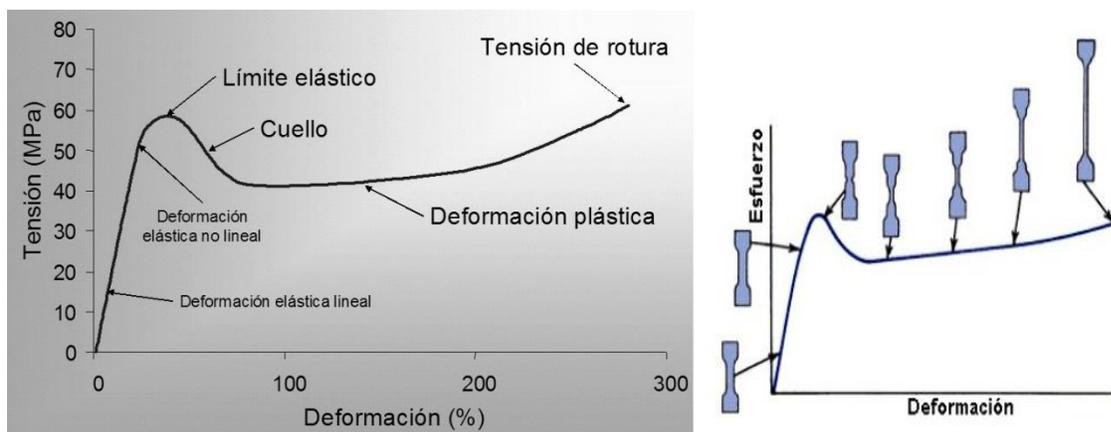
Fuente: Máquina universal de ensayos – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogota

Al comparar las Figuras 4-25 y Figura 4-26 presenta en todas las curvas esfuerzo-deformación características similares a la observada en la Figura 4-23, curva tipo B (comportamiento viscoelástico), el valor máximo que se observó fue de 47.664 MPa, que ocurrió cuando la probeta uno fue impresa HQ 45°, el principal factor que explica esa no linealidad (mayor resistencia en 0° coincidente con la dirección de aplicación de la carga) del comportamiento del VeroBlue RGD840 sólido, quizá este directamente relacionado al proceso de fabricación, esta no linealidad ocurre porque la impresora al depositar el

material ejecuta capas con orientacion no regularmente al largo de la capa [94], durante el alargamiento las cadenas se alinean en la dirección del estirado originando estructuras orientadas, el resultado de este estiramiento es el aumento del modulo de elasticidad, aumento en la resistencia de la direccion del estirado y disminucion de la ductilidad. [90-94]

La probetas de 90° tiene mayor rigidez esto acorde a la inclinacion de las gráficas. Las deformaciones son menores tambien a 90°. El valor de resistencia máximo es menor al dado por el fabricante esto se pudo dar o la causa posible a falta de exposicion a la radiacion UV, estas pruebas con exposicion UV pretendia en primera medida determinar el tiempo de degradacion que tenian los especimenes para poder las condiciones de confiabilidad necesaria para los usuarios finales que buscan una alternativa en esta tecnica de manufactura aditiva, en este proceso se observó un aumento en la resistencia mecanica [110]

Figura 4-27 Curva esfuerzo-deformación esquemática para un polímero semicristalino, a) varios estados de deformación de la probeta de acuerdo al esfuerzo aplicado [82, 84]



Fuente: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/Imagenes/Fig15_9.jpg,
<https://image.slidesharecdn.com/propmecanicas2-150626192901-lva1-app6891/95/prop-mecanicas-2-14-638.jpg?cb=1435347026>

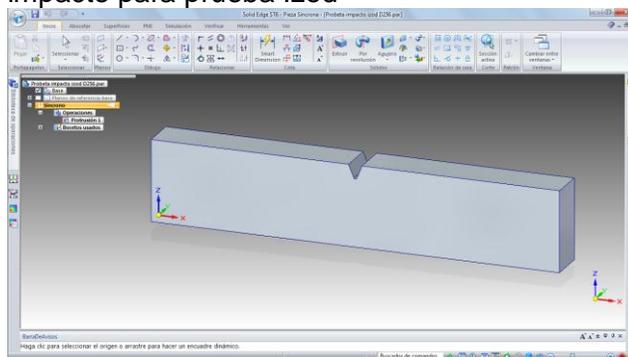
Este comportamiento observado en la Figura 4-25 y 4-26 es el mismo que se observa en la Figura 4-27, la diferencia se encuentra en los valores registrados de resistencia a la tensión donde los más altos fueron para una orientación de 45° y los más bajos para 0°.

4.4.2 Impacto

La resistencia al impacto de una estructura es una función compleja de la geometría, modo de cargado, velocidad de aplicación de la carga, medio ambiente, propiedades del material, y, lo más importante la falla [94]. La resistencia al impacto no es una propiedad fundamental del material puesto que esta depende de la geometría de la muestra y del método de medida [95] Se consideró como un factor importante la orientación de las probetas porque puede influenciar considerablemente los resultados, debido a que las propiedades mecánicas del polímero están influenciadas durante su etapa de procesamiento y construcción, debido a que los resultados obtenidos en las pruebas de tensión se percibió que la orientación influye en el comportamiento del material como anisotrópico por consecuencia de algún cambio de estiramiento .

En la Figura 4-28, se observa el modelamiento de la probeta para el ensayo de impacto de acuerdo a dimensiones dadas en la norma ASTM D256-03. [96]

Figura 4-28 Probeta impacto para prueba Izod



Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-36, se presentan los resultados de resistencia al impacto, los valores se encuentran entre 24 y 54 (J/m) para los diferentes casos, todos presentaron falla tipo C: Ruptura completa, en dos secciones.

Tabla 4-36 Resultados resistencia al impacto, probetas VeroBlue RGD840 sólido

Calidad (Orientación)	Resistencia al Impacto (J/m)						Promedio	Desviación estándar
	Probeta							
	1	2	3	4	5			
Fabricante	20 – 30					25	7.071	
HQ (0°)	26.500	27.500	31.833	28.667	36.167	30.133	3.924	
HS (0°)	29.333	20.667	20.667	21.000	29.333	24.200	4.688	
HQ (45°)	60.000	55.000	54.500	59.167	53.667	54.467	2.900	
HS (45°)	30.000	30.333	29.667	30.000	30.667	30.133	0.380	
HQ (90°)	29.667	34.333	30.667	31.500	29.333	31.100	1.999	
HS (90°)	30.333	29.333	27.833	23.333	27.833	27.333	2.679	

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-37, se presenta el resumen análisis ANOVA, para resistencia al impacto probetas HQ.

Tabla 4-37 Resumen análisis ANOVA para resistencia al impacto probetas HQ

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	Resistencia al impacto	2	2229.761	1114.881	120.323	3.890	0.518
Denominador	Error	12	111.189	1114.881			
Total		14	2340.950				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o=120.323$ es mayor al punto crítico para el valor F teórico con 2 y 12 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 3.890. Se concluye que las tres orientaciones a nivel estadístico producen diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media la mejor orientación es HQ 45°.

En la Tabla 4-38, se presenta el resumen análisis ANOVA, para resistencia al impacto probetas HS.

Tabla 4-38 Resumen análisis ANOVA para resistencia al impacto probetas HS

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	Resistencia al impacto	2	89.082	44.541	4.561	3.890	0.518
Denominador	Error	12	117.177	44.541			
Total		14	206.259				

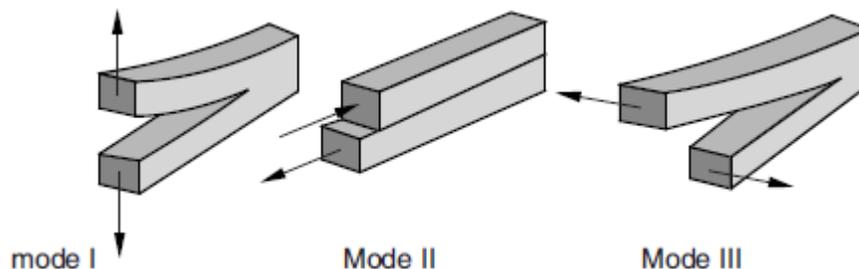
Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o=4.561$ es mayor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 12 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 3.890. Se concluye que las tres orientaciones a nivel estadístico producen diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media la mejor orientación es HS 45°.

En la Figura 4-29 se contempla los modos de fallo que pueden propagarse por fisuras y propagación de grietas. En la determinación experimental de la propagación se asumió a partir de la muesca integrando su construcción capa a capa (laminas) y su orientación; para la descripción cuantitativa y posibles movimientos relativos de las superficies de fisura:

- Modo I: apertura de la grieta; levantamiento lateral simétrico de la grieta.
- Modo II: en corte plano; deslizamiento de la superficie de la grieta en el plano de la fisura.
- Modo III: en corte plano; desplazamiento de la superficie de la grieta transversal a la dirección de la grieta.

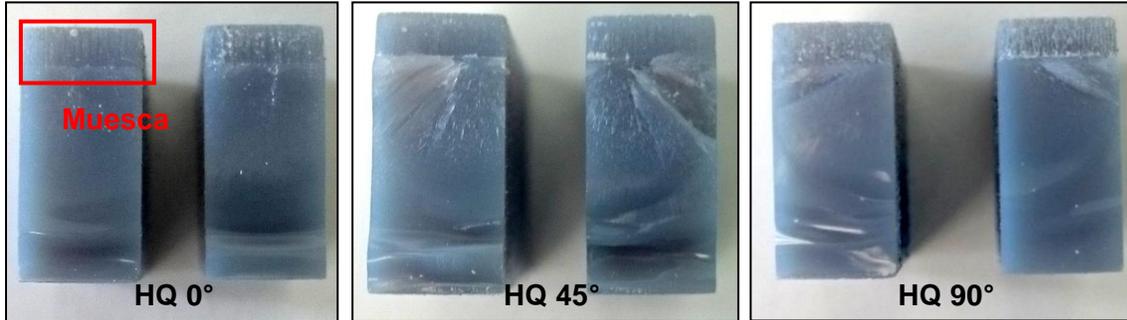
Figura 4-29 Modo de fallo de propagación de grietas [51]



Fuente: Grellmann Wolfgang, Seichler Sabine. Polymer Testing. Hanser Publishers. 2007

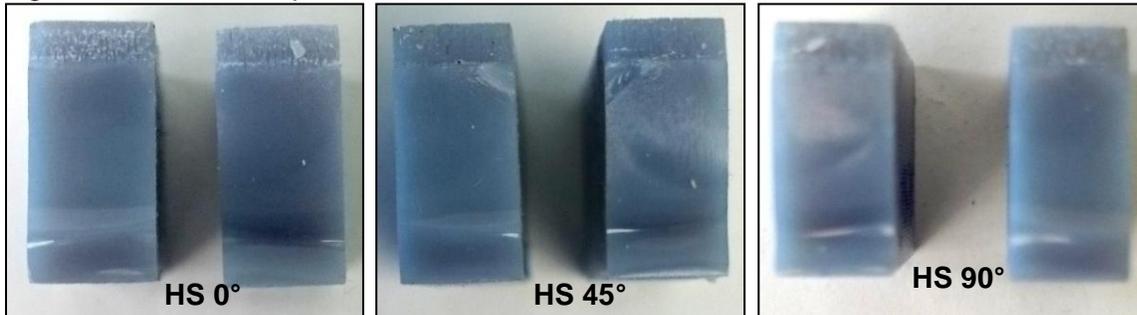
En la Figura 4-30 y Figura 4-31 se observan respectivamente las fracturas de algunas de las probetas sin embargo están son totalmente sólidas a nivel macroscópico su construcción fue de carácter laminar y presentan los tres modos de fallo en la propagación de la grieta (Modo I, Modo II y Modo III).

Figura 4-30 Fracturas presentada en las muestras HQ



Fuente: Ángela Cárdenas

Figura 4-31 Fracturas presentadas en las muestras HS



Fuente: Ángela Cárdenas

Las condiciones de prueba de las probetas fue temperatura ambiente 21°C y humedad relativa de 47.9%; el fabricante nos facilita un valor de resistencia al impacto min: 20 J/m y máx.: 30 J/m, Se observa en consecuencia:

- Las probetas fabricadas a 0° tienen una construcción longitudinal a la bandeja y la muesca es perpendicular a la bandeja de construcción.
- Las probetas fabricadas a 90° tienen una construcción transversal, en el momento del impacto la distribución de la tensión es tal que la grieta se propaga en paralelo a la dirección del movimiento de los cabezales de inyección.

Dado que se poseen dos tipos de calidades (HQ, HS) y tres tipos de orientaciones (0° , 45° y 90°), mientras se realizaba el ensayo de impacto se observaron diferentes comportamientos del VeroBlue

De una grieta o fisura, puede ocurrir una fractura inestable, muchas veces imponiendo velocidades de grieta de cientos de metros por segundo. Las velocidades altas son más idóneas para provocar una fractura inestable, siendo las otras condiciones iguales, mas aun incluso pequeñas fisuras, geometrías menos severas, o temperaturas moderadas, pueden llegar a ser criticas. Esto es particularmente debido a la naturaleza RGD840 sólido, demostrando que las probetas tienen una fuerte relación de calidad vs orientación, ya estas también son afectadas por la anisotropía. Al comparar los resultados entre HQ y HS, la orientación de 0° y 90° su resistencia al impacto aumentó con la calidad en un 124%. Al comparar los resultados entre HQ y HS, la orientación a 45° su resistencia al impacto aumentó con la calidad en un 181.42%.

Debido a esto el VeroBlue RGD840 sólido, se ensayó bajo condiciones críticas ya que el impacto implica una alta velocidad, pero el tipo de falla usualmente asociado con el impacto puede ocurrir también bajo aparentemente condiciones moderadas, incluso a bajas velocidades de carga. Cuando la acumulación de la energía de deformación es mayor de la que puede ser disipada por el material en la vecindad viscoelástica de los polímeros, comportamiento que se observó también en el ensayo de tensión con las curvas de esfuerzo-deformación. Bajo realmente condiciones de alta velocidad, es decir, cuando están involucrados los efectos de inercia, la deformación y comportamiento de la fractura es complicado por los efectos de propagación y construcción de onda [11, 12, 98-101].

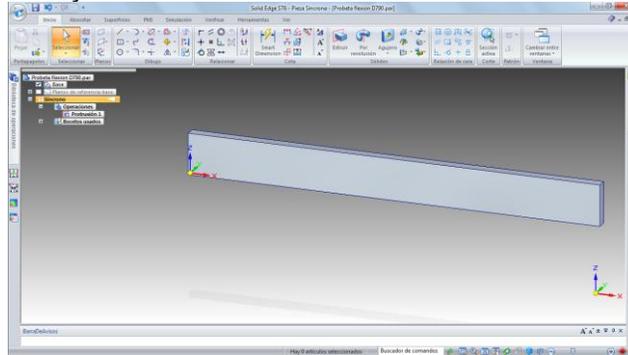
4.4.3 Flexión

El ensayo de flexión se realizó de acuerdo con la norma ASTM D790-03 [78] sirve para determinar las propiedades de resistencia y de cambio de forma bajo carga de flexión. La tensión, la compresión y el esfuerzo cortante se producen en la muestra, por lo que la influencia de la tensión de corte puede minimizarse seleccionando una relación L/d suficientemente grande. El ensayo tiene como función principal el aseguramiento de la calidad y establecer los parámetros del VeroBlue RGD840 sólido, estos parámetros

pueden ser: E módulo bajo carga de flexión (módulo de flexión) en la dirección de la fibra E_f , la resistencia de flexión máximo a la rotura σ_f y la deformación de la fibra extrema ϵ_f .

En la Figura 4-32, se observa el modelamiento de la probeta para el ensayo de flexión de acuerdo a dimensiones dadas en la norma ASTM 256-03 [96].

Figura 4-32 Probeta ensayo flexión



Fuente: Ángela Cárdenas

El software Objet Studio antes de imprimir los modelos, tiene la opción de ajustar la resistencia de la estructura formada con el material de soporte, el material de soporte llena algunos huecos y vacios. El seleccionar esta opción de ajuste es útil cuando se producen modelos grandes ó largos/masivos ó pequeños/modelos delicados. El software siempre configura los modelos en default. En este ensayo se seleccionaron dos tipos de ajuste para el soporte en la impresión de la probeta de flexión: a) Default (Predeterminado: masivos o pequeños, soporte medio) y b) Heavy (Pesado: para modelos largos que necesitan mucho apoyo), la finalidad es encontrar si el soporte influye en la impresión de los modelos, ver Figura 4-33.

Figura 4-33 Probeta flexión impresa VeroBlue RGD840 sólido, a) soporte Default y b) soporte Heavy





Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-39 se presentan los resultados obtenidos de resistencia a la flexión y en la Tabla 4-42 se presentan los resultados de modulo de flexión.

Tabla 4-39 Resultados resistencia a la flexión, probetas VeroBlue RGD840 sólido

Calidad (Orientación)	Resistencia a la Flexión (MPa)						Promedio	Desviación Estándar
	Probeta							
	1	2	3	4	5			
Fabricante	60 - 70					65	7.071	
HQ (0°)	57.707	58.717	52.679	52.469	51.742	54.661	3.279	
HQ (0°) soporte heavy	63.078	59.419	60.699	61.600	58.392	60.637	1.831	
HS (0°)	45.416	38.477	29.160	40.135	37.432	38.124	5.877	
HS (0°) soporte heavy	42.749	43.542	46.948	46.732	40.748	44.144	2.665	

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-40, se presenta el resumen análisis ANOVA, para resistencia a la flexión para probetas HQ.

Tabla 4-40 Resumen análisis ANOVA resistencia a la flexión probetas HQ

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	Resistencia a la flexión	1	89.246	89.246	12.660	5.320	0.518
Denominador	Error	8	56.396	89.246			
	Total	9	279041.847				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o=12.660$ es mayor al punto crítico para el valor F teórica con 1 y 8 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 5.320. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor tipo de soporte para usar en la impresión de las probetas es HQ 0° Soporte fuerte permitiendo obtener mayor resistencia a la flexión.

124 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

En la Tabla 4-41, se presenta el resumen análisis ANOVA, para resistencia a la flexión para probetas HS.

Tabla 4-41 Resumen análisis ANOVA resistencia a la flexión para probetas HS

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	Resistencia a la tensión	1	88.977	88.977	4.253	5.320	0.518
Denominador	Error	8	167.387	88.977			
	Total	9	256.364				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 4.253$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 1 y 8 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 5.320. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media el mejor tipo de soporte para usar en la impresión de las probetas HS 0° Soporte fuerte permitiendo obtener mayor resistencia a la flexión.

Tabla 4-42 Resultados módulo de flexión, probetas VeroBlue RGD840 sólido

Calidad (Orientación)	Modulo de Flexión (MPa)						
	Probeta					Promedio	Desviación Estándar
	1	2	3	4	5		
Fabricante	1900 - 2500					2200	0.424
HQ (0°)	1616.850	1655.080	1456.362	1465.635	1455.304	1529.846	97.894
HQ (0°) SH*	1694.474	1697.205	1697.490	1710.791	1658.792	1691.750	19.487
HS (0°)	994.297	1053.154	764.533	969.596	1221.910	1000.698	164.673
HS (0°) SH*	1161.703	1256.373	1333.014	1303.508	1108.444	1232.608	95.022

SH* = soporte heavy

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-43, se presenta el resumen análisis ANOVA, para modulo de flexión en probetas HQ.

Tabla 4-43 Resumen análisis ANOVA modulo de flexión probetas HQ

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	Modulo de flexión	1	65532.425	65532.425	13.155	5.320	0.518
Denominador	Error	8	39851.626	65532.425			
Total		9	105384.051				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 13.155$ es mayor al punto crítico para el valor F teórica con 1 y 8 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 5.320. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media, el mejor tipo de soporte para usar en la impresión de las probetas es HQ 0° Soporte flexión permitiendo obtener mayor modulo de flexión.

En la Tabla 4-44, se presenta el resumen análisis ANOVA, para modulo de flexión en probetas HS.

Tabla 4-44 Resumen análisis ANOVA modulo de flexión probetas HS

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	Modulo de flexión	2	134456.084	134456.084	7.440	5.320	0.518
Denominador	Error	6	144585.763	134456.084			
Total		8	279041.847				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 7.440$ es mayor al punto crítico para el valor F teórico con 1 y 8 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 5.320. Se concluye que a nivel estadístico ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media, el mejor tipo de soporte para usar en la impresión de las probetas es HQ 0° Soporte fuerte permitiendo obtener un modulo más alto de flexión.

Al comparar los resultados de HQ y HS en resistencia y módulo de flexión los valores siempre fueron más altos cuando se utilizó el soporte heavy el cual aporó apoyo durante la impresión de las probetas debido a que cuando el VeroBlue RGD840 líquido se estaba transformando a sólido está sometido a flexión y la parte superior está sometida a compresión. En el ensayo de flexión, la compresión disminuye en la dirección perpendicular al eje central de la pieza desde una superficie, donde la compresión es

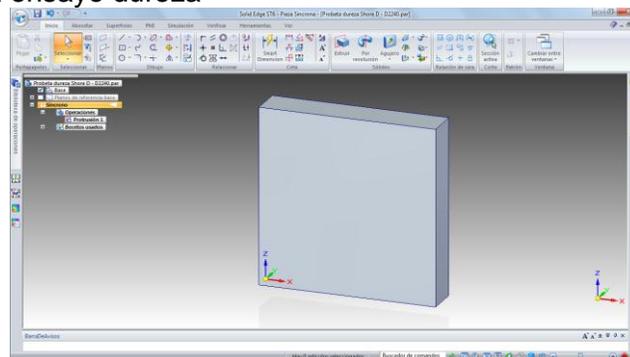
máxima, hasta la superficie opuesta, donde la tracción es máxima mientras que la inferior lo está a tracción [101]. Las discrepancias encontradas en los valores pueden estar dadas por el método utilizado en el ensayo que fue de tres puntos y el fabricante no especifica si utilizó el método de cuatro puntos para hallar estos resultados.

4.4.4 Dureza

Al evaluar la dureza superficial del material midiendo la profundidad que alcanza la punta de acero normalizada cuando se presiona contra el material, el sistema de indicación de presión constante asegura la presión uniforme de la prueba que elimina las lecturas falsas. La superficie de apoyo y de la muestra deberán ser lisas y de caras paralelas. El durómetro se coloca sobre la muestra con paralelismo de caras con ayuda de un dispositivo apropiado. El método Shore D se emplea para polímeros más duros: elastómeros duros, caucho duro, ebonita, etc.

En la Figura 4-34, se observa el modelamiento de la probeta para el ensayo de dureza de acuerdo a las dimensiones dadas en la norma ASTM D2240-05. [102]

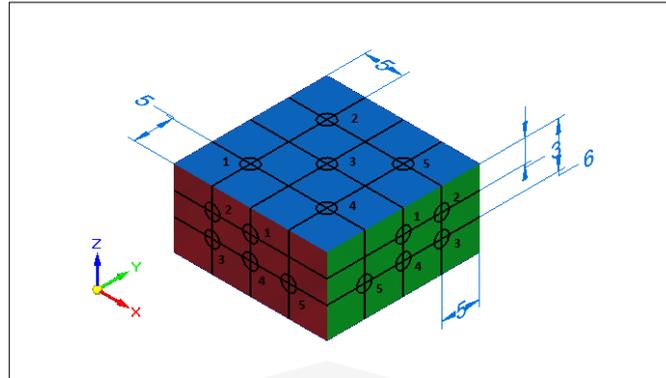
Figura 4-34 Probeta ensayo dureza



Fuente: Ángela Cárdenas

En la Figura 4-35, se visualiza la distribución para ejecutar las mediciones el recorrido será de acuerdo a la secuencia marcada del 1 al 5, comenzando en la última capa de construcción plano X-Y (Azul) y con respecto a esa cara se continua con el plano Z-X (Rojo) y por último el plano Z-Y (Verde).

