



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

CARACTERIZACIÓN DEL ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO POR MODELAMIENTO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA PARA LA FABRICACIÓN DE INSERTO PLANTAR

SEBASTIÁN RICARDO CORTHORN PEDRASA

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
CONSTANZA MIRANDA MENDOZA

Santiago de Chile, Noviembre 2016

© 2016, Sebastián Corthorn Pedrasa



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

CARACTERIZACIÓN DEL ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO POR MODELAMIENTO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA PARA LA FABRICACIÓN DE INSERTO PLANTAR

SEBASTIÁN RICARDO CORTHORN PEDRASA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

CONSTANZA MIRANDA MENDOZA

AMADOR GUZMÁN CUEVAS

CLAUDIO MOURGUES ÁLVAREZ

JORGE LÓPEZ TAMAYA

IGNACIO VARGAS CUCURELLA

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Noviembre 2016

A mi familia, en especial a
Magdalena

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Norma y Dafne por su disposición constante a cooperar, entregándome todos los contactos necesarios y recibéndome en su hogar. También agradecer la paciencia de ambas en este largo pero fructífero trabajo.

Agradecer a Constanza Miranda, quien no sólo fue mi profesora guía en este trabajo, sino que también fue mi mentora y guía en los últimos años de universidad. Me ayudó a darme cuenta que área de la Ingeniería me apasiona y me incentivó a ser una persona más responsable, autodidacta y proactiva.

Debo agradecer también a Patricio Pérez quien me recibió de la mejor manera en el laboratorio y me ayudó a llevar a cabo los experimentos, y a Danisa Herrera, quien me resolvió cada una de mis dudas administrativas, por básicas que estas fueran.

Agradecer también a Giorgio Frederich quien me acogió en FabLab UC y se dio el tiempo de enseñarme cada una de las máquinas ahí presentes.

Quiero agradecer a mis amigos, quienes me acompañaron en este proceso, y han sido un apoyo constante. También a la Universidad y todos sus proyectos de los que formé parte, destacando Proyecta UC e IUCDF, en los que aprendí bastante.

Finalmente, a mi hermosa familia, quienes sin siempre entender todo lo que hacía, me apoyaron ciegamente, motivándome cada día a ser mejor e incentivándome a que siga mis sueños.

INDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xiii
1. Introducción	1
1.1. La enfermedad.....	1
1.2. Particularidades de la paciente	2
1.3. Inserto plantar de tobillo y pie para caso de estudio	3
1.3.1. Inserto plantar de uso actual.....	3
1.3.2. Requerimientos	5
1.3.3. Relación inserto plantar actual con requerimientos	7
1.4. Inserto plantar en el mercado	8
1.5. Necesidad de nuevo inserto plantar.....	10
1.6. Oportunidad de diseño	11
2. Marco Teórico.....	12
2.1. Manufactura aditiva.....	12

2.2.	Manufactura aditiva en producción de órtesis e insertos plantares	14
2.3.	Modelamiento por Deposición Fundida (FDM).....	16
2.4.	Selección del material	18
2.5.	Importancia de los parámetros	19
2.6.	Uso de acetona	21
2.7.	Importancia del estudio	22
3.	Hipótesis y objetivos.....	24
3.1.	Hipótesis.....	24
3.2.	Objetivos	24
4.	Metodología	25
4.1.	Selección de parámetros.....	25
4.1.1.	Parámetros considerados.....	26
4.1.2.	Parámetros no considerados.....	30
4.2.	Metodología de Taguchi.....	32
4.3.	Arreglo Ortogonal	33
5.	Procedimiento Experimental.....	35
5.1.	Preparación de probetas	35
5.2.	Baño con vapor de acetona.....	39
5.3.	Equipamiento y parámetros de ensayo.....	41
5.4.	Obtención de resultados	42
6.	Resultados y análisis.....	44

6.1. Ensayos de tracción	44
6.1.1. Análisis de efectos principales	46
6.1.2. Interacciones	48
6.1.3. Análisis de variabilidad.....	50
6.1.4. Análisis de razón señal-ruido	53
6.1.5. Análisis ANOVA	55
6.2. Ensayos de flexión	57
6.2.1. Análisis de efectos principales	59
6.2.2. Análisis de variabilidad.....	61
6.2.3. Análisis de razón señal-ruido	63
6.2.4. Análisis ANOVA	65
6.3. Resumen de los resultados	66
7. Diseño y fabricación de inserto plantar	69
7.1. Investigación de la paciente	69
7.2. Molde	70
7.3. Diseño.....	72
7.4. Fabricación	75
7.5. Testeo	78
7.6. Análisis de costos	80
8. Conclusiones.....	82
8.1. Análisis de los resultados de los experimentos	82
8.2. Indicaciones de fabricación para productos finales en ABS	83