Figura 4-35 Distribución de las posiciones donde se realizó las mediciones de dureza (mm)



Fuente: Ángela Cárdenas

En la Figura 4-36 se visualiza como se ejecutaron las mediciones con respecto a sus ejes respectivos.

Figura 4-36 Medición probeta 3 plano X-Y, orientación 0°, punto de medición 1



Fuente: Laboratorio de metalografía – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

Las probetas se imprimieron en HQ, con el fin de confrontar si alguno de los resultados proporcionados por el ensayo de tensión están relacionados (Ver Anexo C). En la Tabla

128 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

4-45, Tabla 4-47 y Tabla 4-49 se presentan el resumen de los resultados obtenidos del ensayo de dureza para cada plano.

Tabla 4-45 Dureza Shore D, Plano X-Y

Plano X-Y Dureza (Shore D)					
Lote	Probeta	Plano	Resultado	Promedio	Desviación Estándar
Fabricante	-	-	83 – 86	84.500	2.121
	1		79.000		
HQ (0°)	2	X-Y	80.000	80.000	1.000
	3		81.000		
	1		79.200		
HQ (45°)	2	X-Y	79.600	79.467	0.231
	3		79.600		
	1		80.200		
HQ (90°)	2	X-Y	80.000	80.000	0.200
	3		79.800		

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-46, se presenta el resumen análisis ANOVA, para dureza en el plano X-Y en probetas HQ.

Tabla 4-46 Resumen análisis ANOVA Dureza plano X-Y probetas HQ

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	Dureza plano X-Y	2	0.569	0.284	0.780	4.250	0.518
Denominador	Error	6	2.187	0.284			
	Total	8	2.756				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.780$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas teniendo en cuenta la media se recomienda usar las orientaciones de 0° y 90° para probetas HQ.

Tabla 4-47 Dureza Shore D, Plano Z-X

Plano Z-X Dureza (Shore D)					
Lote	Probeta	Plano	Resultado	Promedio	Desviación Estándar
Fabricante	-	-	83 - 86	84.500	2.121
	1		79.400		
HQ (0°)	2	Z-X	80.800	80.067	0.702
	3		80.000		
	1		78.000		
HQ (45°)	2	Z-X	79.600	78.533	0.924
	3		78.000		
	1		77.600		
HQ (90°)	2	Z-X	78.200	77.733	0.416
	3		77.400		

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-48, se presenta el resumen análisis ANOVA, para dureza en el plano Z-X en probetas HQ.

Tabla 4-48 Resumen análisis ANOVA Dureza plano Z-X probetas HQ

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R²
Numerador	Dureza plano Z-Y	2	8.436	4.218	8.325	4.250	0.518
Denominador	Error	6	3.040	4.218			
	Total	8	11.476				

Fuente: Ángela Cárdenas

El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 8.325$ es mayor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media, el mejor plano para tomar la dureza es en la probeta HQ 0°.

130 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

Tabla 4-49 Dureza Shore D, Plano Z-Y

Plano Z-Y Dureza (Shore D)					
Lote	Probeta	Plano	Resultado	Promedio	Desviación Estándar
Fabricante	-	-	83 - 86	84.500	2.121
	1		78.000		
HQ (0°)	2	Z-Y	78.400	78.200	0.200
	3		78.200		
	1		79.000		
HQ (45°)	2	Z-Y	78.800	78.533	0.643
	3		77.800		
	1		79.200		
HQ (90°)	2	Z-Y	77.600	78.400	0.800
	3		78.400		

Fuente: Ángela Cárdenas

En la Tabla 4-50, se presenta el resumen análisis ANOVA, para dureza en el plano Z-Y en probetas HQ.

Tabla 4-50 Resumen análisis ANOVA Dureza en el plano Z-Y probetas HQ

RESUMEN ANALISIS ANOVA							
	Fv	GL	SC	CM	Fo	Pc	R ²
Numerador	Dureza plano Z-Y	2	0.169	0.084	0.232	4.250	0.518
Denominador	Error	6	2.187	0.084			
	Total	8	2.356				

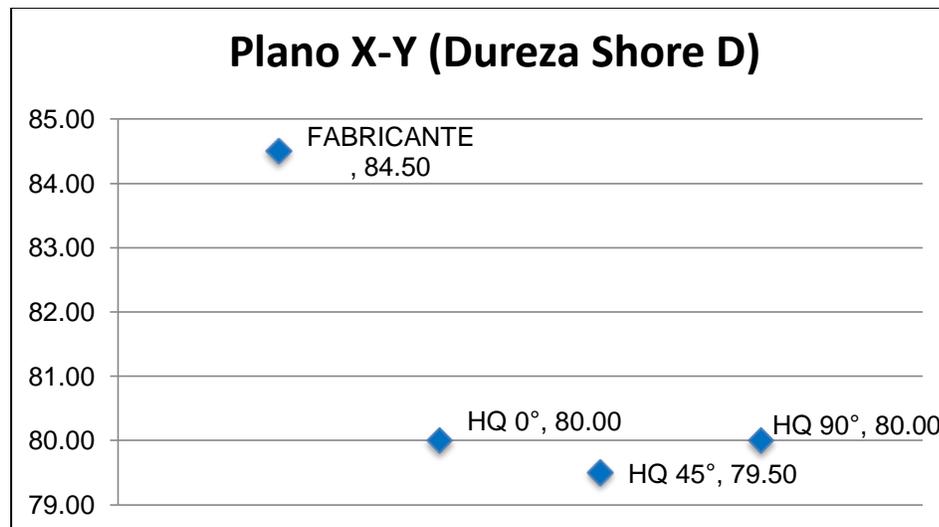
Fuente: Ángela Cárdenas

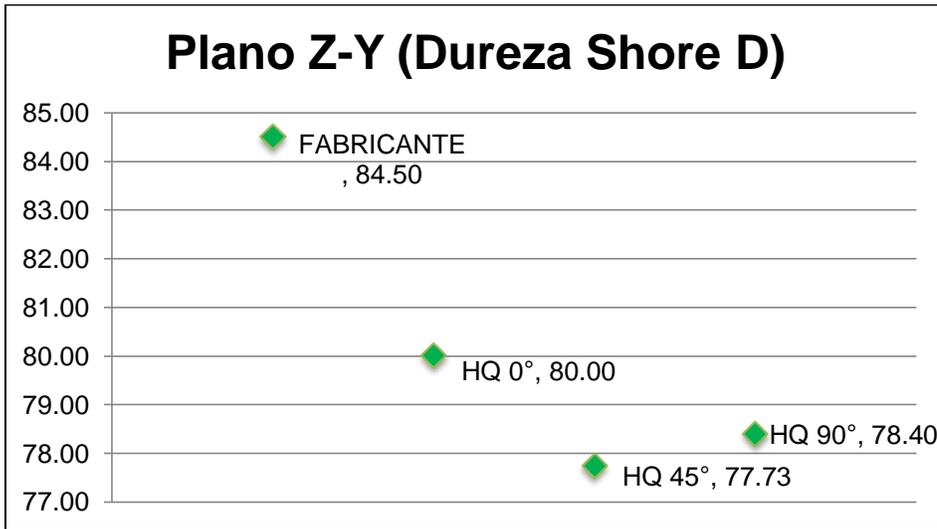
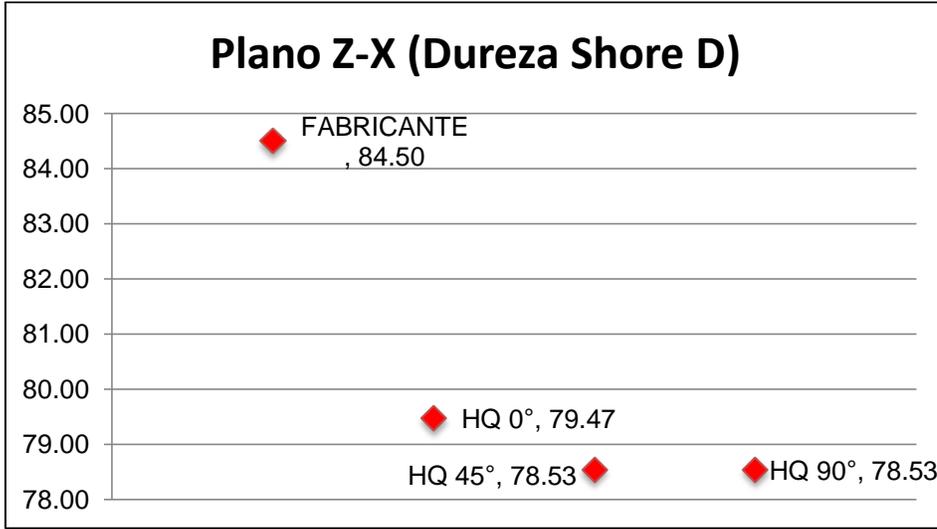
El valor estadístico de contraste calculado $F_o = 0.232$ es menor al punto crítico para el valor F teórica con 2 y 6 grados de libertad, a un nivel de confiabilidad del 95 % es 4.250. Se concluye que a nivel estadístico no ocurren diferencias significativas, pero teniendo en cuenta la media, la probeta HQ 45° en el plano Z-Y aporta los mejores datos.

En la Figura 4-37 representa los valores promedios encontrados para los planos X-Y (Azul), plano Z-X (Rojo) y plano Z-Y (Verde) a comparación del dado por el fabricante, el valor más alto sigue siendo el dato facilitado por el fabricante, sin embargo se observa la misma tendencia de comportamiento que presentó el ensayo de tensión donde el plano X-Y tiene los valores más altos en los extremos y el más bajo en el centro; los planos laterales Z-X y Z-Y sus valores pudieron ser afectados por la construcción capa a capa

de la deposición del material y el movimiento del cabezal de izquierda a derecha, agregando un nuevo elemento que es el indentador, al haber realizado la medición alguna de estas pudo ser entre capas, de igual manera sus valores. El valor más significativo es en las probetas HQ con orientación 45° debido a que dio el mismo valor para los planos laterales Z-X y Z-Y, confirmando los conceptos de que los valores de dureza obtenidos tras la realización de cualquiera de los ensayos proporcionan una orientación acerca de las propiedades mecánicas convencionales de un material, ya que los parámetros de dureza y algunos de los proporcionados por el ensayo de tensión (como el límite elástico, la resistencia a tracción y la ductilidad) están relacionados. Así, se puede considerar de un modo general que los materiales de dureza elevada presentan escasa ductilidad y, a su vez, gran resistencia a la tracción y viceversa [84], lo cual fue hallado también en el ensayo de tensión.

Figura 4-37 Promedio dureza shore D, a) plano X-Y, b) plano Z-X, c) plano Z-Y





Fuente: Ángela Cárdenas

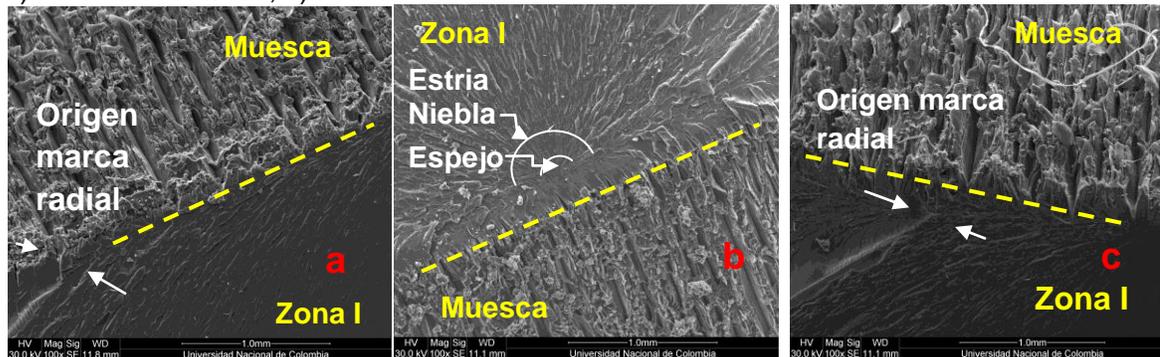
4.5 Características macroscópicas de las superficies de falla

En esta sección se observa de manera muy global algunas de las tomas de imágenes de alta resolución realizadas en el SEM a las probetas de impacto, tensión y así de acuerdo a la teoría demostrar lo encontrado.

En las imágenes de la probeta de impacto se diferencian dos zonas: la zona I es el área de la fractura y la zona de la muesca donde se observan las capas creadas durante el proceso.

En la Figura 4-38 se observan las imágenes tomadas para las probetas de impacto HQ en sus diferentes orientaciones, estas son las que representan mayor absorción de energía.

Figura 4-38 Probetas de impacto con mayor absorción de energía, a) Probeta 3 HQ 0°, b) Probeta 3 HQ 45°, c) Probeta 1 HQ 90°

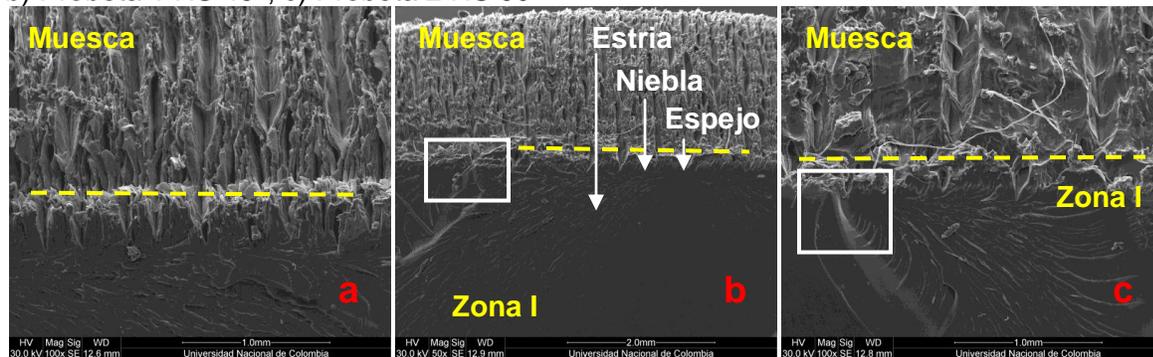


Fuente: Ángela Cárdenas

En la superficie de la fractura de la muestras de impacto de la Figura 4-38 se aprecia en la zona I de la probeta a y c, el origen de la marca radial y alrededor de esta la zona de estrías (hackle) con un movimiento paralelo al origen de la marca radial. En la probeta b se observa la zona de espejo lisa y brillante indicando el origen de la fractura además nos indica la distribución de las tensiones que fueron de forma radial, la zona de niebla está formada por un pequeño arco de aspecto rugoso y tenemos líneas radiales que parten de la zona de niebla (mist) y sigue paralelamente la dirección de la propagación.

En la Figura 4-39 se observan las imágenes tomadas para las probetas de impacto HS en sus diferentes orientaciones, estas son las que representan mayor absorción de energía.

Figura 4-39 Probetas de impacto con mayor absorción de energía, a) Probeta 1 HS 0°, b) Probeta 1 HS 45°, c) Probeta 2 HS 90°

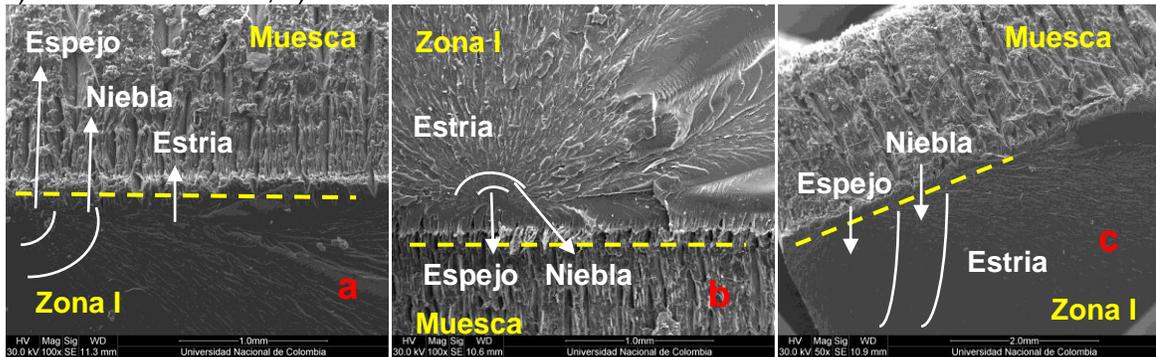


Fuente: Ángela Cárdenas

En la superficie de la fractura de la muestras de impacto de la Figura 4-39 se aprecia en la zona I de la probeta a la zona niebla sigue paralelamente la dirección de propagación de las ondas de fractura, en la probeta c enmarcado en el cuadrante blanco el origen de la marca radial y alrededor de este las marcas de rio en forma conoide. En la probeta b se observa la zona de espejo lisa y brillante indicando el origen de la fractura además nos indica la distribución de las tensiones que fueron de forma radial, la zona de niebla está formada por un pequeño arco de aspecto rugoso y tenemos líneas radiales que parten de la zona de niebla (mist) y sigue paralelamente la dirección de la propagación, observando la sucesión de ondas de fractura que genera desprender fragmentos (ver cuadrante blanco).

En la Figura 4-40 se observan las imágenes tomadas para las probetas de impacto HQ en sus diferentes orientaciones, estas son las que representan menor absorción de energía.

Figura 4-40 Probetas de impacto con menor absorción de energía, a) Probeta 1 HQ 0°, b) Probeta 5 HQ 45°, c) Probeta 5 HQ 90°

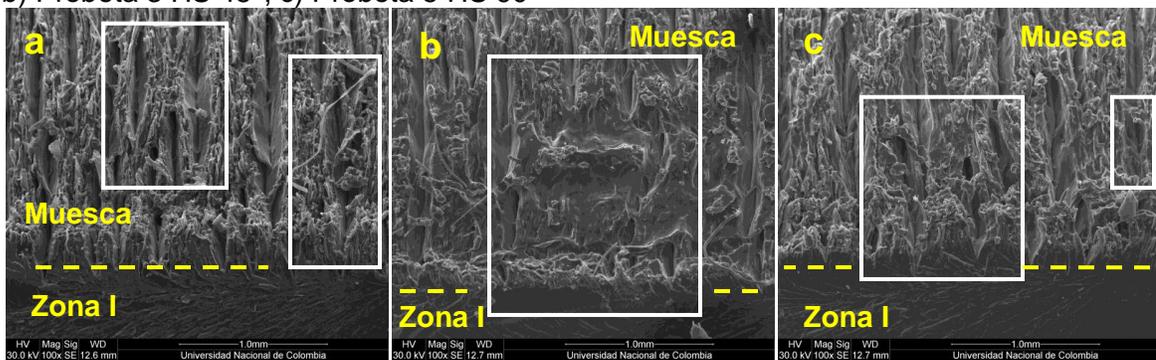


Fuente: Ángela Cárdenas

En la superficie de la fractura de la muestras de impacto de la Figura 4-40 se aprecia en la zona I de la probeta a y c la zona de zona de espejo lisa y brillante indicando el origen de la fractura además nos indica la distribución de las tensiones paralelamente a la dirección de propagación de la zona de niebla. En la probeta b se observa una tensión de rotura elevada, debido a que la zona de niebla y estrías se forman cerca del origen.

En la Figura 4-41 se observan las imágenes tomadas para las probetas de impacto de HS en sus diferentes orientaciones, estas son las que representan menor absorción de energía.

Figura 4-41 Probetas de impacto con menor absorción de energía, a) Probeta 4 HS 0°, b) Probeta 3 HS 45°, c) Probeta 5 HS 90°



Fuente: Ángela Cárdenas

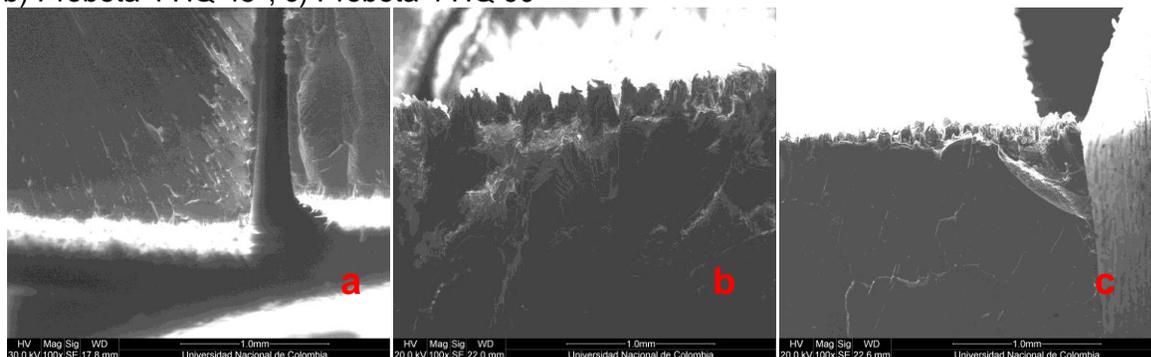
En la superficie de la fractura de la muestras de impacto de la Figura 4-41 se aprecia en la zona I de la probeta a, b y c la zona hackle que sigue paralelamente la dirección de propagación de las ondas de fractura.

Al comparar las imágenes de las probetas HQ que mayor energía vs menor energía, tienen las siguientes características en común:

- La zona de la muesca permite observar las capas creadas en el proceso observando que las probetas impresas en HQ no presentan cambios en las imágenes a comparación de las probetas HS que se puede observar como ocurre la separación y rompimiento de las capas existentes por efecto de las pruebas de impacto.
- En la zona I de las probetas de impacto HQ y HS, se pueden identificar respectivamente la zona de espejo, niebla y estrías las cuales están perfectamente delimitadas. De acuerdo a estas consideraciones la mayor energía absorbida y menor energía absorbida de las probetas es reflejada en la geometría más intensa de la fractura, la cual es influenciada por la calidad de impresión.

En la Figura 4-42 se observan las imágenes probetas de tensión HQ con mayor resistencia a tensión, en sus diferentes orientaciones.

Figura 4-42 Probetas de tensión con mayor resistencia a tensión, a) Probeta 5 HQ 0°, b) Probeta 4 HQ 45°, c) Probeta 4 HQ 90°

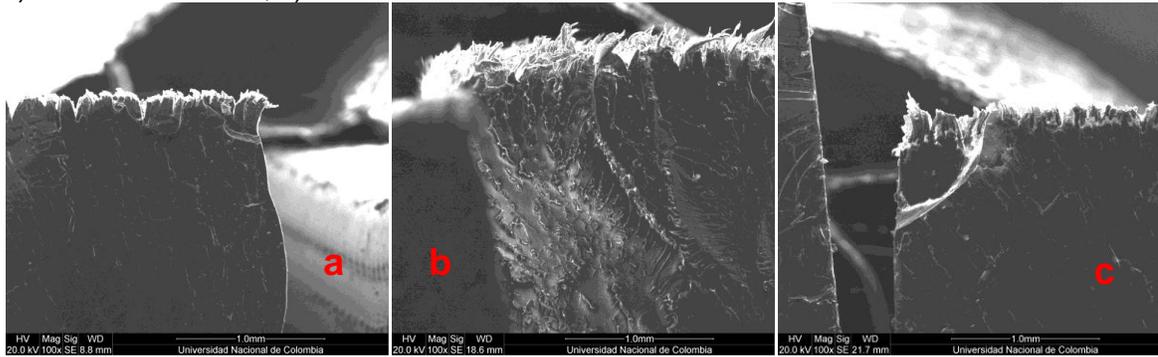


Fuente: Ángela Cárdenas

En la superficie de la fractura de la muestras de impacto de la Figura 4-42 se aprecia en la probeta a, b y c, la zona hackle con desprendimiento de material.

En la Figura 4-43 se observan las imágenes para las probetas de tensión HS con mayor resistencia a tensión en sus diferentes orientaciones, sección transversal.

Figura 4-43 Probetas de tensión con mayor resistencia a tensión, a) Probeta 3 HS 0°, b) Probeta 1 HS 45°, c) Probeta 4 HS 90°

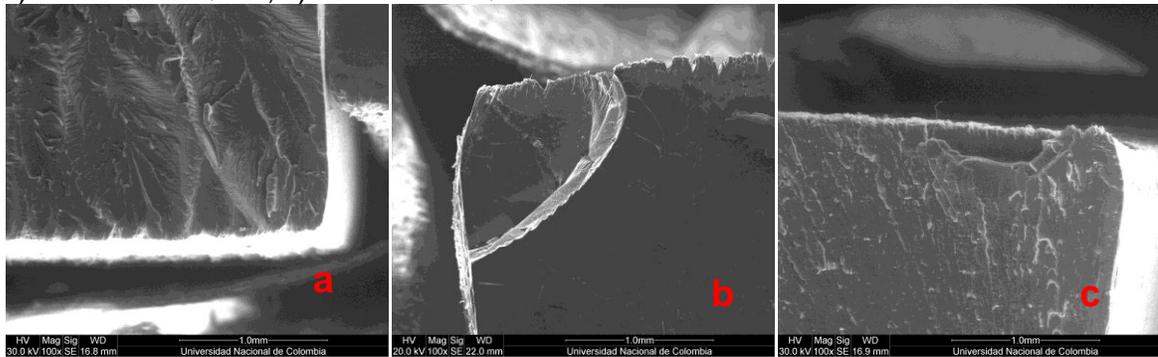


Fuente: Laboratorio SEM

En la superficie de la fractura de la muestras de impacto de la Figura 4-43 se aprecia en la probeta a, b y c, la zona hackle con desprendimiento de material.

En la Figura 4-44 se observan las imágenes para las probetas de tensión HQ con menor resistencia a tensión en sus diferentes orientaciones, sección transversal.

Figura 4-44 Probetas de tensión con menor resistencia a la tensión, a) Probeta 4 HQ 0°, b) Probeta 6 HQ 45°, c) Probeta 5 HQ 90°

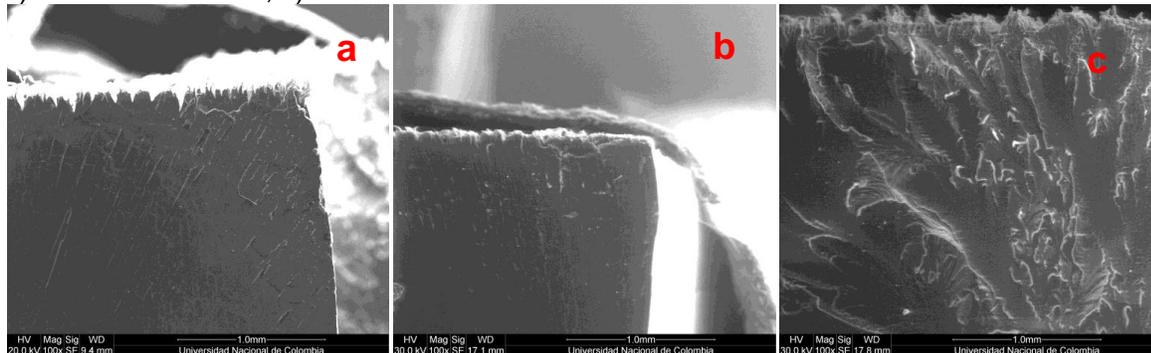


Fuente: Laboratorio SEM

En la superficie de la fractura de la muestras de impacto de la Figura 4-44 se aprecia en la probeta a, b y c, la zona hackle con desprendimiento de material.

En la Figura 4-45 se observan las imágenes para las probetas de tensión HS con menor resistencia a la tensión en sus diferentes orientaciones.

Figura 4-45 Probetas de tensión con menor resistencia a la tensión, a) Probeta 1 HS 0°, b) Probeta 3 HS 45°, c) Probeta 2 HS 90°



Fuente: Laboratorio SEM

En la superficie de la fractura de la muestras de impacto de la Figura 4-42 se aprecia en la probeta a, b y c, la zona hackle con desprendimiento de material.

4.6 Fabricación de prototipo industrial

Actualmente la creación de prototipos busca piezas con topología morfológica especial como lo es un gripper el cual es un sistema electromecánico utilizado principalmente para la sujeción de objetos. El gripper del presente trabajo será acoplado al robot Motoman LabFabEx – Unal, ver Figura 4-56), su mecanismo básico es de cuatro barras conectadas por articulaciones como generador de trayectoria para sostener un objeto, el mecanismo es una secuencia cerrada de barras conectadas por articulaciones (acoples). Este mecanismo se emplea para transmitir la fuerza.

4.6.1 Desarrollo del gripper

Para el análisis de las fuerzas actuantes en el mecanismo de cuatro barras se realiza un diagrama de fuerzas para cada articulación. La fuerza ejercida por el motor al mecanismo se denomina F_m y se divide en dos fuerzas, ya que el mecanismo es simétrico. La dirección de la fuerza se muestra en la Figura 4-46, de esta forma la pieza 2, siempre tendrá un movimiento vertical, que al acoplarse con la pieza cuatro transmitirá una fuerza por medio de la articulación, que se representa en la Ecuación (4.4).

$$F_1 = \frac{F_p}{\cos \theta} \quad (4.4)$$

La fuerza horizontal que es transferida de la pieza cuatro a la pieza tres se muestra en la Ecuación (4.5). En esta articulación se observa que la fuerza sobre la pieza no solo depende del motor, sino del ángulo en la pieza tres.

$$F_p = \frac{F_m}{2} \cos\theta \quad (4.5)$$

La pieza tres siempre será la pieza final para poder sujetar algún objeto, la Ecuación (4.5) muestra el cálculo de la fuerza horizontal que será transmitida a esta pieza, pero esta fuerza no será la final, ya que la fuerza ejercida en la pieza tres se encuentra a una distancia diferente a la fuerza con que se sujetan las piezas. Para calcularlo se aplica la tercera ley de Newton, de la cual se puede decir que la suma de los momentos en la pieza tres es igual a cero y se representa en la Ecuación (4.6). Reemplazando esta ecuación, cada momento por la fuerza aplicada y su respectivo desplazamiento, se obtiene la Ecuación (4.7).

$$M_p = -M_t \quad (4.6)$$

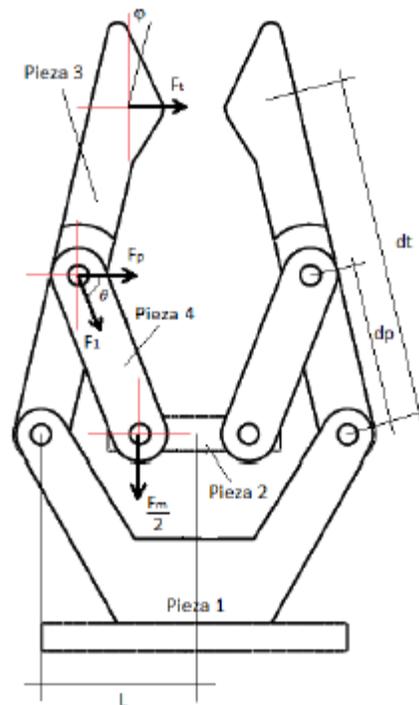
$$F_p d_p = -F_t d_t \quad (4.7)$$

Teniendo en cuenta el diagrama de fuerzas representado en la Figura 4-46, la fuerza de sujeción que ejerce el gripper partiendo desde la fuerza aplicada del motor se obtiene la Ecuación (4.8).

$$F_t = \frac{F_m d_p \cos\theta}{2d_t} \quad (4.8)$$

Conociendo esta fuerza y utilizando todos los parámetros de diseño del gripper, podemos calcular la fuerza final con que el gripper sujeta la pieza usando la Ecuación (4.8). La fuerza final de sujeción es de 1.2 Kgf, esto para situaciones ideales. De acuerdo a los datos calculados se utilizó un Micro Servo 9g SG90 TowerPro con un Torque: 1.8 Kg – cm.

Figura 4-46 Diagrama de fuerzas gripper



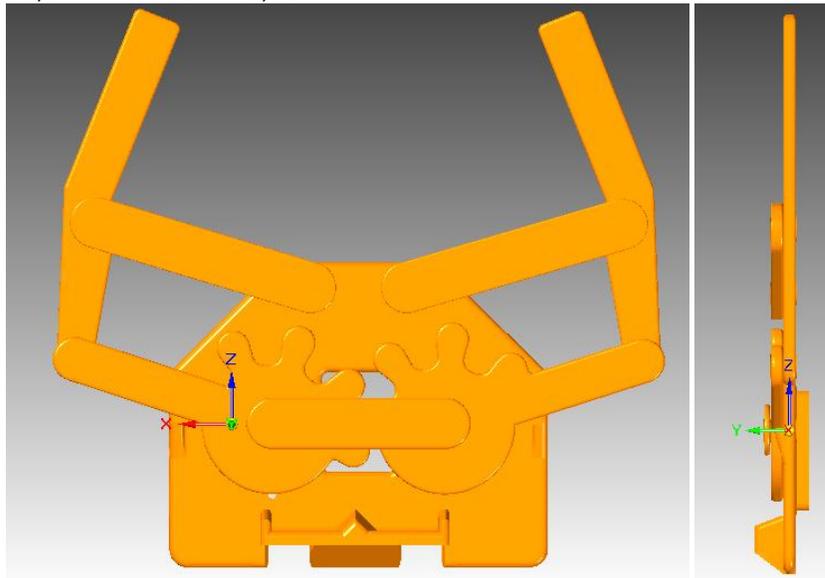
Fuente: Ángela Cárdenas

Como se necesita una técnica directa para fabricar modelos de plástico que se adecue a la fabricación del gripper, se utilizara la siguiente información, ver Capítulo 1:

- **Entrada:** Se seleccionara el programa CAD (Solid Edge ST6) para describir el objeto en nuestro caso: "gripper" de robot para ensamblaje, donde se necesita fabricar un gripper y su conexión respectiva al Motoman para que el prototipo sea estructurado para la minifábrica.
- **Método:** el empleado de 3D printing a usar es el usado por la impresora Stratasys Objet Eden 260V que es sistema Polyjet.
- **Material:** El material que usa esta impresora son resinas ftopoliméricas en estado liquido que se curan respectivamente con luz UV.
- **Aplicación:** se encuentra incluida en el grupo (3) Fabricación y herramientas: donde se busca una aplicación de una pieza a pequeña escala.

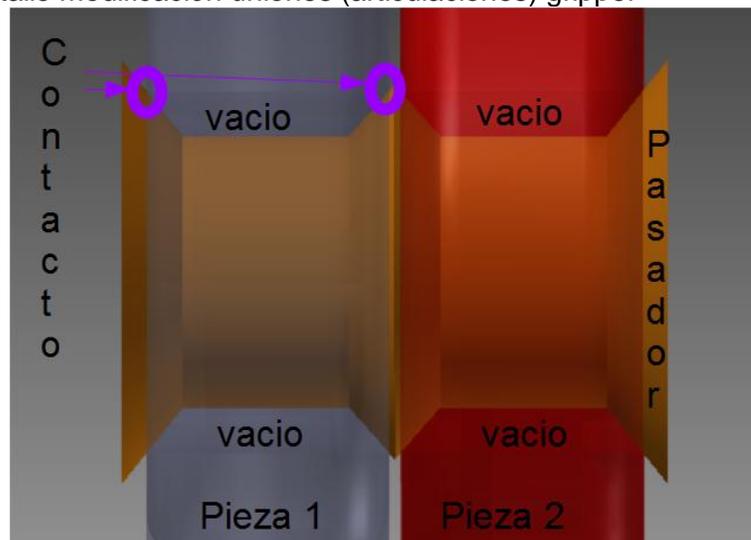
Para describir nuestro objeto que es básicamente la etapa de entrada o sea el modelamiento de la pieza, se utilizó el software Solid Edge ST6 donde se ejecutó el modelo del prototipo del gripper, Figura 4-47 y Figura 4-48.

Figura 4-47 Vista frontal y lateral del gripper ensamblado antes de su impresión, tamaño de la pieza 153,07 x 167.53 x 18,05 mm



Fuente: Ángela Cárdenas

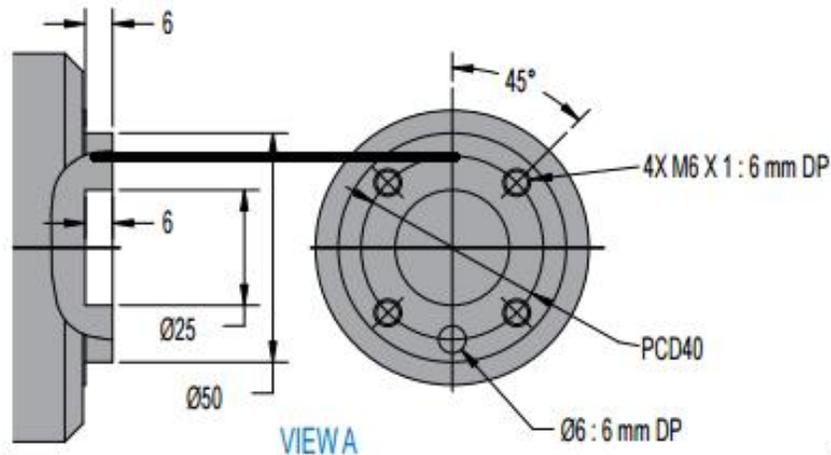
Figura 4-48 Detalle modificación uniones (articulaciones) gripper



Fuente: Ángela Cárdenas

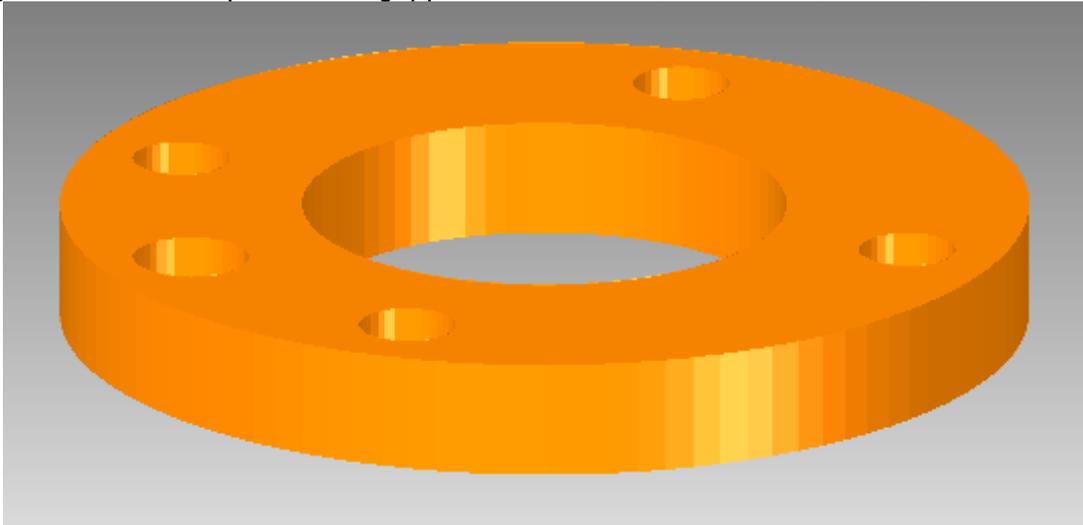
Adicionalmente se hizo el modelo del plato adaptador del gripper al robot Motoman, Figura 4-49 y 4-50, el Motoman se ha identificado como uno de los componentes del laboratorio fabrica experimental LabFabEx.

Figura 4-49 Plato robot Motoman



Fuente: Ángela Cárdenas

Figura 4-50 Modelo plato unión gripper con Motoman, tamaño: 49,99 x 49,99 x 6 mm



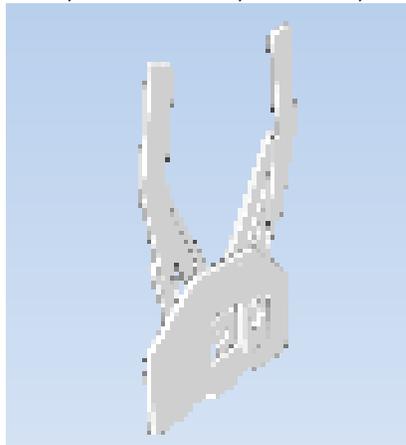
Fuente: Ángela Cárdenas

Se evaluaron los materiales ofrecidos por el fabricante basado en la bibliografía suministrada por él, teniendo en cuenta propiedades físicas y mecánicas. Se eligió como material de impresión el VeroBlue RGD840, a este material se le realizaron pruebas de tensión según la norma ASTM D638 probetas tipo IV, radiación UV con tiempo máximo de 96 horas según la norma ASTM D5208 radiación UV y prueba de impacto Izod con

muesca según la norma ASTM D256-06. Los parámetros seleccionados para la impresión se muestran a continuación:

- Material: VeroBlue RGD840 por tener mayor tenacidad.
- Acabado: Matte (opaco)
- High quality (HQ): resolución 16 micras.
- Orientaciones: 0°, 45° y 90° en la bandeja de construcción
- Escala 1:2 con respecto al modelo original, Figura 4-51.

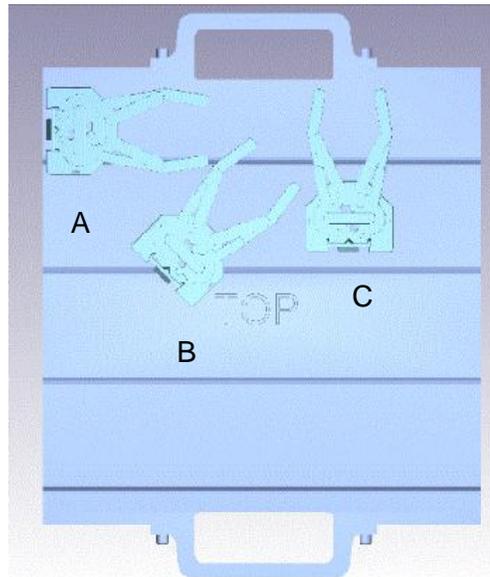
Figura 4-51 Minigripper modelado, tamaño 105,735 x 82,118 x 7,065 mm



Fuente: Ángela Cárdenas

Se imprimió un lote de minigripper Figura 4-52, al cual se le ejecutaron pruebas de tensión en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, el equipo utilizado fue la maquina universal de ensayos Referencia AG-IS 5KN Marca SHIMADZU (Ver Figura 4-53).

Figura 4-52 Lote de minigripper con sus respectivas orientaciones en la bandeja de construcción



Fuente: Ángela Cárdenas

Figura 4-53 Pruebas de tensión para los minigrippers



Fuente: Ángela Cárdenas

Obteniendo los siguientes resultados, (Ver Tabla 4-51). En donde los datos obtenidos en la prueba de tensión para los minigrippers al ser comparado con los datos investigados en el numeral 4.4.1 Tensión confirma que la mejor orientación de impresión es de 45° en donde la resistencia mecánica es más alta a comparación de la dada por nuestro

fabricante que es de 50-60 MPa. Los resultados obtenidos de resistencia máxima y desplazamiento máximo en el minigripper son parámetros para determinar la carga de las piezas que él puede transportar y los cambios posibles de posición al estar cargado. Estos dos últimos factores permiten integrar el gripper al sistema Motoman.