8.3. Análisis de la fabricación del inserto plantar	83
8.4. Limitantes.....	85
8.5. Trabajo a futuro	85
Bibliografía.....	87
A N E X O S.....	91
Anexo A: Resultados ensayos de tracción y flexión	92
Anexo B: Paper enviado a revista internacional	93
Anexo C: Correo de recepción de paper	108

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1 Comparación ABS y PLA	19
Tabla 4-1 Parámetros y niveles	25
Tabla 4-2 Arreglo ortogonal para ensayos de tensión y flexión	34
Tabla 6-1 Tabla de respuesta para ensayo de tracción	44
Tabla 6-2 Resistencia media para ensayos de tracción	45
Tabla 6-3 Variabilidad para ensayo de tracción.....	51
Tabla 6-4 Razón señal – ruido para ensayo de tracción.....	54
Tabla 6-5 Análisis ANOVA para ensayo de tracción	57
Tabla 6-6 Tabla de respuesta para ensayo de flexión	58
Tabla 6-7 Media de módulo de flexión.....	59
Tabla 6-8 Variabilidad en Ensayo de Flexión.....	61
Tabla 6-9 Razón señal-ruido para ensayos de flexión	63
Tabla 6-10 Análisis ANOVA para ensayo de flexión.....	65
Tabla 6-11 Resumen resultados por combinación	66
Tabla 6-12 Contribución de parámetros en características mecánicas.....	68
Tabla 7-1 Parámetros para fabricar insertos plantares	75
Tabla 7-2 Costos de fabricación de inserto plantar	80

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1 Inserto plantar de uso actual.....	4
Figura 2-1 Ejemplo de producto por manufactura rápida. Elaboración propia.....	13
Figura 2-2 Tipos de manufactura aditiva (modificado de Short et al., 2015)	14
Figura 2-3 Esquema explicativo de FDM (Pham et al., 1998)	17
Figura 4-1 Esquema de <i>shells</i> . Imagen modificada (Enabling the Future, 2014)	30
Figura 4-2 Orientación de deposición tipo <i>criss cross</i> (Ziemian et al., 2015)	31
Figura 5-1 Medidas para probeta de ensayo de tracción.....	36
Figura 5-2 Medidas para probeta ensayo de flexión	36
Figura 5-3 Probetas para ensayo de tracción.....	38
Figura 5-4 Probetas para ensayo de flexión	38
Figura 5-5 Sistema de procesamiento con vapor de acetona	40
Figura 5-6 Comparación probeta procesada y probeta no procesada con acetona	40
Figura 5-7 Máquina Instron 4206	41
Figura 6-1 Efectos principales de ensayo de tracción.....	47
Figura 6-2 Interacción acetona y temperatura de extrusión.....	48
Figura 6-3 Interacción Altura de Capa y Shells	49
Figura 6-4 Efecto de parámetros en variabilidad para ensayo de tracción	52
Figura 6-5 Efecto de parámetros en razón señal-ruido para ensayos de tracción	55
Figura 6-6 Efectos principales en ensayo de flexión	60
Figura 6-7 Efectos de parámetros en variabilidad para ensayo de tracción	62

Figura 6-8 Efecto de parámetros en razón señal-ruido para ensayo de flexión	64
Figura 6-9 Media y desviación estándar para ensayos de tracción	67
Figura 6-10 Medias y desviación estándar para ensayos de flexión	67
Figura 7-1 Trabajo etnográfico (Ortuzar, 2014)	70
Figura 7-2 Recipiente con alginato y yeso	71
Figura 7-3 Molde de yeso	72
Figura 7-4 Trabajo de Joaquín Hoffmann	74
Figura 7-5 Trabajo de Eduardo Peralta	74
Figura 7-6 Orientación de fabricación	77
Figura 7-7 Fabricación de inserto plantar	78
Figura 7-8 Fabricación final de inserto plantar	78
Figura 7-9 Falla en inserto plantar realizado con MakerBot	79

RESUMEN

Los productores de artículos ortopédicos en Chile no son suficientes para satisfacer los requerimientos del mercado. Además, existe una tendencia a generar órtesis y prótesis usando la tecnología llamada manufactura aditiva. Ésta ha tenido un crecimiento exponencial debido a la liberación de patentes y mejora de la tecnología. En este contexto surge la oportunidad de crear un inserto plantar para un caso de estudio a partir de modelamiento por deposición fundida (FDM).