Tabla 4-51 Resultados pruebas tensión minigripper

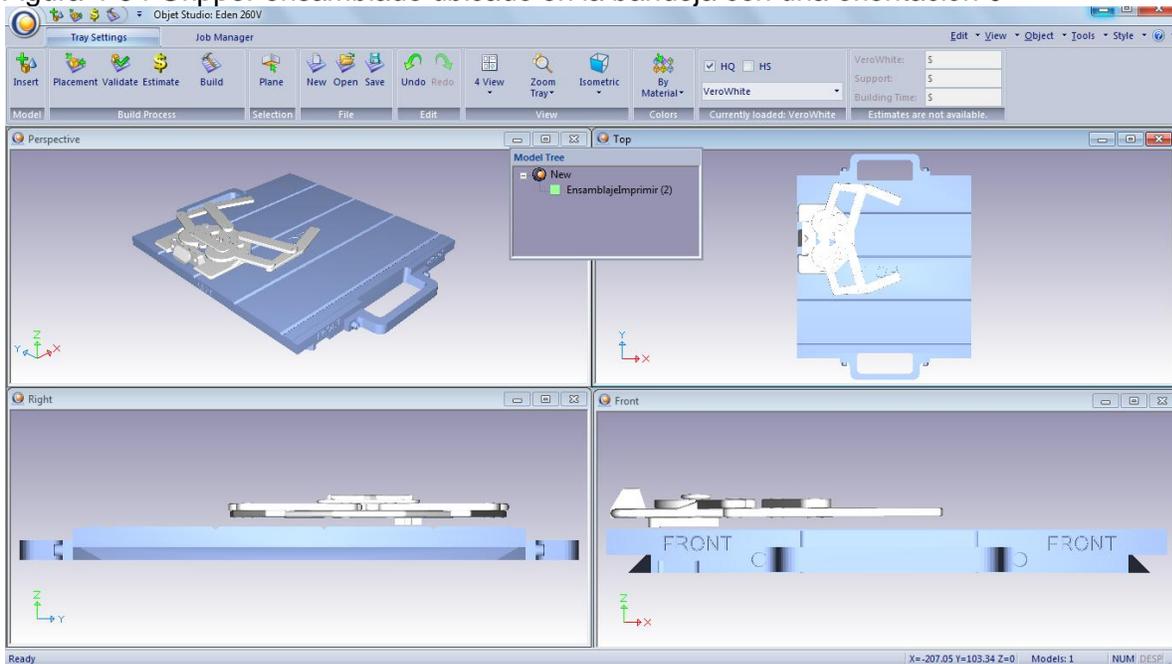
Muestra (Figura 10)	Máxima fuerza (N)	Máximo Alargamiento (mm)
A (0°)	55,34	6,06
B (45°)	83,00	2,12
C (90°)	38,75	3,29

Fuente: Ángela Cárdenas

Una vez realizada las pruebas al material, se concluye que tiene las propiedades adecuadas para fabricar el gripper y características anisotrópicas dadas por el proceso Polyjet. Para verificar su funcionalidad del gripper, se delimitara la prueba de impresión, seleccionado estos parámetros:

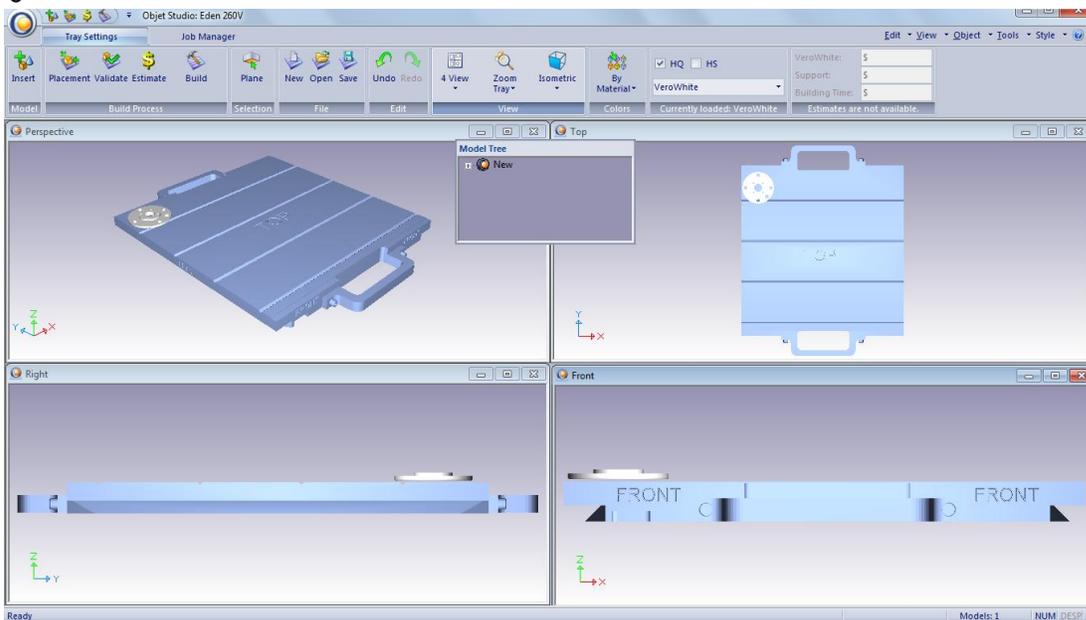
- Material: VeroClear RGD810, se selecciono este material el cual pertenece a la familia de rígidos y opacos, el cual nos permitió visualizar la pieza ensamblada y funcionando en color transparente, (Ver Figura 4-54, Figura 4- 55), ya que ninguna de sus uniones es metálica.
- Acabado: Matte (opaco)
- High quality (HQ): resolución 16 micras.
- Orientaciones: 0° en la bandeja de construcción

Figura 4-54 Gripper ensamblado ubicado en la bandeja con una orientación 0°



Fuente: Ángela Cárdenas

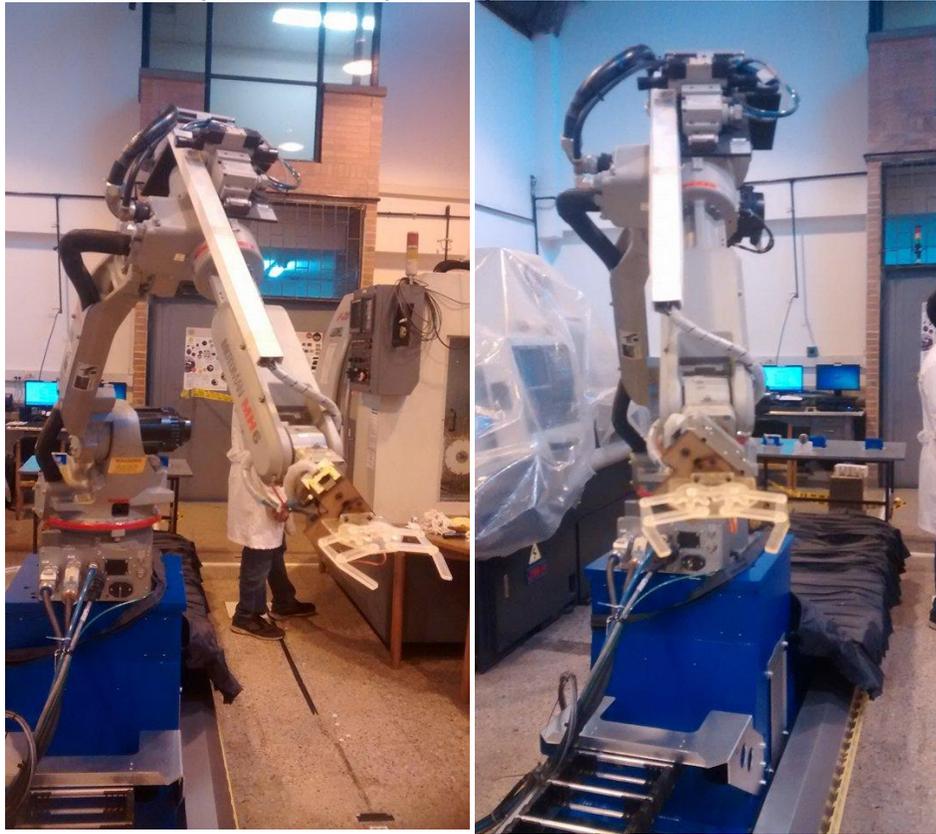
Figura 4-55 Plato unión gripper con Motoman ubicado en la bandeja con una orientación de 0°



Fuente: Ángela Cárdenas

Después de impreso el gripper y plato de unión para ser ensamblado. Verificar su funcionalidad de forma manual y por medio de un diseño electrónico con programación en andruino (robot Motoman, Figura 4-56). Para más detalles (ver Anexo E).

Figura 4-56 Ensamble robot Motoman con gripper, verificando su diseño electrónico con su programación en los procesos de apertura y cierre.



Fuente: LabFabEx

Después de obtener resultados satisfactorios en su ensamble y respectivos movimientos, se recomienda a futuro integrar ejecutar la programación interfase de robot Motoman a Gripper.

148 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

1. Se alcanzó satisfactoriamente la adaptación tecnológica del equipo en el Laboratorio Fábrica Experimental LabFabEx Sala CAM – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; y esto permitió el conocimiento de sus variables más significativas las cuales permiten realizar la impresión de buenos prototipos teniendo en cuenta que esta tecnología no es tan accesible en el mercado por su alta inversión económica.
2. El proceso Polyjet tiene sus ventajas y sus desventajas, el usuario puede elegir exactamente qué desea, las ventajas encontradas es que es un proceso flexible el cual permite: a) Elegir entre dos espesores de capa (calidad), b) Entre dos tipos de acabado, c) Elegir entre diversos materiales según su aplicación, d) Seleccionar la orientación adecuada para la impresión de los prototipos, e) Elegir entre los estilos de cuadrícula del material del soporte de acuerdo a su aplicación; entre sus desventajas: a) Las limitantes del tamaño neto de la construcción de los prototipos. Así mismo hay condiciones constantes del proceso como: a) la intensidad lumínica de las lámparas UV para la fotopolimerización del material, b) la velocidad del cabezal de inyección, c) la cantidad de material de construcción y soporte aplicado por cada inyector.
3. En la identificación del polímero, el análisis térmico (DSC) y el análisis óptico (IR, IR-ATR) del material nos permitió encontrar que el componente principal en la fórmula del VeroBlue RGD840 es el metacrilato o metil metacrilato, donde se identificaron adecuadamente las temperaturas de transición y degradación.
4. Los ensayos usados en la identificación del polímero no proporcionan información de su estructura molecular. Por lo cual no es posible medir los grados de polimerización y estos datos no son concluyentes para evaluar la anisotropía molecular del polímero.

5. En la metrología dimensional, se refleja una buena calidad dimensional y la existencia de anisotropía se ve reflejada en los valores de rugosidad más no en los de control dimensional.
6. Las muestras presentaron simetría ortorrómbica, es decir, muestran tres planos de simetría perpendiculares entre sí.
7. Se encontraron diferencias en la magnitud de las propiedades mecánicas obtenidas al modificar en la bandeja de impresión la orientación de los prototipos y en la calidad. Tanto la resistencia a la tensión como la energía absorbida fueron mayores para la los prototipos fabricados a 45° HQ.
8. Al modificar la orientación de los prototipos en la bandeja para su impresión, los resultados de los ensayos presentan diferentes valores, por lo tanto se confirma que la pieza es anisotrópico debido a que de su orientación depende el resultado y esta características es observada en casi todas las tecnologías de fabricación aditiva [59].
9. Las características macroscópicas de las superficies de falla, describen similitudes en sus superficies; para la muestras de impacto se observa que zona de espejo, niebla y estrías, permitiendo establecer que son resultado de tensiones elevadas. Para las muestras de tensión sus superficies presentan en su zona hackle con desprendimiento del material.
10. Se manufacturo el prototipo industrial “Gripper” que es un adaptador del equipo Motoman hace parte del Laboratorio LabFabEx – Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. En donde las variables de fabricación para el prototipo se basaron en los resultados obtenidos de los ensayos, la impresión recomendada es HQ 45°.

5.2 Recomendaciones

1. Ejecutar métodos de caracterización para el polímero: sobre la estructura del polímero en la orientación en su región cristalina utilizando Difracción de Rayos X; Resonancia Magnética Nuclear (RMN) para conocer específicamente esta estructura y los porcentajes de su composición y Calorimetría Diferencial Térmica (DTA) para hallar su temperatura de cristalización.
2. La preparación de los prototipos para la toma de imágenes en alta resolución se recomienda para mejores resultados su recubrimiento en oro, debido a que el recubrimiento en grafito puede existir una acumulación de carga sobre la superficie;

Esta acumulación produce una zona de carga espacial que deflecta el haz incidente produciendo zonas blancas excesivamente brillantes durante la observación y esto dificulta la interpretación de las imágenes.

A. Anexo: Estudio R&R por métodos de promedios y rangos

Los criterios exhibidos de repetibilidad, reproducibilidad junto al método de promedios y rangos están basados en la norma técnica NTC-ISO/IEC 17025 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”⁵, para homologar la repetibilidad y la reproducibilidad, este método permite descomponer la variabilidad del sistema en dos componentes independientes. Para realizar el análisis por este método se siguen los siguientes pasos:

1. Se determinan los equipos que se desean utilizar, el número de usuarios y el número de ensayos que debe efectuar cada uno de ellos.
2. Cada usuario realiza los ensayos correspondientes de cada equipo y consigna los resultados correspondientes en el formato respectivo para su posterior estudio.
3. Los usuarios repiten las mediciones, pero esta vez en diferente orden y sin observar las mediciones realizadas anteriormente por sus compañeros.
4. Con los datos del formato se procede a calcular el rango de cada parte del equipo por medio de la Ecuación (1).

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad (1)$$

5. Se calcula el rango promedio de cada usuario utilizando la Ecuación (2).

⁵ Luis Enrique Llamosa R, Luis G. Meza Contreras, Marcela Botero Arbeláez Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTC-ISO/IEC 17025 Scientia Et Technica, vol. XIII, núm. 35, agosto, 2007, pp. 455-460, Universidad Tecnológica de Pereira Colombia

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (2)$$

Donde:

n: es el número de mediciones realizadas por cada usuario.

6. Se calcula el rango promedio de todos los rangos por medio de la Ecuación (3).

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{R}_i \quad (3)$$

Donde:

m: es el número de usuarios y \bar{R}_i es el rango promedio de cada usuario.

7. Se calcula el porcentaje de repetibilidad de las mediciones utilizando la Ecuación (4).

$$\% \text{Repetibilidad} = \frac{K_1 * \bar{\bar{R}}}{T} * 100\% \quad (4)$$

Donde

K_1 : es una constante que depende del número de mediciones realizadas por cada usuario y proporciona un intervalo de confianza del 99% para estas características.

$\bar{\bar{R}}$: es el rango promedio de todos los rangos.

T: es la tolerancia de la característica medida, en esta caso del equipo ensayado.

Nota: los valores de K_1 se encuentran en la tabla 1.

8. Se calcula la medición promedio de cada usuario utilizando la Ecuación (5).

$$\bar{X}_i = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5)$$

Donde:

n: es el número de ensayos por usuario, r es el número de partes y x_i es cada una de las medidas del operador.

9. Se calcula la diferencia entre el promedio mayor y el promedio menor de los operadores por medio de la Ecuación (6).

$$\bar{X}_D = X_{imax} - X_{imin} \quad (6)$$

10. Se calcula el porcentaje de la reproducibilidad por medio de la Ecuación (7)

$$\%Reproducibilidad = \frac{\sqrt{(K_2 \cdot \bar{X}_D)^2 - \frac{(K_1 \bar{R})^2}{nr}}}{T} * 100\% \quad (7)$$

Donde:

K_2 : es una constante que depende del número de operadores y proporciona un intervalo de confianza del 99% para estas características.

\bar{X}_D : es la diferencia entre el promedio mayor y el promedio menor de los usuarios.

n .: es el número de ensayos por usuario.

r .: es el número de partes medidas.

T : es la tolerancia de la característica medida, en este caso del equipo ensayado.

Notas: los valores de K_2 se encuentran en la tabla 1 y si el valor dentro de la raíz es un número negativo, el valor de la reproducibilidad se considera como cero.

Tabla 1. Valores de las constantes K_1 y K_2

Número de ensayos	2	3	4	5
K_1	4.56	3.05	2.50	2.21
Número de operadores	2	3	4	5
K_2	3.65	2.70	2.30	2.08

11. Se calcula el porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad mediante la Ecuación (8)

$$\%R\&R = \sqrt{(\%Repetibilidad)^2 + (\%Reproducibilidad)^2} \quad (8)$$

12. Se interpretan los resultados obtenidos por medio de los siguientes criterios:

- Si $\%R\&R < 10\%$ el sistema de medición es aceptable.

- Si $10\% \leq \%R\&R < 30\%$ el sistema de medición puede ser aceptable según su uso, aplicación, costo del instrumento de medición, costo de reparación.
- Si $\%R\&R > 30\%$ el sistema de medición es considerado como no aceptable y requiere de mejoras en cuanto al operador, equipo, método, condiciones, etc.

Después de analizar la información que resulta del estudio de respetabilidad y reproducibilidad, es posible evaluar las causas que originan la variación del sistema o instrumento:

- Si la repetibilidad es mayor a la reproducibilidad las posibles causas son: el instrumento necesita mantenimiento, el equipo requiere ser diseñado para ser más rígido, el montaje o ubicación donde se efectúan las mediciones necesita ser mejorado y/o existe una variabilidad excesiva entre las partes.
- Si la reproducibilidad es mayor a la repetibilidad, las causas pueden ser: el usuario necesita mejor entrenamiento en cómo utilizar y como leer el instrumento, la indicación del instrumento no es clara. No se han mantenido condiciones de reproducibilidad (ambientales, montajes, ruidos, etc.) y/o el instrumento de medición presenta deriva.

A continuación se presenta el resultado de los cálculos R&R obtenidos

CUBO S1			
Probeta 1			
Ancho			
R. PROM =	0.122	X. PROM =	0.114
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	2.696	%REPRODUCIBILIDAD	4.073
%R&R =	4.884		
Largo			
R. PROM =	0.020	X. PROM =	0.008
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.442	%REPRODUCIBILIDAD	0.256
%R&R =	0.511		
Alto			
R. PROM =	0.021	X. PROM =	0.007
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.464	%REPRODUCIBILIDAD	0.209
%R&R =	0.509		

Probeta 2			
Ancho			
R. PROM =	0.020	X. PROM =	0.004
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.442	%REPRODUCIBILIDAD	0.042
%R&R =	0.444		
Largo			
R. PROM =	0.020	X. PROM =	0.010
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.442	%REPRODUCIBILIDAD	0.337
%R&R =	0.556		
Alto			
R. PROM =	0.021	X. PROM =	0.009
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.464	%REPRODUCIBILIDAD	0.294
%R&R =	0.549		
CUBO R1			
Probeta 1			
Ancho			
R. PROM =	0.091	X. PROM =	0.091
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	2.011	%REPRODUCIBILIDAD	3.260
%R&R =	3.830		
Largo			
R. PROM =	0.005	X. PROM =	0.005
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.111	%REPRODUCIBILIDAD	0.179
%R&R =	0.210		
Alto			
R. PROM =	0.024	X. PROM =	0.008
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.530	%REPRODUCIBILIDAD	0.239
%R&R =	0.582		
Probeta 2			
Ancho			
R. PROM =	0.005	X. PROM =	0.001
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.110	%REPRODUCIBILIDAD	0.011
%R&R =	0.111		
Largo			
R. PROM =	0.008	X. PROM =	0.002
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.177	%REPRODUCIBILIDAD	0.047
%R&R =	0.183		
Alto			
R. PROM =	0.026	X. PROM =	0.007
K1 =	2.21	K2 =	3.65

%REPETIBILIDAD	0.578	%REPRODUCIBILIDAD	0.178
%R&R =	0.605		

CUBO S2			
Probeta 1			

Ancho			
R. PROM =	0.006	X. PROM =	0.002
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.133	%REPRODUCIBILIDAD	0.060
%R&R =	0.145		

Largo			
R. PROM =	0.030	X. PROM =	0.008
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.663	%REPRODUCIBILIDAD	0.203
%R&R =	0.693		

Alto			
R. PROM =	0.009	X. PROM =	0.003
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.199	%REPRODUCIBILIDAD	0.090
%R&R =	0.218		

Probeta 2			
------------------	--	--	--

Ancho			
R. PROM =	0.007	X. PROM =	0.003
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.155	%REPRODUCIBILIDAD	0.098
%R&R =	0.183		

Largo			
R. PROM =	0.014	X. PROM =	0.004
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.309	%REPRODUCIBILIDAD	0.108
%R&R =	0.328		

Alto			
R. PROM =	0.021	X. PROM =	0.009
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.464	%REPRODUCIBILIDAD	0.294
%R&R =	0.549		

CUBO R2			
Probeta 1			

Ancho			
R. PROM =	0.018	X. PROM =	0.030
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.398	%REPRODUCIBILIDAD	1.088
%R&R =	1.158		

Largo			
R. PROM =	0.026	X. PROM =	0.024
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.575	%REPRODUCIBILIDAD	0.857
%R&R =	1.032		
Alto			
R. PROM =	0.028	X. PROM =	0.006
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.619	%REPRODUCIBILIDAD	0.098
%R&R =	0.627		
Probeta 2			
Ancho			
R. PROM =	0.007	X. PROM =	0.005
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.147	%REPRODUCIBILIDAD	0.176
%R&R =	0.230		
Largo			
R. PROM =	0.028	X. PROM =	0.010
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.626	%REPRODUCIBILIDAD	0.307
%R&R =	0.697		
Alto			
R. PROM =	0.033	X. PROM =	0.008
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.737	%REPRODUCIBILIDAD	0.144
%R&R =	0.751		

RECTANGULO S1			
Probeta 1			
Ancho			
R. PROM =	0.020	X. PROM =	0.004
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.442	%REPRODUCIBILIDAD	0.042
%R&R =	0.444		
Largo			
R. PROM =	0.016	X. PROM =	0.005
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.361	%REPRODUCIBILIDAD	0.142
%R&R =	0.388		
Alto			
R. PROM =	0.013	X. PROM =	0.003
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.287	%REPRODUCIBILIDAD	0.061
%R&R =	0.294		

Probeta 2			
Ancho			
R. PROM =	0.036	X. PROM =	0.008
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.796	%REPRODUCIBILIDAD	0.148
%R&R =	0.809		
Largo			
R. PROM =	0.102	X. PROM =	0.092
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	2.254	%REPRODUCIBILIDAD	3.281
%R&R =	3.981		
Alto			
R. PROM =	0.015	X. PROM =	0.005
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.332	%REPRODUCIBILIDAD	0.149
%R&R =	0.364		

RECTANGULO R1			
Probeta 1			
Ancho			
R. PROM =	0.020	X. PROM =	0.004
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.442	%REPRODUCIBILIDAD	0.042
%R&R =	0.444		
Largo			
R. PROM =	0.014	X. PROM =	0.006
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.309	%REPRODUCIBILIDAD	0.196
%R&R =	0.366		
Alto			
R. PROM =	0.041	X. PROM =	0.017
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.906	%REPRODUCIBILIDAD	0.550
%R&R =	1.060		
Probeta 2			
Ancho			
R. PROM =	0.047	X. PROM =	0.009
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	1.039	%REPRODUCIBILIDAD	0.005
%R&R =	1.039		
Largo			
R. PROM =	0.012	X. PROM =	0.006
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.265	%REPRODUCIBILIDAD	0.202

%R&R =	0.334		
Alto			
R. PROM =	0.016	X. PROM =	0.006
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.354	%REPRODUCIBILIDAD	0.188
%R&R =	0.401		

RECTANGULO S2			
Probeta 1			

Ancho			
R. PROM =	0.041	X. PROM =	0.009
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.906	%REPRODUCIBILIDAD	0.161
%R&R =	0.920		

Largo			
R. PROM =	0.016	X. PROM =	0.006
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.354	%REPRODUCIBILIDAD	0.188
%R&R =	0.401		

Alto			
R. PROM =	0.020	X. PROM =	0.006
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.442	%REPRODUCIBILIDAD	0.169
%R&R =	0.473		

Probeta 2			
------------------	--	--	--

Ancho			
R. PROM =	0.035	X. PROM =	0.007
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.773	%REPRODUCIBILIDAD	0.074
%R&R =	0.777		

Largo			
R. PROM =	0.020	X. PROM =	0.010
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.442	%REPRODUCIBILIDAD	0.337
%R&R =	0.556		

Alto			
R. PROM =	0.018	X. PROM =	0.006
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.398	%REPRODUCIBILIDAD	0.179
%R&R =	0.436		

RECTANGULO R2			
Probeta 1			

Ancho			
R. PROM =	0.042	X. PROM =	0.010
K1 =	2.21	K2 =	3.65

%REPETIBILIDAD	0.928	%REPRODUCIBILIDAD	0.217
%R&R =	0.953		

Largo

R. PROM =	0.022	X. PROM =	0.008
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.486	%REPRODUCIBILIDAD	0.248
%R&R =	0.546		

Alto

R. PROM =	0.014	X. PROM =	0.008
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.309	%REPRODUCIBILIDAD	0.275
%R&R =	0.414		

Probeta 2

Ancho

R. PROM =	0.025	X. PROM =	0.009
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.552	%REPRODUCIBILIDAD	0.278
%R&R =	0.619		

Largo

R. PROM =	0.035	X. PROM =	0.007
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.773	%REPRODUCIBILIDAD	0.074
%R&R =	0.777		

Alto

R. PROM =	0.035	X. PROM =	0.009
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.773	%REPRODUCIBILIDAD	0.219
%R&R =	0.804		

CUBO S4

Probeta 1

Ancho

R. PROM =	0.018	X. PROM =	0.020
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.398	%REPRODUCIBILIDAD	0.719
%R&R =	0.822		

Largo

R. PROM =	0.025	X. PROM =	0.021
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.552	%REPRODUCIBILIDAD	0.746
%R&R =	0.929		

Alto

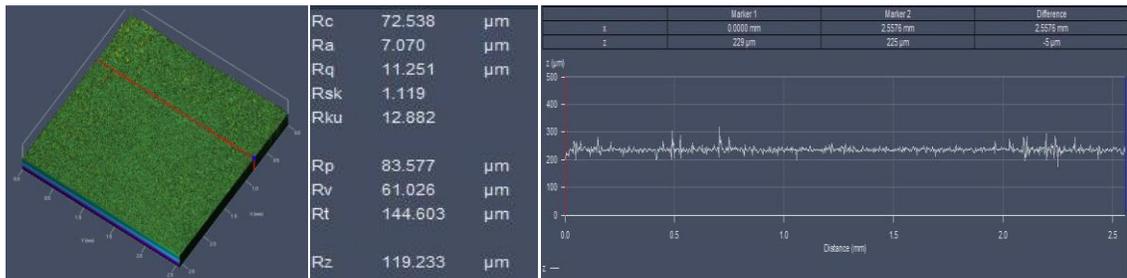
R. PROM =	0.024	X. PROM =	0.006
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.530	%REPRODUCIBILIDAD	0.141