El desarrollo del dispositivo implicó comprender cómo los parámetros de fabricación del FDM afectan los productos de Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). Aunque la literatura expone efectos de los parámetros sobre las cualidades mecánicas del material, otros correspondientes a la cantidad de *shells* y el procesamiento con vapor de acetona quedan sin analizar.

El objetivo de este trabajo es comprender el efecto que tienen la altura de capa, temperatura de extrusión, cantidad de *shells* y el procesamiento con vapor de acetona sobre la resistencia a la tracción y el módulo de flexión de piezas fabricadas en ABS en vistas de la fabricación de insertos plantares. Se realizaron ensayos de tracción y flexión sobre piezas fabricadas en ABS por FDM. El experimento se diseñó siguiendo la metodología Taguchi y los resultados se sometieron a análisis de efectos principales, variabilidad, razón señal-ruido y ANOVA. Una vez obtenidos los resultados, se fabricó y probó un prototipo de inserto plantar para el caso de estudio.

Se concluye que la altura de capa es el parámetro con mayor efecto sobre las características estudiadas. Además, se concluyó que el uso de acetona es recomendado

en casos en que la capacidad de flexión sea más importante que la resistencia a la tracción. Se concluye que la factibilidad de fabricación de insertos plantares por FDM está sujeta al comportamiento anisotrópico dependiente de la máquina.

Palabras Claves: Órtesis, manufactura aditiva, inserto plantar, Taguchi, FDM, modelamiento por deposición fundida

ABSTRACT

Data shows that producers of orthosis in Chile cannot answer to the requirements of a growing market. In addition, there has been a tendency in developing prosthetics and orthosis with additive manufacturing. Considering the low-cost of 3D prototyping technologies and the improvement in the technology the opportunity of creating a plantar insert using fused deposition modeling (FDM) becomes apparent.

To develop the insert, it was necessary to understand how fabrication parameters of FDM affect the Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). Even though literature explores some of these effects, parameters such as number of shells and an acetone vapor bath processing have not been thoroughly studied.

This work seeks to comprehend the effect of layer height, extruding temperature, number of shells and an acetone vapor bath processing in the tensile strength and flexural modulus, in order to fabricate orthosis or plantar insert. To reach this objective, flexural and tensile tests were performed on ABS specimens made by FDM. The experiment was designed using Taguchi's method. The results were analyzed considering main effects, variability, signal-noise ratio and ANOVA analysis. Using the results, a fully functional prototype of the orthosis for the case study was designed, constructed and tested.

It was concluded that layer height is the parameter with the most significant effect in the tensile strength and flexural modulus. On the other hand, acetone processing is recommended only when the flexural behavior is most important than a higher tensile

strength. Finally, it is concluded that the orthosis fabrication by FDM feasibility is subjected to the anisotropic behavior given by the manufacturing machine.

Keywords: orthosis, Taguchi's method, Fused Deposition Modeling, additive manufacturing

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se origina a partir de un caso de estudio en un contexto específico. Sin embargo, la revisión bibliográfica, los objetivos, la experimentación y los resultados pueden ser aplicados de forma general a un contexto más amplio que el contexto específico de origen. En esta introducción se presenta el contexto particular que origina la investigación, para dar paso en los siguientes capítulos al trabajo con el marco general.

El caso de estudio corresponde a una joven de 17 años con una enfermedad llamada polineuropatía. Producto de esta enfermedad progresiva, las personas afectadas necesitan utilizar un inserto plantar en sus pies. Un inserto plantar es un elemento externo que se utiliza para reforzar o corregir el movimiento y estabilidad del tobillo y del pie. En esta introducción se explicará esta enfermedad y las particularidades del caso de estudio para establecer el contexto de la investigación. Además se revisará la fabricación y materialidad del inserto plantar de uso actual y el mercado de insertos plantares chileno, dando paso así a una oportunidad de diseño.