%R&R = 0.549

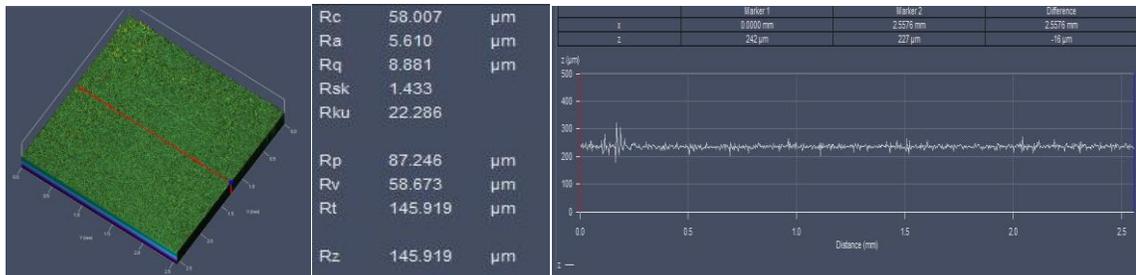
CUBO R4			
Probeta 1			
Ancho			
R. PROM =	0.028	X. PROM =	0.026
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.619	%REPRODUCIBILIDAD	0.929
%R&R =	1.116		
Largo			
R. PROM =	0.027	X. PROM =	0.009
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.597	%REPRODUCIBILIDAD	0.269
%R&R =	0.654		
Alto			
R. PROM =	0.024	X. PROM =	0.014
K1 =	2.21	K2 =	3.65
%REPETIBILIDAD	0.530	%REPRODUCIBILIDAD	0.483
%R&R =	0.717		

B. Anexo: Rugosidad

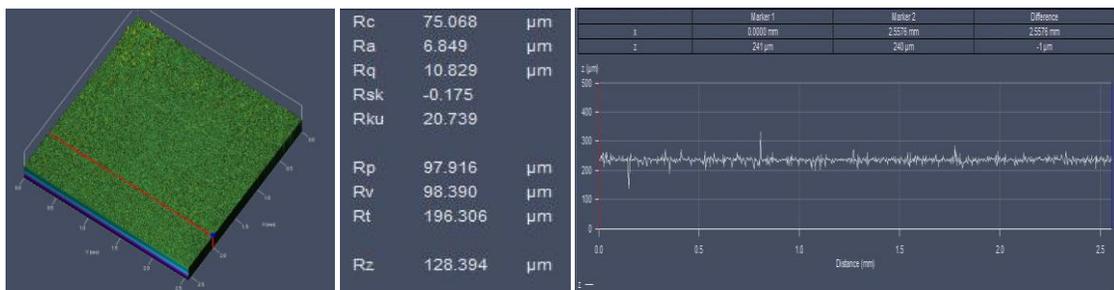
PUNTO A MEDICION 1



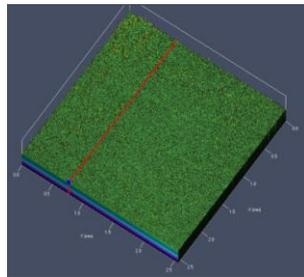
PUNTO 1A MEDICION 2



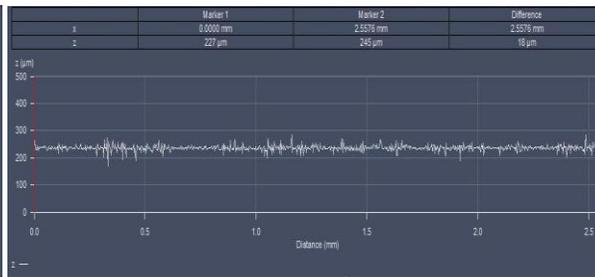
PUNTO 1.A MEDICION 3



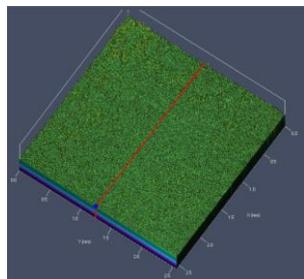
PUNTO 1.A MEDICION 4



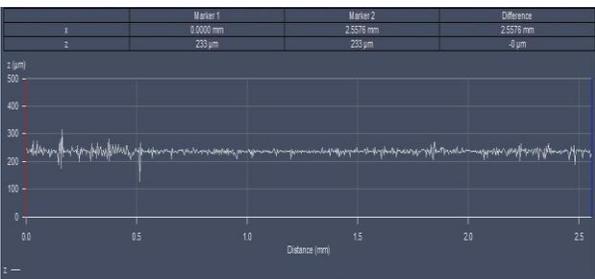
Rc	66.427	μm
Ra	7.314	μm
Rq	10.798	μm
Rsk	-0.346	μm
Rku	7.449	μm
Rp	48.801	μm
Rv	66.241	μm
Rt	115.041	μm
Rz	104.411	μm



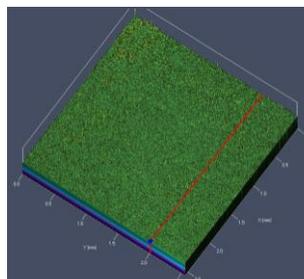
PUNTO 1.A MEDICION 5



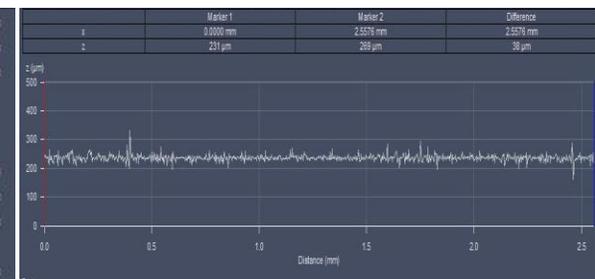
Rc	71.384	μm
Ra	6.762	μm
Rq	11.025	μm
Rsk	-1.043	μm
Rku	20.716	μm
Rp	78.392	μm
Rv	109.728	μm
Rt	188.120	μm
Rz	139.765	μm



PUNTO 1.A MEDICION 6

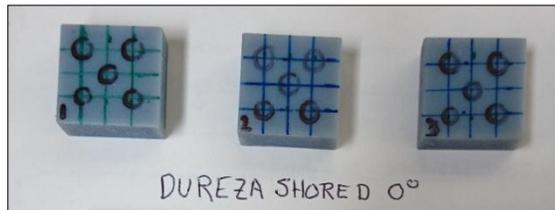


Rc	75.485	μm
Ra	7.899	μm
Rq	11.699	μm
Rsk	0.760	μm
Rku	12.239	μm
Rp	94.995	μm
Rv	73.301	μm
Rt	168.296	μm
Rz	133.517	μm



C. Anexo: Dureza

DATOS OBTENIDOS



HQ 0° Plano X-Y								
PROBETA	MEDICION (SHORE D)					Dureza Shore D	\bar{D}	σ Dureza (D)
	1	2	3	4	5			
1	79	79	78	80	79	79		
2	79	80	80	81	80	80	80	1
3	80	82	82	80	81	81		



HQ 45° Plano X-Y								
PROBETA	MEDICION (SHORE D)					Dureza Shore D	\bar{D}	σ Dureza (D)
	1	2	3	4	5			
1	79	79	80	79	79	79.2		
2	80	79	80	80	79	79.6	79.5	0.2
3	80	79	79	80	80	79.6		



HQ 90° Plano X-Y								
PROBETA	MEDICION (SHORE D)					Dureza Shore D	\bar{D}	σ Dureza (D)
	1	2	3	4	5			
1	80	80	81	80	80	80.2		
2	80	80	80	80	80	80	80	0.2
3	79	80	81	80	79	79.8		



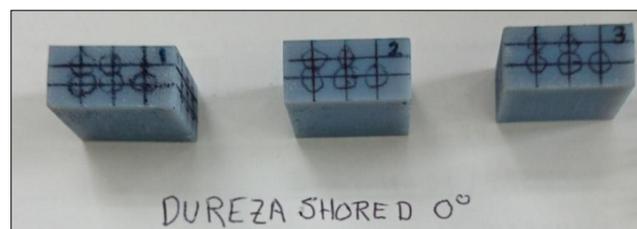
HQ 0° Plano Z-X								
PROBETA	MEDICION (SHORE D)					Dureza Shore D	\bar{D}	σ Dureza (D)
	1	2	3	4	5			
1	79	79	81	79	79	79.4		
2	81	82	81	80	80	80.8	80.07	0.70
3	80	80	82	79	79	80		



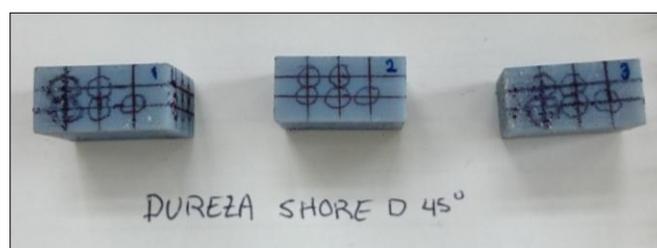
HQ 45° Plano Z-X								
PROBETA	MEDICION (SHORE D)					Dureza Shore D	\bar{D}	σ Dureza (D)
	1	2	3	4	5			
1	77	76	80	79	78	78		
2	78	80	80	80	80	79.6	78.53	0.92
3	77	77	80	77	79	78		



HQ 90° Plano Z-X								
PROBETA	MEDICION (SHORE D)					Dureza Shore D	\bar{D}	σ Dureza (D)
	1	2	3	4	5			
1	79	78	75	78	78	77.6		
2	77	78	79	79	78	78.2	77.73	0.42
3	77	77	77	78	78	77.4		

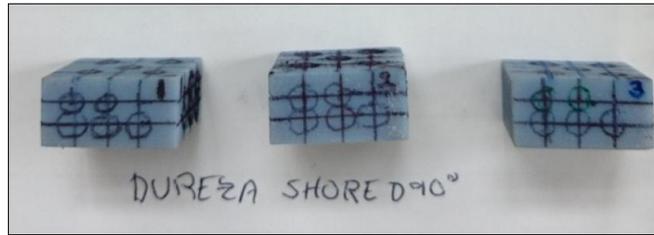


HQ 0° Plano Z-Y								
PROBETA	MEDICION (SHORE D)					Dureza Shore D	\bar{D}	σ Dureza (D)
	1	2	3	4	5			
1	77	79	80	79	75	78		
2	78	81	78	77	78	78.4	78.2	0.2
3	79	78	79	78	77	78.2		



HQ 45° Plano Z-Y								
PROBETA	MEDICION (SHORE D)					Dureza Shore D	\bar{D}	σ Dureza (D)
	1	2	3	4	5			
1	80	77	78	80	80	79		
2	78	79	78	79	80	78.8	78.53	0.64
3	79	74	78	79	79	77.8		

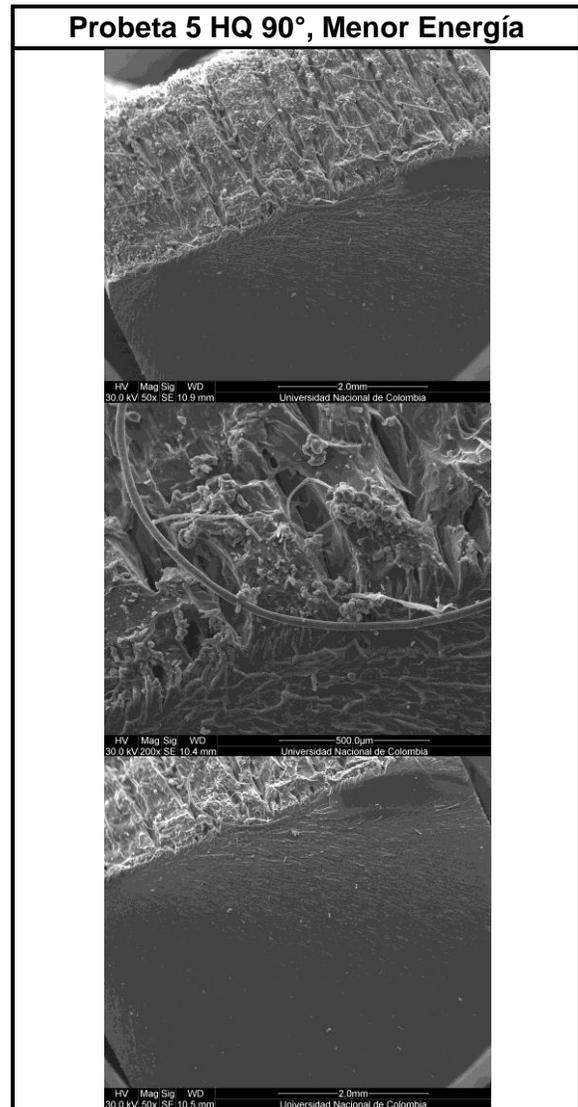
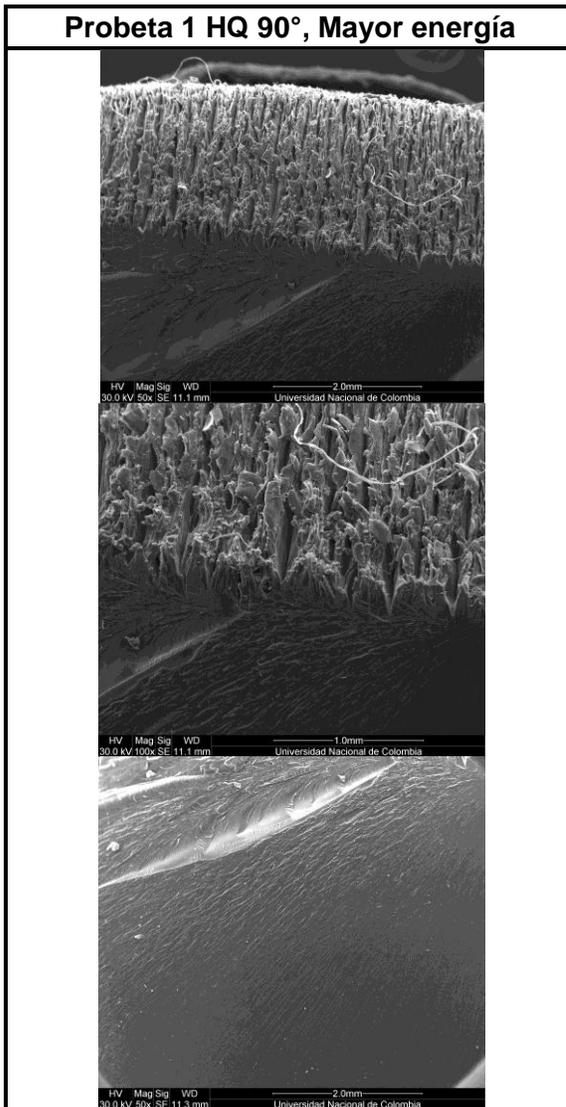
170 Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la maquina Stratasys Eden260V



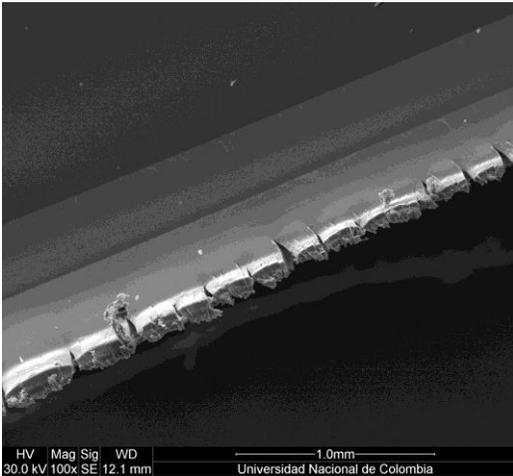
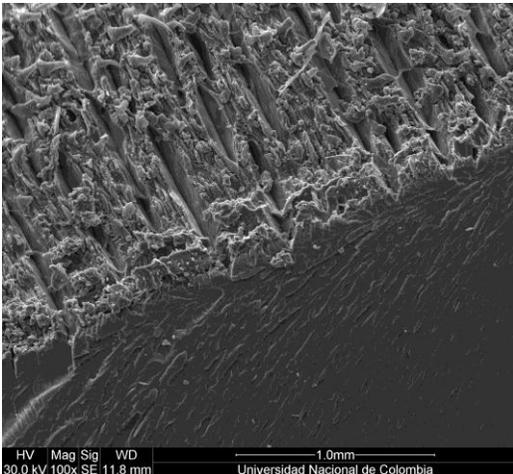
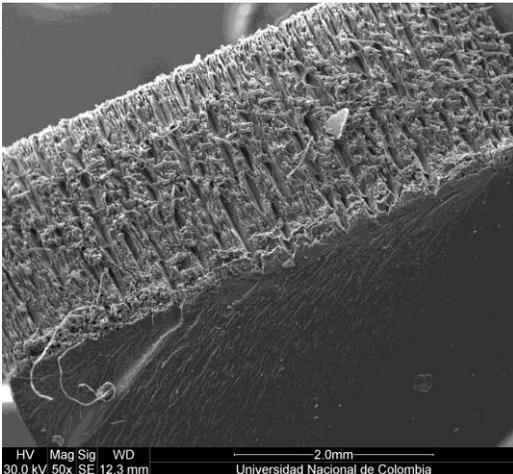
HQ 90° Plano Z-Y								
PROBETA	MEDICION (SHORE D)					Dureza Shore D	\bar{D}	$\sigma_{Dureza (D)}$
	1	2	3	4	5			
1	79	79	80	79	79	79.2		
2	79	80	75	76	78	77.6	78.4	0.8
3	78	78	78	79	79	78.4		

D. Anexo: Características macroscópicas de las superficies de falla

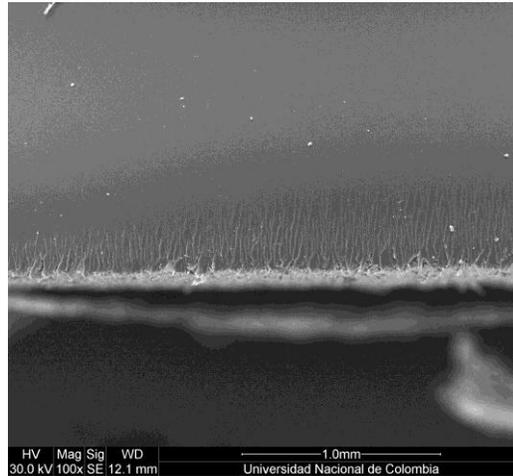
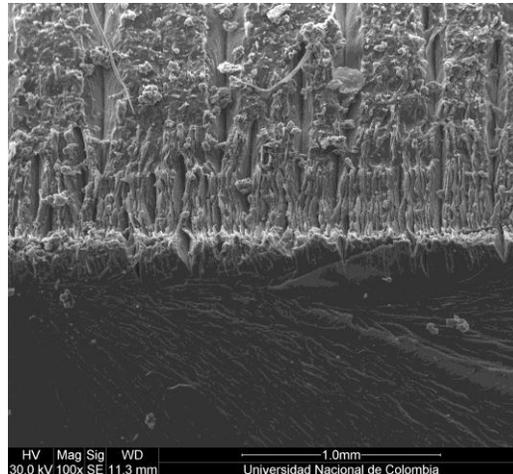
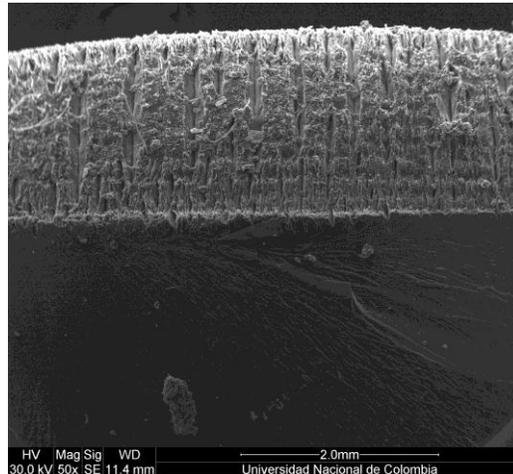
PROBETAS DE IMPACTO

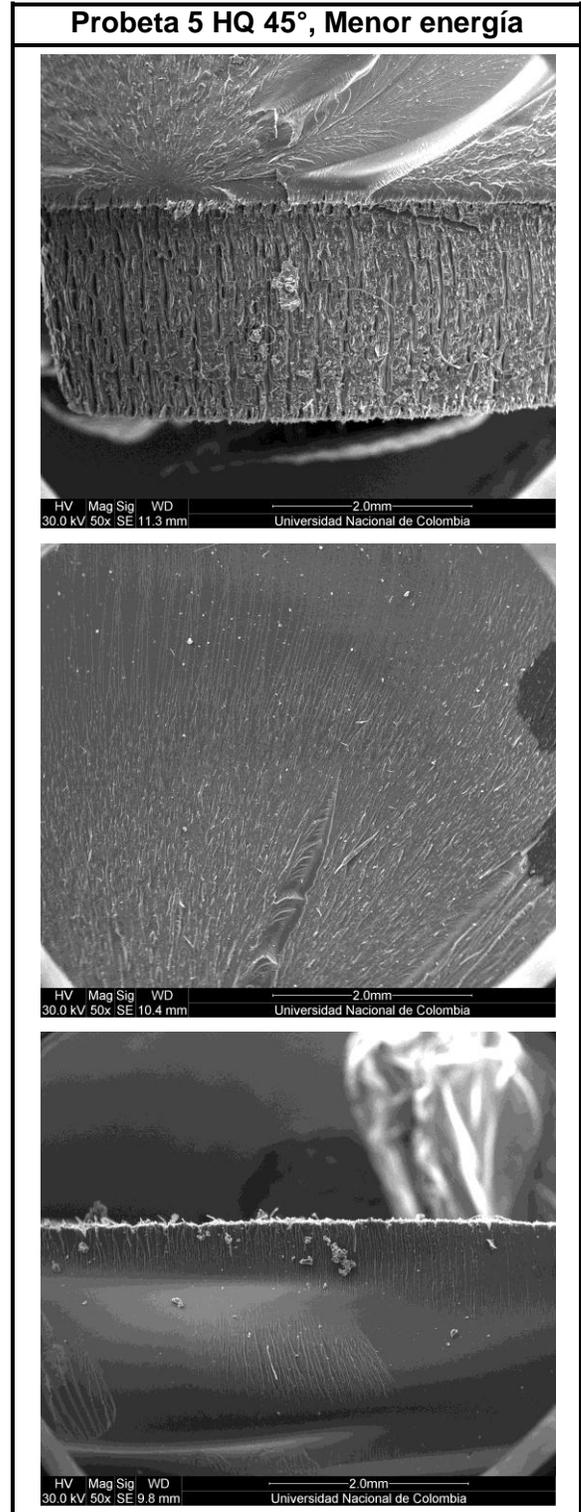
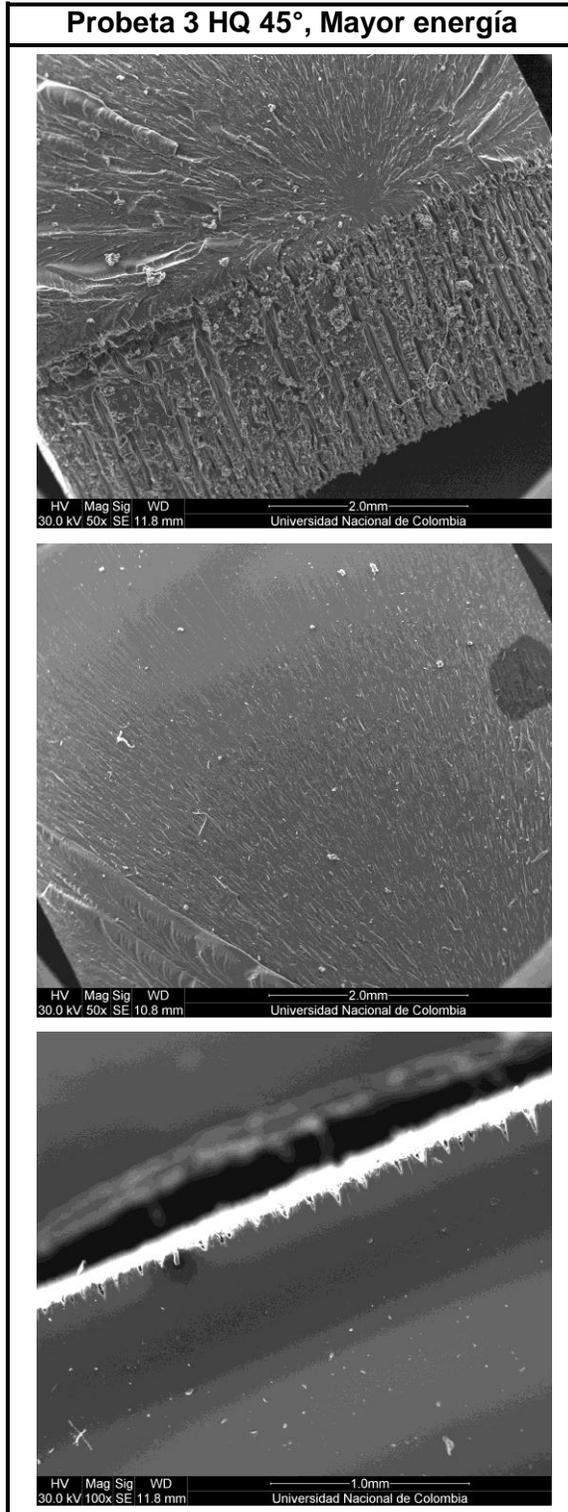