1.1. La enfermedad

El caso de estudio presente expone a una paciente que padece una Polineuropatía Sensitivomotora Desmielinizante Progresiva. En términos simples, esta enfermedad provoca degeneración de los nervios periféricos del cuerpo, los cuales inervan la musculatura de las extremidades. Así, las personas sufren pérdida de la actividad contráctil y por ende el movimiento y en muchos casos de la

sensibilidad. Este daño en los nervios tiene como consecuencia práctica la atrofia muscular a nivel distal de la musculatura de los miembros inferiores y superiores y con ello limitación para ejercer movimientos del día a día de una persona, como caminar, comer y lavarse los dientes (Colomer, 2007). El tipo de neuropatía a tratar en este estudio es la llamada enfermedad de Charcot Marie Tooth. En el año 2001, Patzkó y Shy (2011), junto con afirmar que es la afección neurológica hereditaria más común, estimaron que su prevalencia es de 17 a 40 casos de cada 10.000 personas. Ekins (2015) afirma que su prevalencia es de uno en cada 2500 estadounidenses. Asumiendo una población mundial cercana a las siete mil trescientas millones de personas, esta enfermedad está presente en aproximadamente doce millones de personas. Este resultado, es equivalente al doble de la población total de Santiago. Utilizando la misma proporción, se estima que en Chile hay alrededor de 30 mil personas afectadas por esta enfermedad.

1.2. Particularidades de la paciente

El pie de la paciente sufre de una deformidad conocida como *pie equino varo cavo*. Pie equino corresponde a una deformación del pie en que la punta está posicionada hacia la planta. El pie varo corresponde a la orientación del pie con la planta de éste hacia la línea media del cuerpo. Pie cavo corresponde a una altura del arco longitudinal del pie (al contrario del pie plano), habitualmente producto de la contracción y retracción de la fascia plantar, tejido conectivo que refuerza la

planta del pie y le provee de la capacidad a esta estructura para soportar el peso del cuerpo en la bipedestación y la marcha.

En relación al tratamiento recibido por la paciente, este corresponde a cirugías en su pie y tobillo para corregir las deformidades. De esta forma, a la paciente se le ha realizado un alargamiento del tendón de Aquiles, una cuña bajo el calcáneo y un alargamiento de la fascia plantar para corregir el pie equino, varo y cavo respectivamente. Junto con lo anterior, la paciente tiene trabajo kinesiológico todas las semanas.

El punto más importante para este trabajo respecto al tratamiento recibido, es el uso de dos tipos de insertos plantares de tobillo y pie (OTP). Un tipo corresponde al inserto plantar nocturno, cuya principal función es mantener la posición óptima del pie, manteniendo con mayor longitud los distintos tejidos y así impedir la retracción natural de los dedos y la tendencia al pie equino cavo varo. El otro tipo es el inserto plantar para el uso diario, que tiene como principal función proveer de estabilidad al pie en la bipedestación y la marcha.

1.3. Inserto plantar de tobillo y pie para caso de estudio

1.3.1. Inserto plantar de uso actual

Actualmente, la paciente utiliza un inserto plantar de carácter diurno. Está fabricado de polipropileno, plástico que se caracteriza por una alta resistencia a la tracción y baja densidad. Estos valores corresponden a 25-40 MPa y 0,9 g/cm³. Además, la planta posee una cubierta de *plastazote*, material esponjoso que se utiliza para acolchar el apoyo del pie y disminuir la presión del peso corporal de la

planta del pie dentro de la órtesis. Una imagen de este inserto se presenta en la figura 1-1.



Figura 1-1 Inserto plantar de uso actual

Este inserto plantar fue fabricado por el Taller de Órtesis del Hospital San Borja. Para la fabricación del dispositivo, se utiliza la técnica de termoformado. Es decir, se crea un molde de yeso a partir del pie de la paciente. Luego, se ubica una plancha de polipropileno sobre este molde y mediante altas temperaturas se logra que el plástico tome la forma del pie.

La forma de este inserto plantar, dado el método de fabricación, corresponde a una cobertura del pie de la paciente en su parte inferior, posterior y lateral. Cabe destacar que esta cobertura, al ser basada en un yeso del pie del paciente, no toma la forma necesaria para la corrección del pie.

1.3.2. Requerimientos

La usuaria posee una serie de requerimientos para el uso del inserto plantar de tobillo y pie. Por medio de una exhaustiva investigación en terreno, la cual incluyó entrevistas con expertos, trabajo de observación y trabajo etnográfico aplicado con la paciente, se levantaron una serie de requerimientos para el diseño. Es importante destacar que el trabajo en terreno partió con una etapa de inmersión donde otra alumna de ingeniería (Inés Ortúzar) realizó un levantamiento de rutinas y comportamientos de la paciente. Luego el investigador de magister, quien escribe, sumó información por medio de un seguimiento y visitas a lo largo de un año y medio de tiempo.

El principal requerimiento por parte de especialistas fue levantado a partir de una entrevista con el doctor Carlos Saavedra, médico tratante de la paciente. Este requerimiento corresponde a la estabilidad del tobillo para impedir la supinación del pie. Esto último se refiere al movimiento del pie que lleva la planta hacia afuera o hacia adentro. Junto con esta estabilidad lateral, es también necesario un reforzamiento para apoyar la posición de bipedestación e impedir que la paciente se incline hacia atrás, dado el acortamiento del tendón de Aquiles y del pie equino. Luego, este requerimiento se puede expresar como:

- a) Estabilidad lateral del tobillo y del pie durante la bipedestación y la marcha.

Por el otro lado, los requerimientos por parte de la paciente fueron levantados en entrevista con ella y su familia. Estos requerimientos, completando la lista anterior, son:

b) Adaptabilidad del inserto plantar con el calzado:

Se espera que el inserto plantar pueda ser utilizado con distintos tipos de calzado y sea de fácil instalación y retiro.

c) Comodidad en el sentido de calor y sudoración:

Se espera controlar la sensación de calor de la paciente junto con disminuir la sudoración del pie, que trae como consecuencia la presencia de hongos y mal olor.

d) Ausencia de heridas producto del inserto plantar:

Se espera evitar roces y puntos de presión del inserto plantar sobre el pie para así evitar heridas.

e) Bajo precio:

Se requiere que el precio sea menor al encontrado en el mercado. Esta información se entregará más adelante en este trabajo.

f) Requerimiento estético:

La paciente suele utilizar calzado con poca cobertura, y no se siente cómodo mostrando su inserto plantar. Desea que sea estético a opinión propia.

1.3.3. Relación inserto plantar actual con requerimientos

Una vez listados los requerimientos, tanto del cuerpo médico tratante como de la usuaria y su familia, es posible relacionarlos con el comportamiento exhibido por el inserto plantar de uso actual.

a) Estabilidad lateral y en bipedestación:

Este requerimiento se cumple gracias a la forma y al material del inserto plantar. El desarrollo del dispositivo por termo formado logra una encapsulación total del tobillo, ejerciendo resistencia al movimiento lateral de este.

b) Adaptabilidad al calzado

El inserto plantar de uso actual no es adaptable a varios calzados. Por ejemplo, la paciente no puede utilizar calzado escolar, dado que el inserto no entra dentro de estos zapatos.

c) Calor y sudoración

El inserto plantar actual produce excesivo calor en opinión de la paciente, lo que trae como consecuencias mucha sudoración y aparición de hongos. Esto se ve acentuado en verano, en que la temperatura es mayor.

d) Heridas por roce

El inserto plantar de uso actual produce heridas en los salientes óseos del tobillo, dado el roce entre la piel y el plástico, junto con el calce imperfecto.

e) Bajo costo

El rango de precios del aparato actual es entre \$80.000 y \$120.000 en Chile, considerado alto por la familia de la paciente. Estos son los valores cobrados por el

Taller de Órtesis del Hospital San Borja. El menor valor corresponde a los insertos plantares de menor tamaño y el mayor valor a los insertos más grandes.

f) Estética

La paciente suele evitar el uso del inserto plantar dado que no es considerada estética y evita que lo vean utilizar el aparato.

En conclusión, el inserto plantar de uso actual cumple con el requisito básico, el cual corresponde al requerimiento de estabilidad. Aun así, en término de los otros requerimientos, la paciente no está conforme con el desempeño del dispositivo. Pese a esta disconformidad, la paciente utiliza este inserto dado su cumplimiento básico de requerimiento de estabilidad.