Probeta 3 HQ 0°, Mayor energía

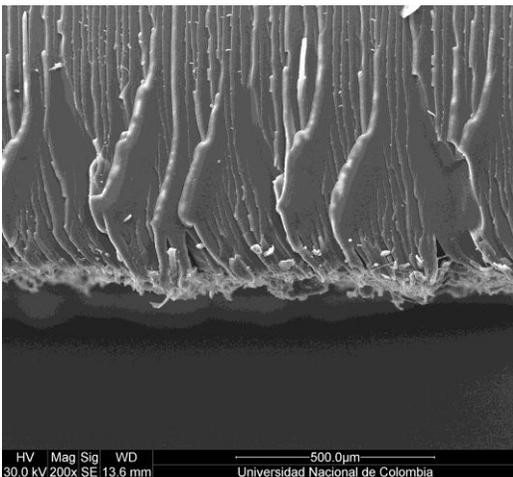
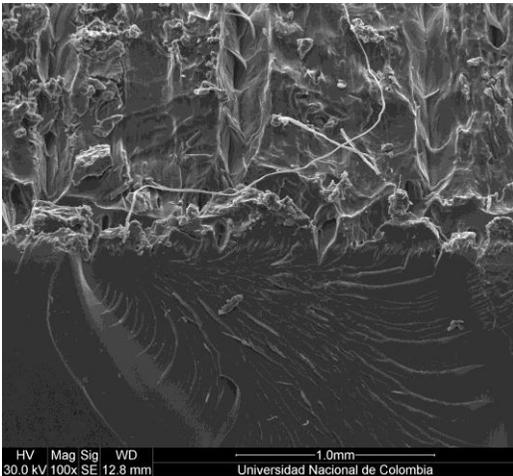
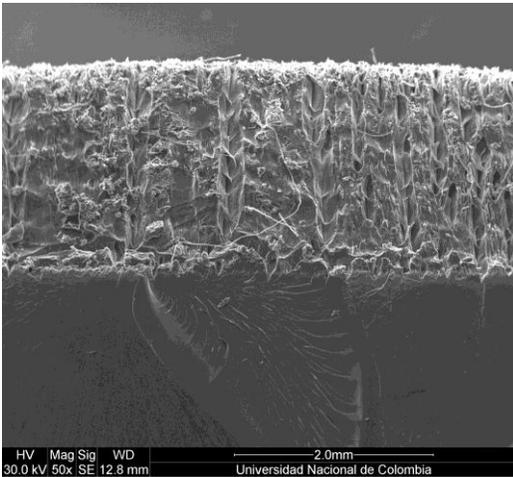


Probeta 1 HQ 0°, Menor energía

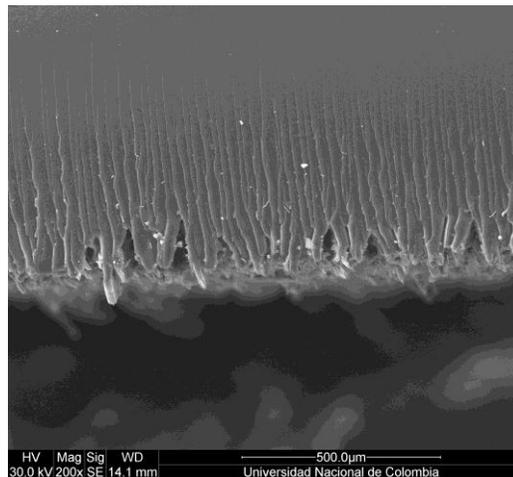
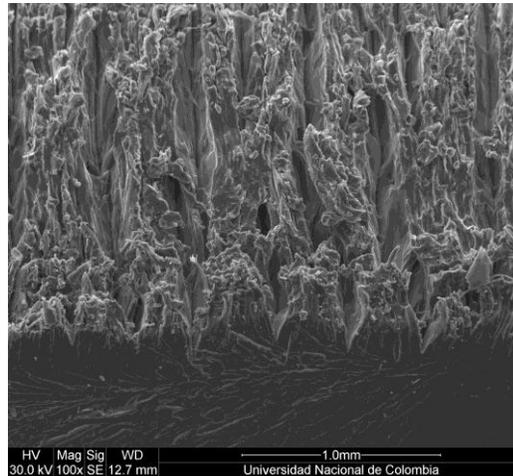
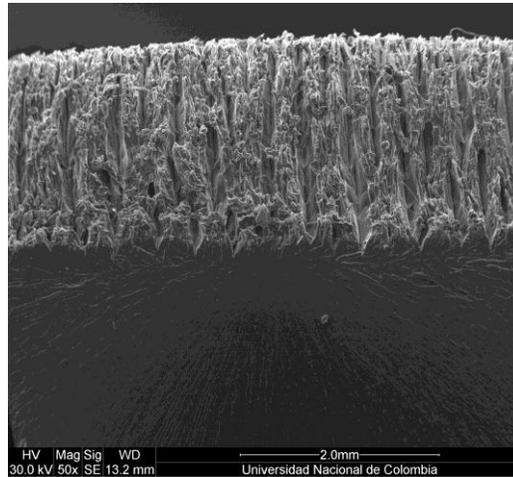


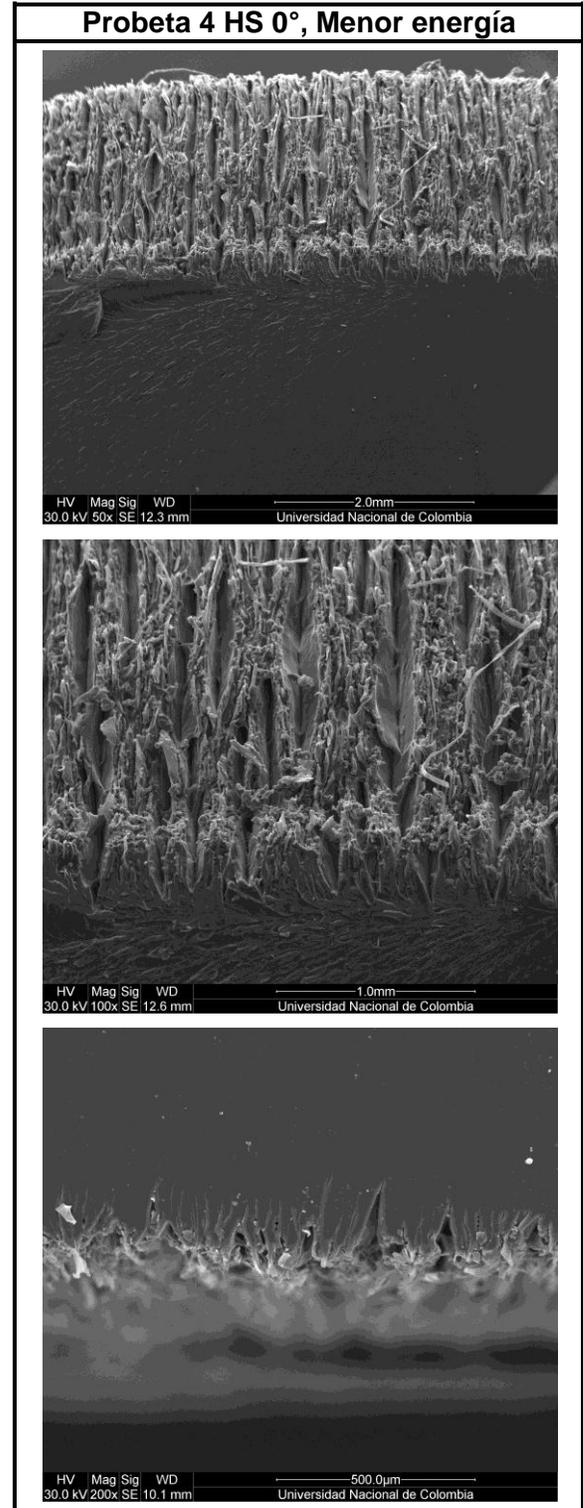
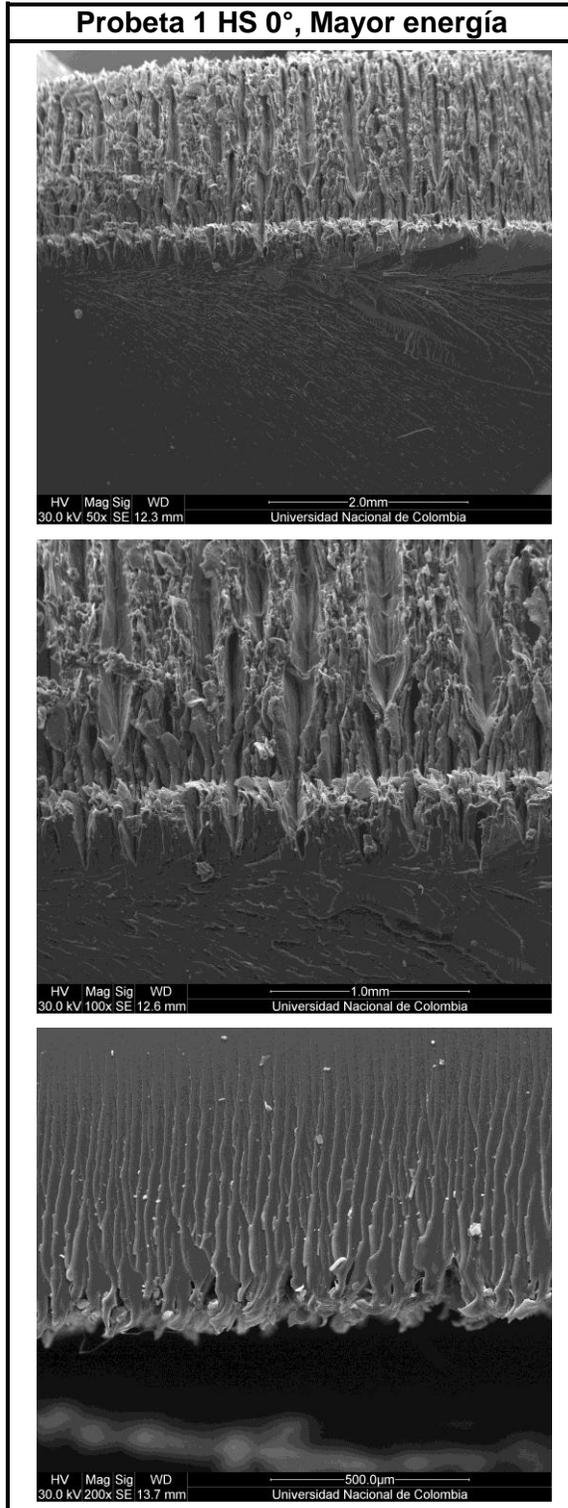


Probeta 2 HS 90°, Mayor energía

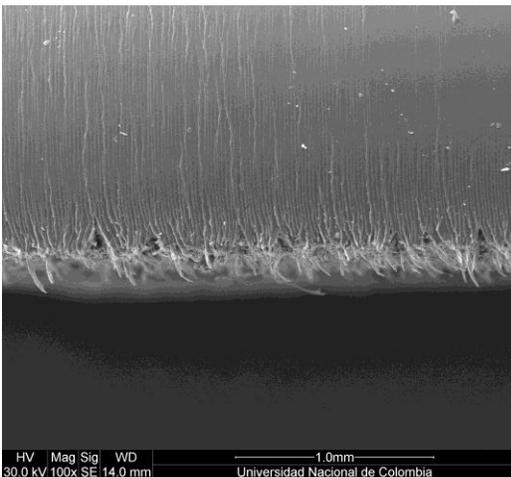
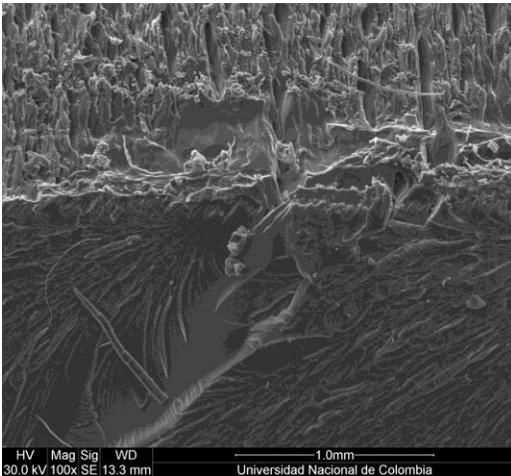
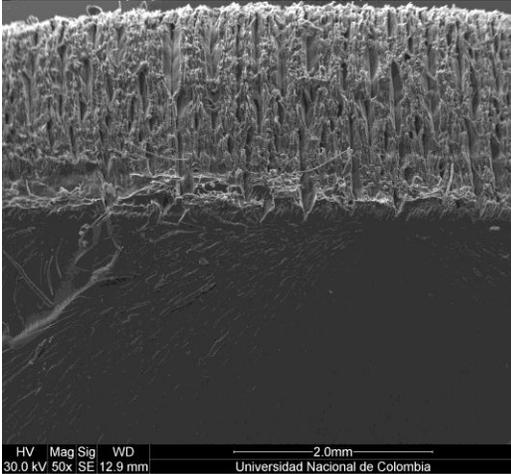


Probeta 5 HS 90°, Menor energía

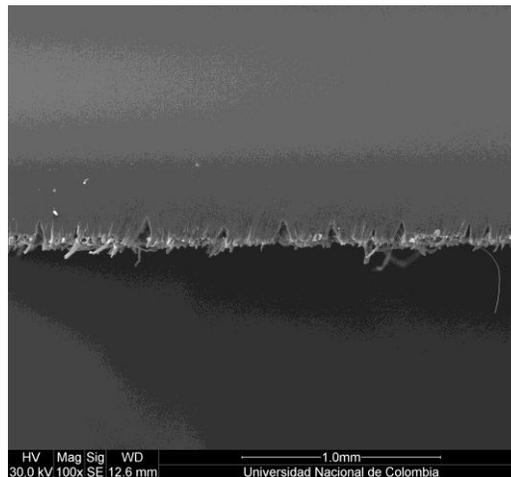
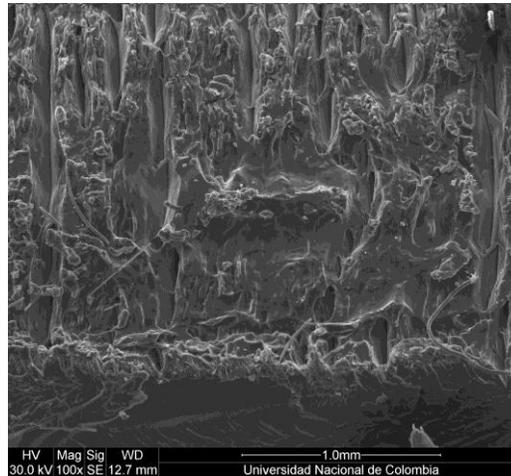
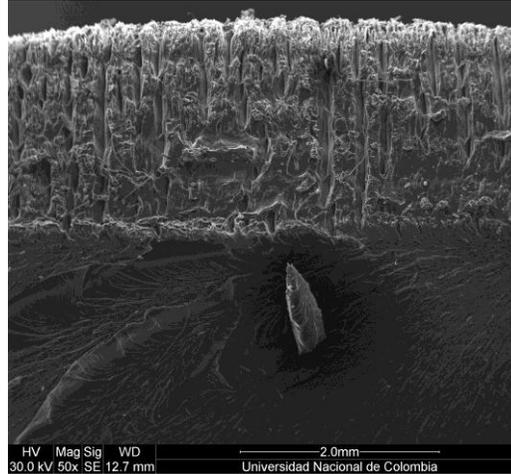




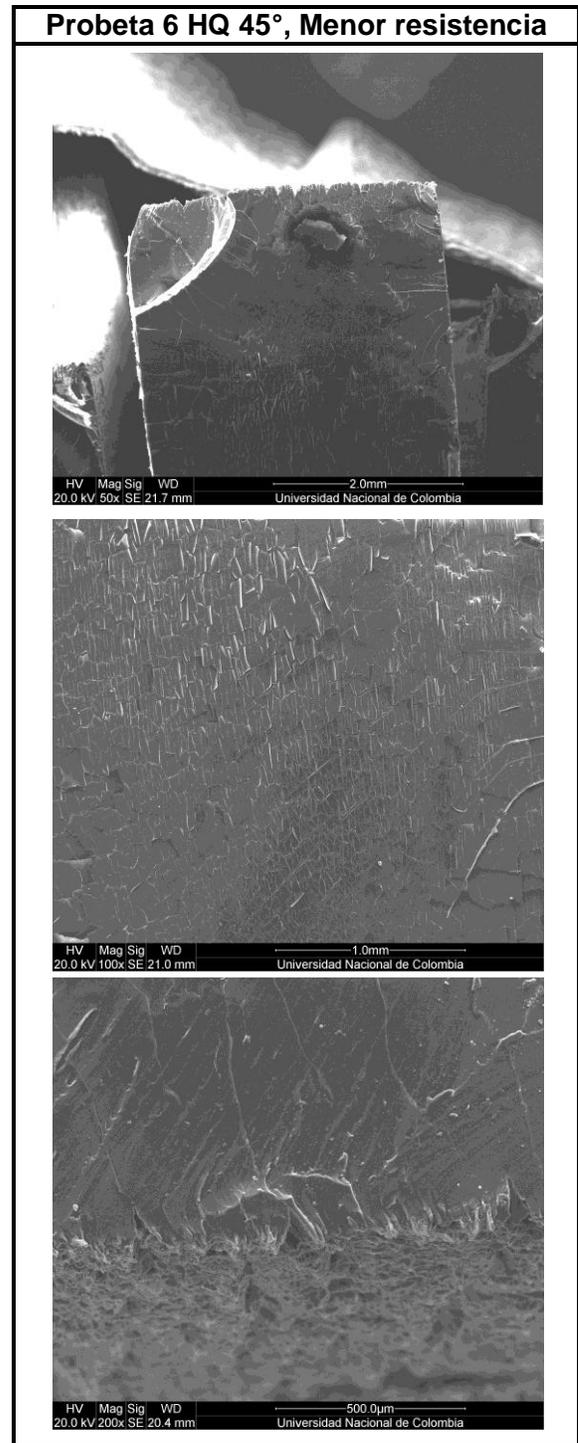
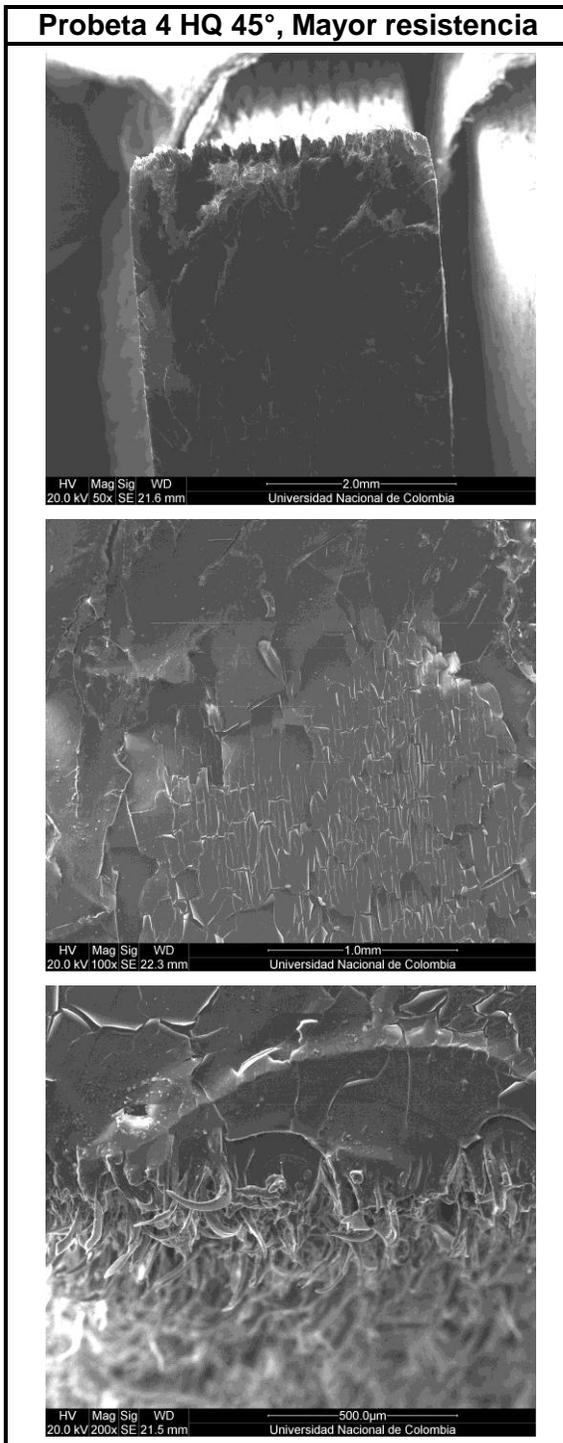
Probeta 1 HQ 45°, Mayor energía