1.4. Inserto plantar en el mercado

En una primera instancia se investigó el mercado local de insertos plantares y órtesis de tobillo pie para encontrar productos que cumplan con todos o la mayoría de los requerimientos de la usuaria. Primero se realizó un estudio del mercado chileno y luego un estudio del mercado internacional.

En Chile, el mercado de órtesis, entre los que están los productores y distribuidores de insertos para pie y tobillo es limitado. La oferta de productos se basa principalmente en órtesis tipo bota para esguinces. Los insertos plantares de plástico que ofrecen soluciones similares al inserto de uso actual de la paciente corresponden a aparatos prefabricados ofrecidos por pocas empresas distribuidoras

Santiago. Entre estas destacan **Doctor's Chioce, L&C Órtesis y Prótesis, Ortoprotec y Ormuces**. En términos de fabricación de órtesis e insertos plantares a medida, hay tres talleres que destacan. Uno corresponde al **Taller de Órtesis del Hospital San Borja**, de donde procede el aparato de uso actual. Los otros dos son el **Taller de Órtesis de Teletón** y el **Instituto Nacional de Rehabilitación Pedro Aguirre Cerda**. Estos tres presentan soluciones similares en cuanto a material y metodología de fabricación. Cabe destacar que la fabricación actual por estos talleres e instituto también se relacionan con una mala experiencia para los pacientes, sobre todo para niños en la etapa de toma del molde, según lo investigado con entrevistas a usuarios y sus familias. Esto se debe a la manipulación de herramientas de trabajo sobre su extremidad.

En el ámbito internacional, destaca **Cascade DAFO**, empresa ubicada en Estados Unidos, quienes fabrican insertos plantares y órtesis para tobillo y pie orientados a distintas enfermedades. Aun así, sólo fabrican productos en serie, por lo que no hay un diseño personal para cada cliente. Estas órtesis e insertos plantares poseen un mejor acabado y algunos tienen mayor flexibilidad. DAFOS tiene convenios en EEUU con las aseguradoras de salud lo que lo hace fácil y conveniente para la adquisición de los pacientes. Además tienen un sistema en línea que permite la compra y entrega inmediata con la respectiva receta médica. Existen algunos centros en Chile que traen estos dispositivos. Sin embargo, considerando el envío y el tiempo de espera, esta opción no es factible para muchas familias.

En conclusión, en Chile hay una limitada oferta de órtesis e insertos plantares personalizados disponibles. Esto se explica dado los costos logísticos de la personalización y la imposibilidad de generar economías de escala. Sin embargo, el crecimiento de las tecnologías de diseño y manufactura digital pueden ser una opción viable para solucionar esta falta de oferta.

1.5. Necesidad de nuevo inserto plantar

Teniendo en cuenta los tres apartados anteriores es posible justificar la necesidad de un nuevo inserto plantar para esta paciente en particular.

En primer lugar, el aparato actual sólo cumple con el requerimiento básico de la paciente, que corresponde a la estabilidad del tobillo en marcha y bipedestación. Los requerimientos de **adaptabilidad, estética, comodidad y bajo costo** no se reflejan en el inserto plantar de uso actual. Aunque este es solamente un caso ejemplo, como equipo de investigación hemos tenido acercamiento a otros casos que exhiben problemáticas similares.

En segundo lugar, considerando el mercado nacional e internacional, la paciente tampoco ve cumplidas sus exigencias en las órtesis e insertos plantares ofrecidos, aun cuando algunos requerimientos podrían estar en un mejor escenario. En ese sentido, mejoraría la situación en relación a los requerimientos de comodidad, pero los requerimientos de estética y costo no se verían satisfechos y hasta podrían verse perjudicados.

Es importante destacar que la paciente se niega a utilizar el inserto plantar diurno actual, dado la incomodidad que le genera. Esta situación es perjudicial para su salud, dado que Pfeiffer et al. (2001), afirman que el uso de inserto plantar es uno de los principales tratamientos para casos de polineuropatía.

Dado los puntos anteriores, es posible afirmar que la paciente necesita un inserto plantar personalizado que cumpla con sus requerimientos específicos y de los médicos tratantes. De esta forma, considerando la edad de la paciente, esta accedería a utilizarlo más seguido, preservando su salud.

1.6. Oportunidad de diseño

Dada la repercusión de la enfermedad en la paciente, junto con la escasa oferta del mercado de inserto plantar, nace la oportunidad de diseñar un inserto plantar personalizado para tobillo y pie. Para esto, se analizará la manufactura de éste a través de manufactura aditiva, gracias a su libertad de geometría, fácil acceso y posibilidades de iteración en el diseño a bajo costo.