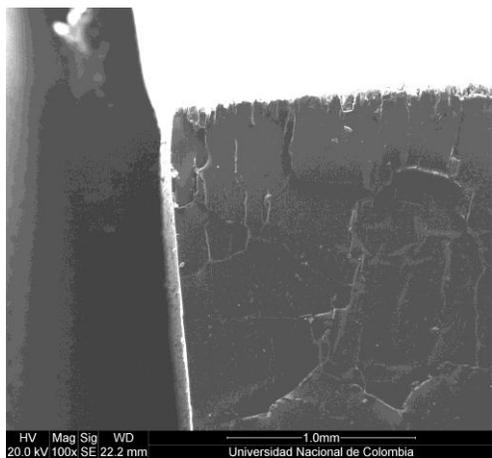
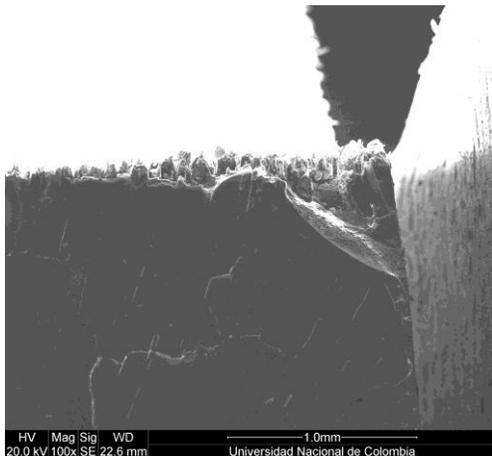
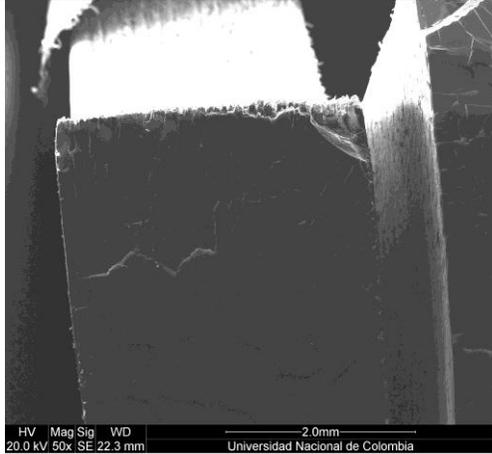
Probeta 3 HQ 45°, Menor energía



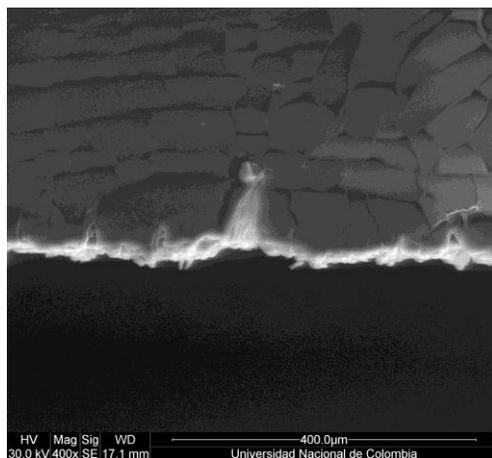
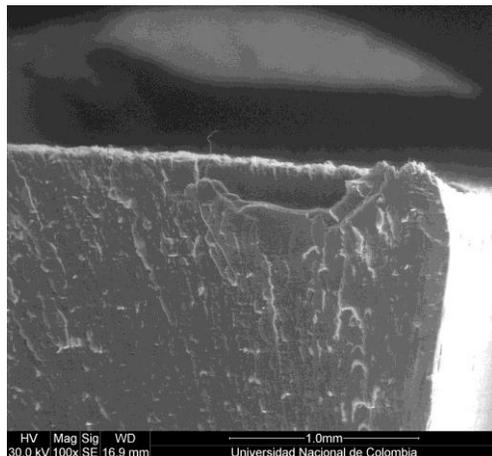
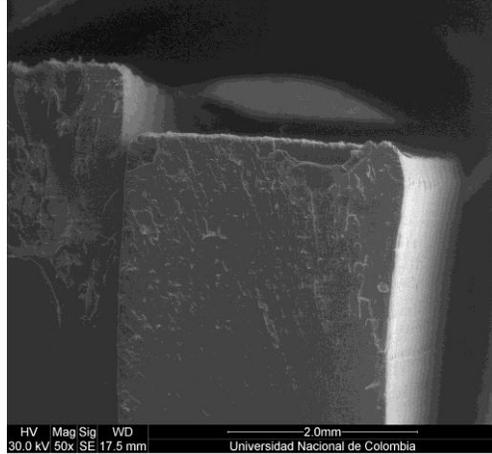
PROBETAS DE TENSION

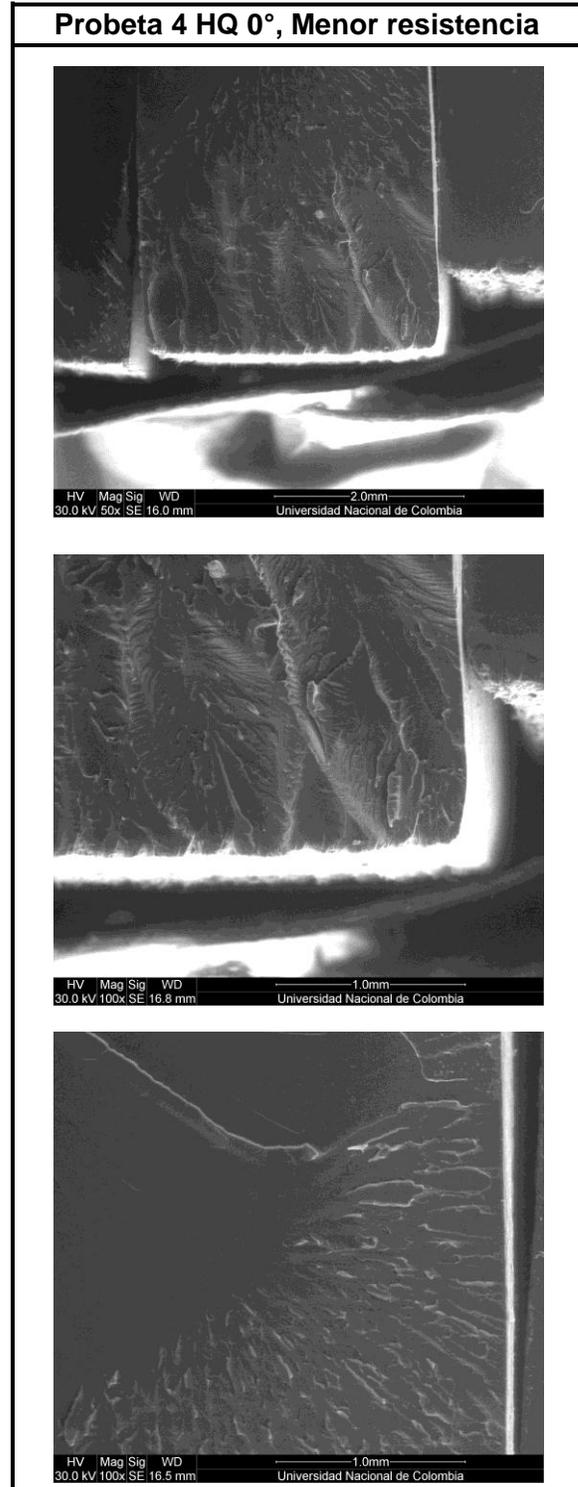
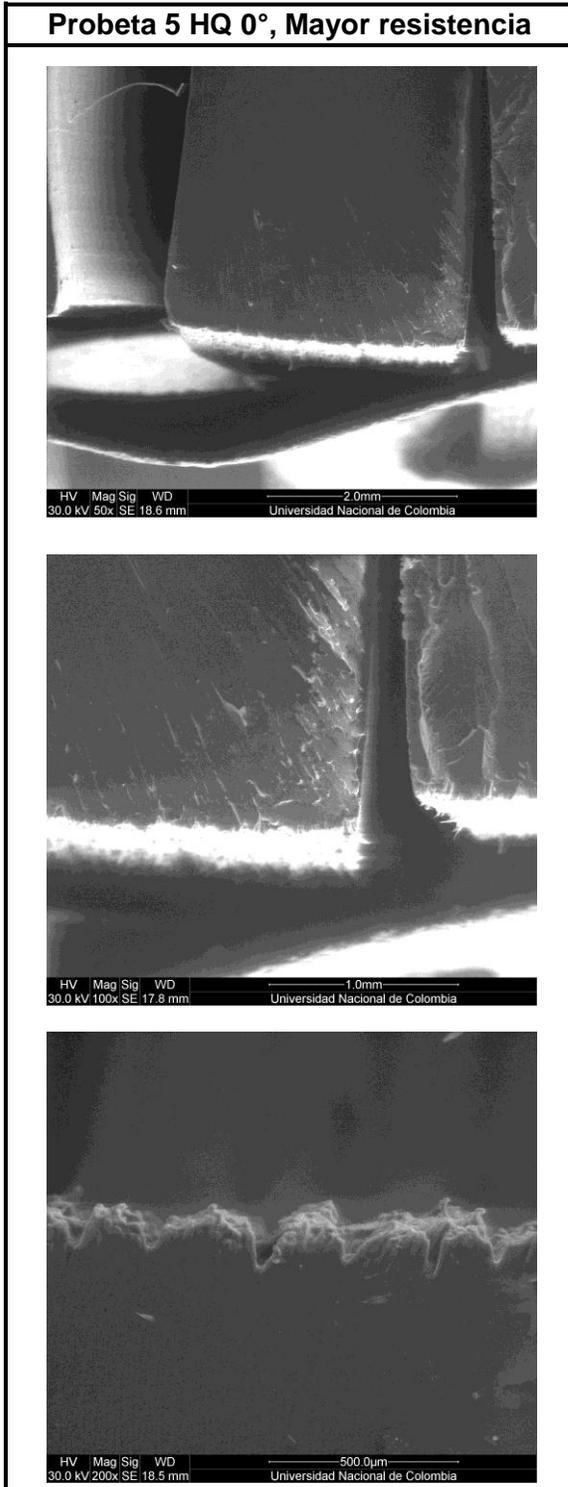


Probeta 4 HQ 90°, Mayor resistencia

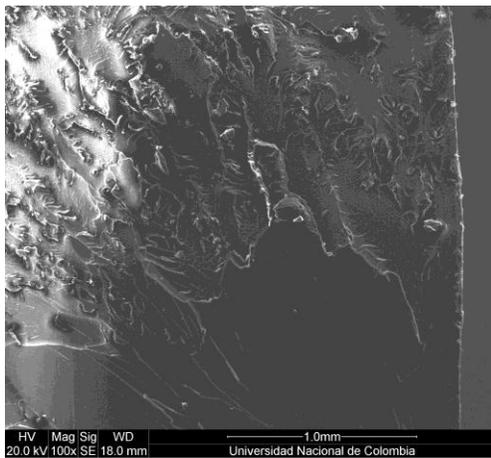
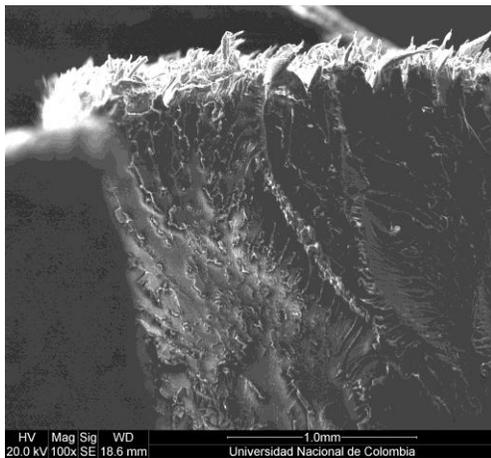
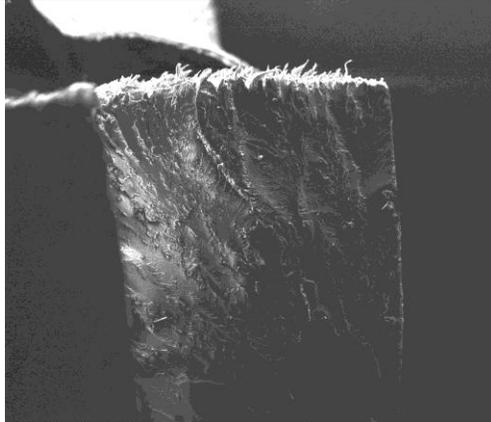


Probeta 5 HQ 90°, Menor resistencia

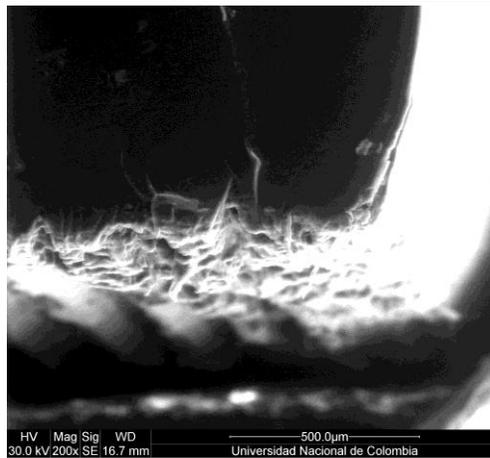
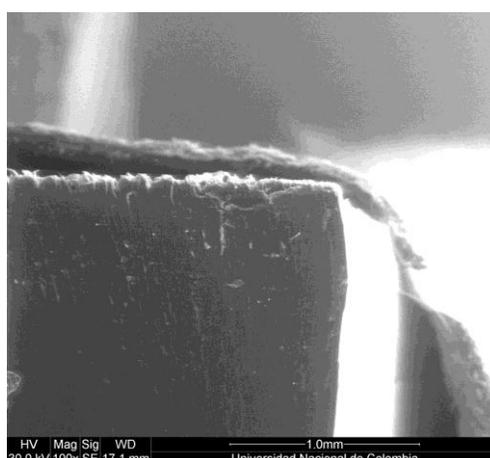




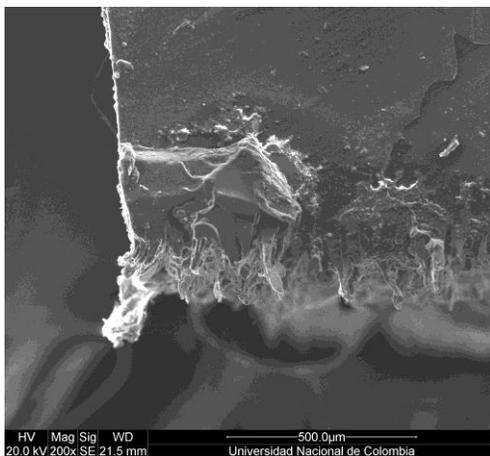
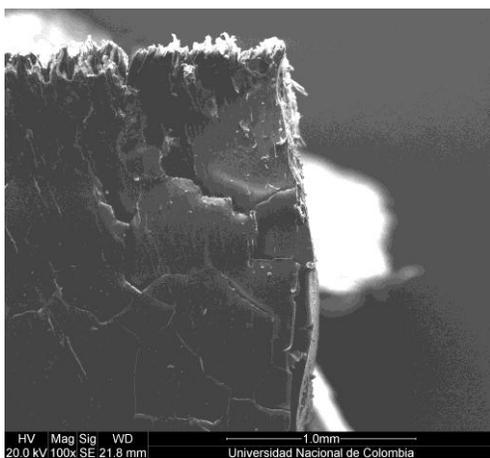
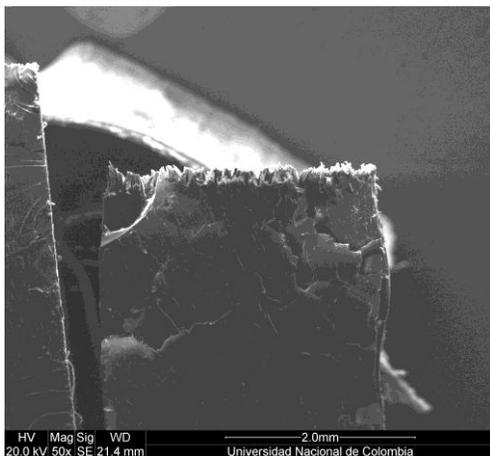
Probeta 1 HS 45°, Mayor resistencia



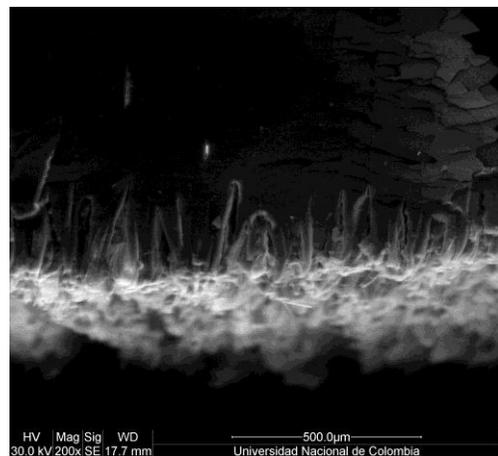
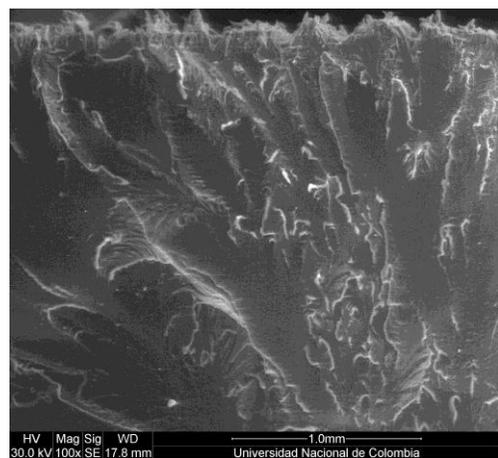
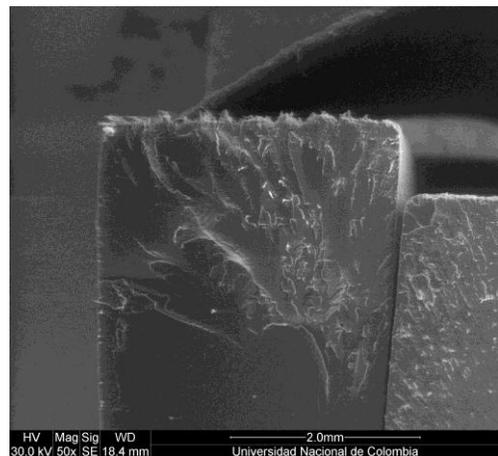
Probeta 3 HS 45°, Menor resistencia



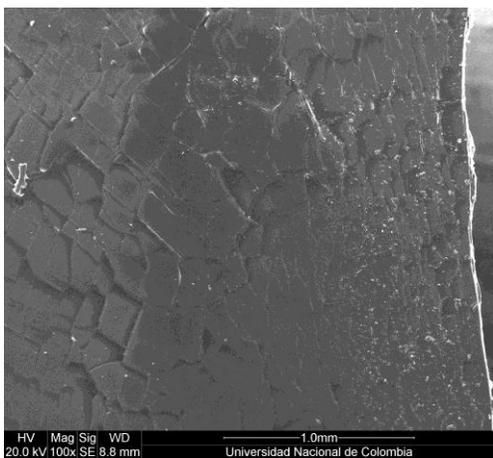
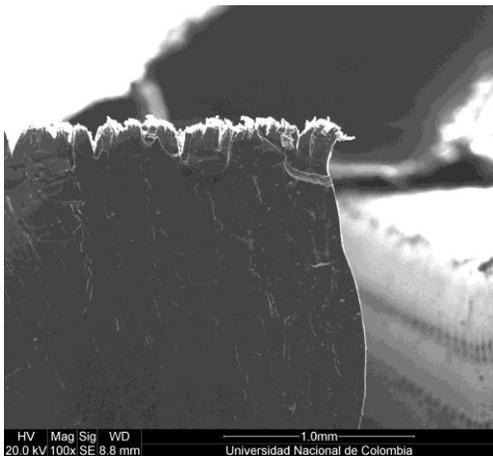
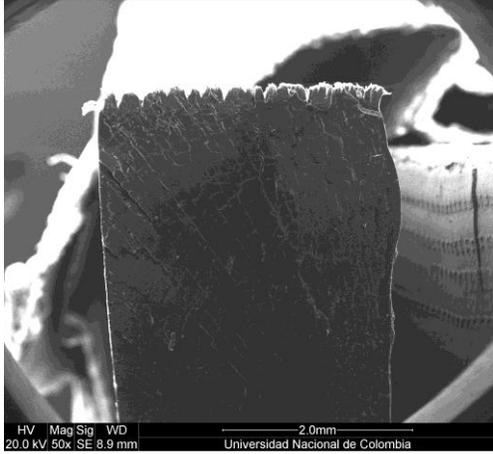
Probeta 4 HS 90°, Mayor resistencia



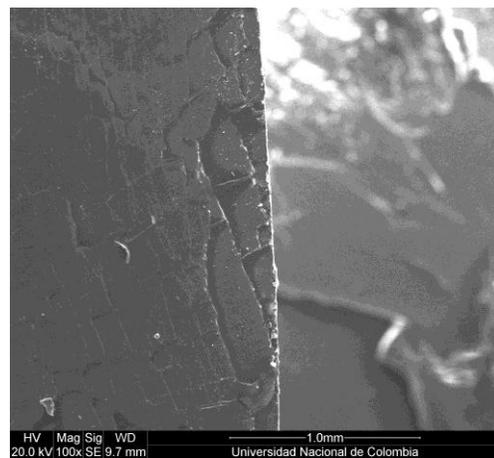
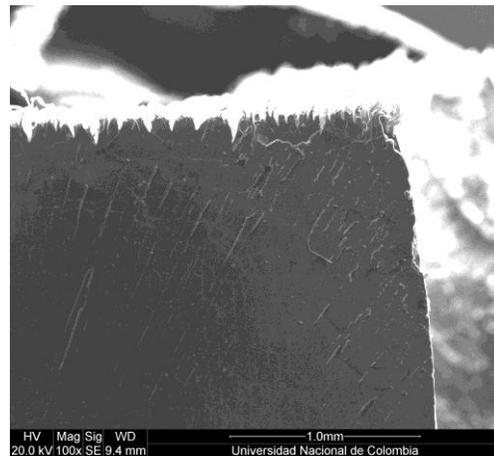
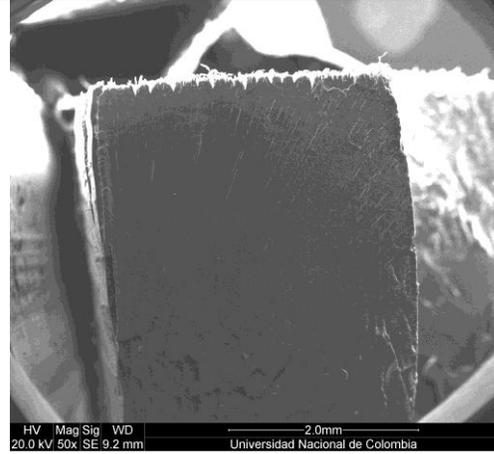
Probeta 2 HS 90°, Menor resistencia



Probeta 3 HS 0°, Mayor resistencia

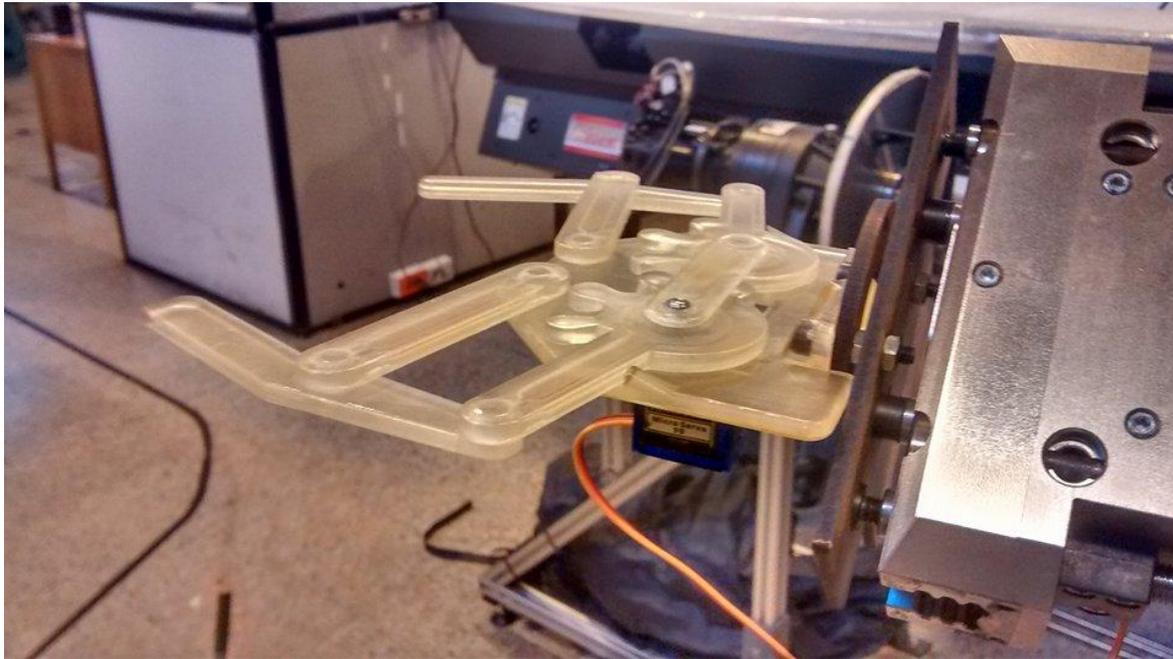


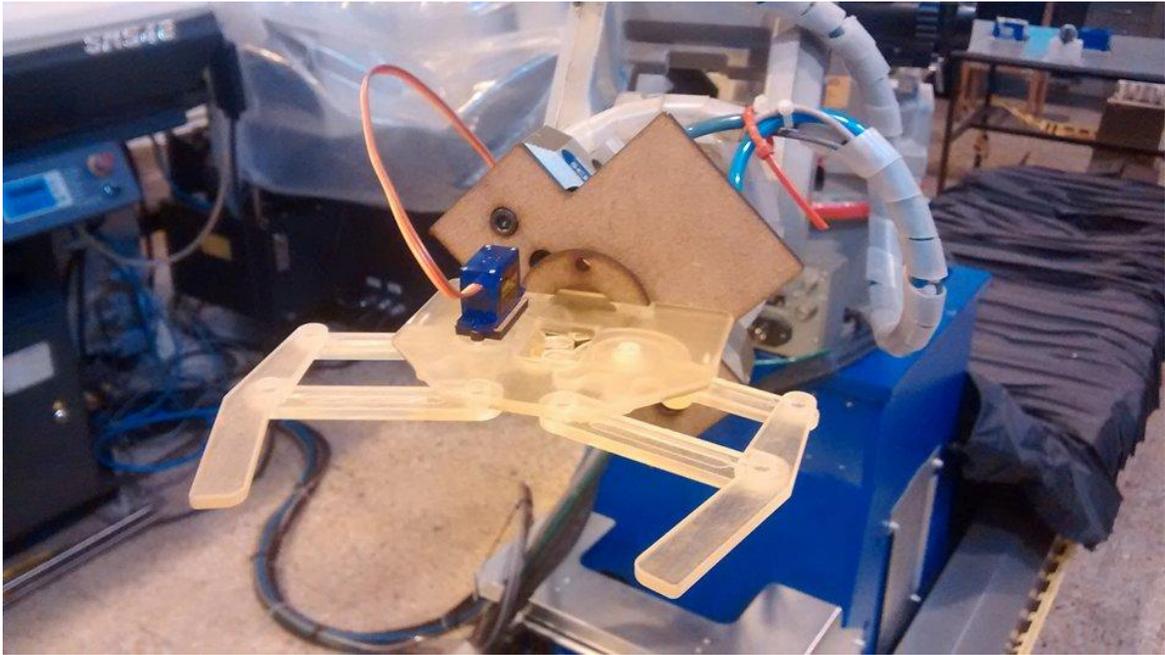
Probeta 1 HS 0°, Menor resistencia

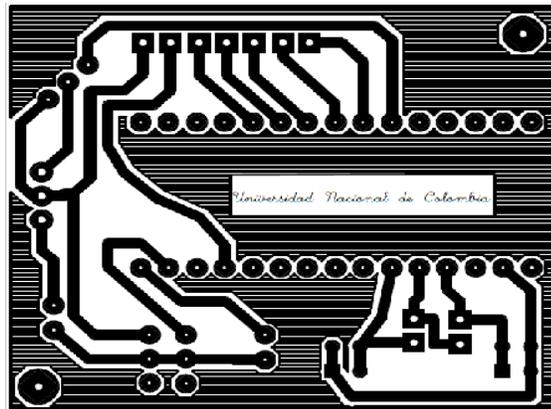
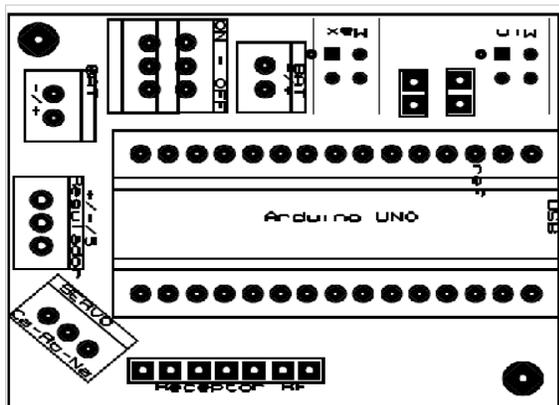


E. Anexo: Fabricación de prototipo industrial









```
#include <Servo.h>
```

```
Servo myservo;
```

```
//constants
```

```
int sensorPin = A0;
```

```
int sensorPin2 = A2;

int outPin = A1;

const int buttonPin1 = 2; // the pin that the pushbutton is attached to
const int buttonPin2 = 3;
const int buttonPin3 = 4;
const int buttonPin4 = 5;
const int buttonPin5 = 6;
// Variables
int posMin = 0;
int posMax = 180;
int pos = posMin;
bool buttonState1 = 0;
bool buttonState2 = 0;
bool buttonState3 = 0;
bool buttonState4 = 0;

void setup() {

  myservo.attach(10);
  pinMode(outPin, OUTPUT);
  pinMode(buttonPin1, INPUT);
  pinMode(buttonPin2, INPUT);
  pinMode(buttonPin3, INPUT);
  pinMode(buttonPin4, INPUT);
  pinMode(buttonPin5, INPUT);

  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  digitalWrite(outPin, LOW);
  //Read the pushbutton to reset xtreme positions
  if (analogRead(sensorPin)>1000){
    posMin=pos;
  };
  if (analogRead(sensorPin2)>1000){

    posMax=pos;

  };
};
```

```
//Watch signal of control
if (digitalRead(buttonPin5)==1){

    // read the pushbutton control order:
    buttonState1 = digitalRead(buttonPin1);
    buttonState2 = digitalRead(buttonPin2);
    buttonState3 = digitalRead(buttonPin3);
    buttonState4 = digitalRead(buttonPin4);

    if (buttonState1 == 1){
        //Serial.println("A");
        pos = posMin;
    };
    if (buttonState2 == 1){
        //Serial.println("B");
        pos = posMax;
    };
    if (buttonState3 == 1){
        //Serial.println("C");
        if (pos < posMax) pos=pos+1;
    };
    if (buttonState4 == 1){
        //Serial.println("D");
        if (pos > posMin) pos=pos-1;
    };
    };

    //Serial.println(pos);
    myservo.write(pos);
    delay(10);
};
```

Bibliografía

- [1] ASTM F2792 – 12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI:10.1520/F2792, www.astm.org.
- [2] Wohlers, T., & Jaffrey, T. (2013). History of additive manufacturing. In Wohlers Report 2013 (pp. 15-17). Colorado: Wohlers Associates.
- [3] Kochan, D. (1992). Solid freeform manufacturing possibilities and restrictions. Computers in Industry, 20, 133-140.
- [4] Chee Kai Chua, Kai Fai Leong. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications. World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 2014
- [5] Wohlers T. Wohlers Report2010: Additive Manufacturing State of the Industry – Annual Worldwide. Progress Report, Wohlers Associates Inc. ISBN 0-9754429-6-1
- [6] <http://www.stratasys.com/mx/impresoras-3d/technologies/polyjet-technology>
- [7] <http://www.stratasys.com>
- [8] Ramírez Moreno, Cotrino Ahumada. Estudio del preproceso para prototipado rápido en la máquina SH-TTAN1, T.D.G. (Ing. Mecánica). Ing. Mecánica Unal, Bogotá Colombia 2003
- [9] <http://www.undoprototipos.com/index.php/Tecnologias/polyjet.html?phpMyAdmin=blsB%2CL3SuSxXkspyN6FC%2CBurF65>
- [10] <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/design-series/objet-eden260vs>
- [11] European Standard CEN/TC 139 “Adhesives-Termsand definitions
- [12] Donald A., Ciencia e Ingeniería de materiales, 4ta. Edición, pagina 299.
- [13] Giudice C. y Pereyra A., Tecnología de pinturas y Decker C., Bianchi C., Ultrafast hardening of a modeling paste by UV-curing of a polyamide filled acrylic resin, 2005.
- [14] Chen Z., Chisholm B., Patani R., Wu F., Fernando S., Jogodzinski K., Webster D., Soy-based UV- curable thiol-ene coating, February 24 2010.
- [15] Anusavice K., Phillip la ciencia de los materiales dentales, page 164.
- [16] Kanrva L., Elsner P, Wahlberg J. Handbook of occupational dermatology, page 562.

- [17] Fink J., Reactive polymers fundamentals and applications, page 353.
- [18] Kawamura A., Takeko R., Iwata T., Acrylic resin, assignee: Sumitomo Chemical company, US Patent 215743, September 29 2005. recubrimientos: componentes, formulación manufactura y calidad, 2009.
- [19] Bi-wu H. Bo-fen H., Wei-qing C., Zhi-qiang O., Synthesis of a novel UV-curable prepolymer neopentyl glycol diglycidyl ether diacrylate and this cure film tensil property. May 4. 2009.
- [20] Kamura A., Takeko R., Iwata T., Acrylic Resin, assignee: Sumitomo Chemical Company, US Patent 215 743, September 29 2005.
- [21] Machhammer O., Tenten A., Jachow H., Haupt S., Arnold H., Unverricht S., Method for production acrolein and/or acrylic acid from propane, assignee: BASF Aktiengesellschaft, US Patente 6 426 433, July 30 2002.
- [22] Kida, Koichi c/o Mitsubishi Gas Chem. Com., Inc. Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, Method of producing a methyl methacrylate, EP 0 941 984, February 17 1999.
- [23] Mizuno M., Seo T., Sukuta T., Production method of methyl methacrylate, assignee: Sumitomo Chemical Company, Limited, US Patent 209 782, August 20 2009.
- [24] Jang B., Gogate M., Spivey J., Zoeller J., Colberg R., and Choi G., Synthesis of methyl metracrylate f from coal-derived syngas, US Department of energy Reports, Fischers Tropsch Archive 94065/20, Research Triangle Institute, Research Triangle Park, NC, 1999.
- [25] Dunn D., Adhesives and Sealants- Technology, Applications and Markets, page 28.
- [26] Pocius A., Dillard D., Chaudhury M., Adhesion science and engineering, page 848.
- [27] Ardis A., Preparation of monomeric alkyl-acyanoacrylates. US Patent 2 467 926, assigned to B. F. Goodrich, New York (NY), April 19 1949.
- [28] Malosfsky B., Badejo I., Transesterification method for making cyanoacrylates. US Patent 6 245 933, assigned Close Medical Corporation, Raleigh, NC (US), June 12 2001

- [29] C. J. Buck. Modified cyanoacrylate monomers and methods for preparation, US Patent 4 012 402, assigned to Johnson and Johnson, (New Brunswick, NJ), March 15 1977.
- [30] O'Dwyer L., Tierney F., Cyanoacrylates compositions, assignee: Loctite (R&D), US Patent 6 294 629, September 25 2001.
- [31] C. Decker and I, Lorinczona, UV-Radiation Curing of Waterborne Acrylate Coatings, October 4 2004.
- [32] Y. Irmoulli, B George and Merlin, Study of polymerization of acrylic resin of photocalorimetry: influence of initiators and irradiation wavelength, July 18 2007.
- [33] Plastic design library, Handbook of plastics joining: a practical guide, page 141.
- [34] Cognard P. Handbook of adhesive and sealants Volume 2: Adhesives and sealants: general Knowledge, Applications techniques, new curing techniques, page 305.
- [35] Koleske J., Radiation Curing of coating, page 37.
- [36] Gutsche Carl David, Calixarenes: An introduction, page 25.
- [37] Koyama K. and Tadokoro Y., Acrylic resin laminated film and laminated molding using the same, US Patent 6 692 821, assigned to Sumitomo Chemical Company, Limited (Osaka, JP), February 17 2004.
- [38] Tayama S. and Kusakawa N., Flame resistant acrylic resin composition and process for its production. US Patente 4 533 689, assigned to Mitsubishi Rayon Company, August 6 1985.
- [39] F. Sawaragi and H. Sonezaki. Abrasion-resistant coating composition for acrylic resin molded article. US Patente 6 177 138, assigned to Nippon ARC Co., Ltd. (Chiba, JP), January 23 2001.
- [40] Quintero J., Jerry Y, Johm, Cyanoacrylate composite, US Patent 241 249, October 2 2008.
- [41] Misiak H. Barnes R., Kneafsey B., Tickened cyanoacrylate composition, US Patent 92 481, assigned Loctite (R&D) Limited, April 26 2007.
- [42] Wojciak S., Attarwala S., Radiation-curable, cyanoacrylate containing compositions, US Patent 6 726795, April 27 2004.
- [43] Misiak H, Radiation curable, Cyanoacrylate-containing compositions, assignee: Loctite (R&D) Limited, US Patent 6 734 221, May 11 2004.

- [44] Uribe Velasco Miguel; Mehrenberger Y. Pierre. Los polímeros. Síntesis, caracterización, degradación y reología. Instituto Politécnico Nacional, 1996.
- [45] <http://www.plastico.com/temas/Adelantos-en-la-caracterizacion-termica-de-polimeros+3071677?pagina=2>
- [46] Hummel, D.O. (2012). Atlas of Plastics Additive: Analysis by Spectrometric Methods. Springer Science & Business Media.
- [47] Skoog, D., Holler, F., & Nieman, T. (2001). Principios de Análisis Instrumental. Madrid: McGraw Hill Interamericana de España
- [48] Forrest, M., Davies, J., & Davies, Y. (2007). The Rapra Collection of infrared Spectra of Rubbers, Plastics and Thermoplastic Elastomers. Smithers Rapra Publishing.
- [49] Ahn SH, M. M., Rapid Prototyping Journal, 8 (4):248-57, 2002.
- [50] Es-Said O.S. Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. Materials and Manufacturing Processes. 2000
- [51] Grellmann Wolfgang, Seichler Sabine. Polymer Testing. Hanser Publishers. 2007.
- [52] Kausch H.H. and Williams J.G. (1987). Fracture and fatigue. Encyclopedia of Polymers Engineering Science. Second Edition Vol. 7. 328-78
- [53] Hsiao C.C. and Sauer J.A. and Kausch H.H and Williams J.G (1987), 328
- [54] Suresh S. (1994). Fatigue of materials. Great Britain: Cambridge University Press. Capitulo 2, 3 y 13.
- [55] Donald A.M., Kramer E.J. (1982). Journal of Material Science. 17.1871.
- [56] Kinloch A.J. and Young
- [57] <https://www.chemwiki.uc.davis.edu>
- [58] A.R. Torrado-Perez, D-A- Roberson, R.B. Wicker, Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. J. Fail. Anal, Prev. 14 (2014) 343-353.
- [59] O. Baier, G. Witt, Functional components produced by multi-jet modeling combined with electroforming and machining. S. Afr. J. Ind. Eng. Vol 25. N.2 Pretoria Aug. 2014.
- [60] Hoffmann, J. ThermoJet und medizinische modelle - Ein erfahrungsbericht. *RAPROMED 2000*.

- [61] <https://www.cati.com/blog/2016/01/polyjet-support-removal-tip/>
- [62] William F. Smith, Javad Hashem, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Mc Graw Hill. Cuarta Edición. 2004
- [63] IUPAC. Nic, M .; Jirat, J .; Kosata, B., eds. "Polímero Telechelic". ISBN 0-9678550-9-8 . Doi : 10.1351 / goldbook.TT07167
- [64] Groover P. Mikell, Fundamentos de manufactura moderna. Mc Graw Hill. Tercera Edición. 2007
- [65] G. Gavelli, del Istituto Donegani di Novara: Método e Scienza, Sansoni Editore, 1982, pag 276.
- [66] A. Naranjo, M. P. Noriega, T. Osswald, A. R. Alzate, J. D. Sierra, Plastics Testing and Characterization Industrial Applications, Hanser Publishers, Munich, 2008.
- [67] ASTM D3418-15, "Método de prueba estándar para temperaturas de transición y entalpias de fusión y cristalización de polímeros por calorimetría diferencial de barrido"
- [68] B. Wunderlich, "Thermal Analysis of Polymeric Materials", Springer, Berlin, 2005.
- [69] M. C. Garry, M. P. Fuller and Z. Stanek. An FTIR liquid analyzer. American laboratory, 1990.
- [70] Nicolet. Sample handling training course handbook.
- [71] ASTM D5576. Practice for determination of structural entities in polyolefins by FTIR. American standard testing materials ASTM, 803:584-586.
- [72] J. N. Lomonte. IR determination of vinylidene unsaturation in polyethylene. Analytical chemistry, pages 129-131, 1962.
- [73] R. T. Conley. Infrared spectroscopy. Allyn and Bacon Inc. 2nd edition, 1972.
- [74] J. D. Sierra, C. Gartner and R. Avakian. New polyolefins characterization by instrumental analysis. ANTEC, 1998.
- [75] J. D. Sierra, S. Ospina, N. Montoya, M. P. Noriega, and T. A. Osswald. Characterization of polyethylene blends by using novel techniques such as the successive self-nucleation and annealing (SSA) and the Fourier self-deconvolution IR spectroscopy (FSD-IR). ANTEC, 2000.
- [76] ASTM D790-03. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2003.
- [77] C. D. William. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Volumen 2.

- [78] ASTM D792-98 "Métodos de prueba estándar y densidad específica (densidad relativa) de plásticos por desplazamiento"
- [79] G. Gorrasi, M. Tortosa, V. Vittoria, E. Pollet, B. Lepoittevin, M. Alexandre and Dubois, *Polymer in press*, 2003.
- [80] ASTM D570, Método de prueba estándar para la absorción de agua de plásticos, 1998.
- [81] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Prentice Hall, Cuarta edición, 2002.
- [82] https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/Imagenes/Fig15_9.jpg
- [83] Cotec, 30 *Fabricación Aditiva*, Fundación Cotec para el desarrollo tecnológico. Octubre, 2011.
- [84] <https://image.slidesharecdn.com/propmecanicas2-150626192901-lva1-app6891/95/prop-mecanicas-2-14-638.jpg?cb=1435347026>
- [85] M. N. S. Ballesteros, *Tecnología de proceso y transformación de materiales*, Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, Dec 31, 2005
- [86] ASTM D638, Standard test method for tensile properties of plastics, American Standard testing of materials, 2013.
- [87] Lipson H, Kurman M "Fabricated: The New World of 3D Printing", 2013.
- [88] Koten J "Advanced Manufacturing: The New Industrial Revolution–WSJ". The Wall Street Journal 2013.
- [89] Berman B "3D printing: The new industrial revolution", *Business Horizons*, 55(2), 155 (2012)
- [90] Gibson I, Rosen D, Stucker B "Additive Manufacturing Technologies". Springer New York, 2015
- [91] Petrovic V, Gonzalez Jvh, Ferrando Oj "Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies", *International J. Production Research*, 2010
- [92] Tymrak Bm, Kreiger M, Pearce Jm "Mechanical properties of components fabricated with open–source 3–D printers under realistic environmental conditions", *Materials & Design*, 58, 242 (2014)

- [93] Ziemian S, Okwara M, Ziemian Cw "Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene", Rapid Prototyping J., 21(3), 270 (2015)
- [94] A. F. Yee, Impact resistance, Encyclopedia of Polymers Engineering, Science. Second Edition, Vol. 8, Pag. 36-38, 1987.
- [95] A. J. Kinloch and R. J. Young, Impact and fatigue in fracture behavior of polymer, Applied Science Publishers Ltd., London, 1983.
- [96] ASTM D256, Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics, 2006
- [97] J.G. Williams, G. C. Adams, Fracture mechanics of polymers, Ellis Horwood Limited, Chischester, 1984.
- [98] P. E. Read en E. H. Andrews, Developmentnts in polymer fracture-1, Applied Science Publishers Ltd., London, Cap. 4. 1979.
- [99] J. M. Hodgkinson and J. G. Williams, Phys. Technol. 13, Pag. 152, 1982.
- [100] C.B. Bucknall, Toughened polymers, Applied Science Publishers LTD., London 1977.
- [101] C. Núñez, A. Roca, J. Jorba, Comportamiento mecánico de los materiales, Vol. II Ensayos mecánicos, Ensayos no destructivos, Universitat de Barcelona, 2013.
- [102] ASTM D2240-05, Standard test method for rubber property – durometer hardness, 2005.
- [103] J. L. González Velásquez, Mecánica de fractura, Limusa Noriega Editores, Segunda Edición, 2004
- [104] <http://www.eis.uva.es>
- [105] <http://www.pslc.ws>
- [106] H. Gerling, Medición de longitudes: Libro de consulta acerca de los procedimientos de medición en fabricación, Editorial Reverte, 2002
- [107] P. Bevington and D. K. Robinson, Data reduction and error analysis for the physical sciences, 2nd ed. (McGraw Hill, New York, 1993).
- [108] D. C. Baird, Experimentación, 2ª ed. (Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México, 1991).
- [109] Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1st ed., International Organization of Standarization (ISO), Suiza (1993); <http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/index.html>.

- [110] M. A. Caballero Torres, O. J. Mora Gil, I. Angarita, E. Córdoba, Caracterización de resinas fotopoliméricas curadas con radiación U.V aplicadas a la manufactura aditiva, Avances, 2016
- [111] Kirrenko, O. Ph. , Marichin, V. A. y Miaskinova, L. P. Electronmicroscopical and optical investigation of the microcrack propagation in oriented nylon. VIP Congrès Intern, de Microsc. Electronique. Ed. Soc. Franc. Microsc. Electr., Grenoble. Vol. 1, 1970, págs. 369-370.
- [112] Holloway, D. G.; The Physical Properties of Glass. Ed. Wykeham Publications, London, Ltd. London and Winchester, 1973.
- [113] Llorente Uceta, M.A; Horta Zubiaga, A. Tecnicas de caracterización de polímeros. UNED, 1991.