2. MARCO TEÓRICO

Para la elaboración del inserto plantar por manufactura aditiva, fue necesario investigar en torno a este y su utilización en la producción de insertos plantares y órtesis de tobillo y pie. Luego se seleccionó el método de manufactura rápida a ser utilizado y se investigó cómo optimizar las características mecánicas de este proceso. Esta revisión se muestra a continuación.

2.1. Manufactura aditiva

Prototipado rápido es un término que hace referencia al proceso de creación rápida de un sistema o una parte que puede ser probada antes de llegar al mercado. Así, es posible encontrar errores y mejoras al diseño con construcciones que representan un uso de recursos mucho menor al del producto final (Gibson et al., 2015). Este proceso comienza con el diseño de un modelo digital tridimensional, lo que se conoce como CAD (Computer Aided Design). Luego, este modelo es manufacturado por la deposición de capas horizontales de material apiladas hasta dar con la geometría deseada. Dado lo anterior, esta tecnología es conocida también como Manufactura Aditiva o AM (Gibson et al., 2015). La manufactura aditiva tiene como ventaja un corto tiempo de fabricación, buena calidad superficial y precisión en la geometría (Kamrani et al., 2015). Un ejemplo de producto fabricado a partir de manufactura aditiva se presenta en la figura 2-1.

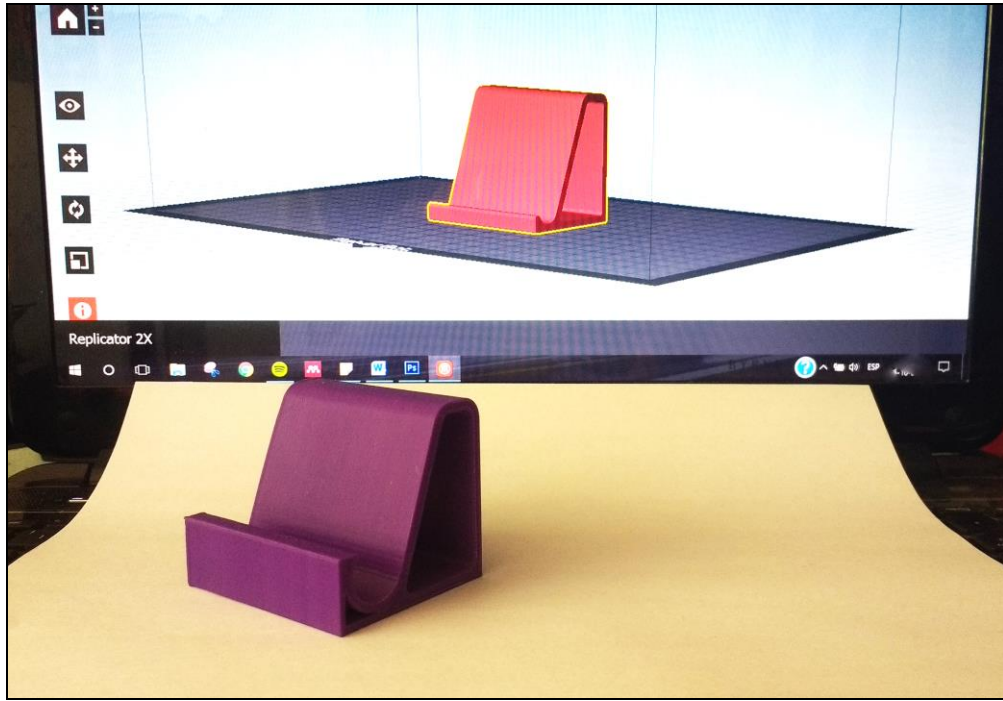


Figura 2-1 Ejemplo de producto por manufactura rápida. Elaboración propia.

En los últimos 30 años se han desarrollado un gran número de metodologías para la manufactura aditiva. Entre estas destacan la Estereolitografía (SLA), el Sinterizado Láser Selectivo (SLS), y el Modelamiento por Deposición Fundida (FDM). Esta última metodología es la que comúnmente se conoce como Impresión 3D. Un esquema con los distintos tipos de manufactura aditiva se muestra en la Figura 2-2.

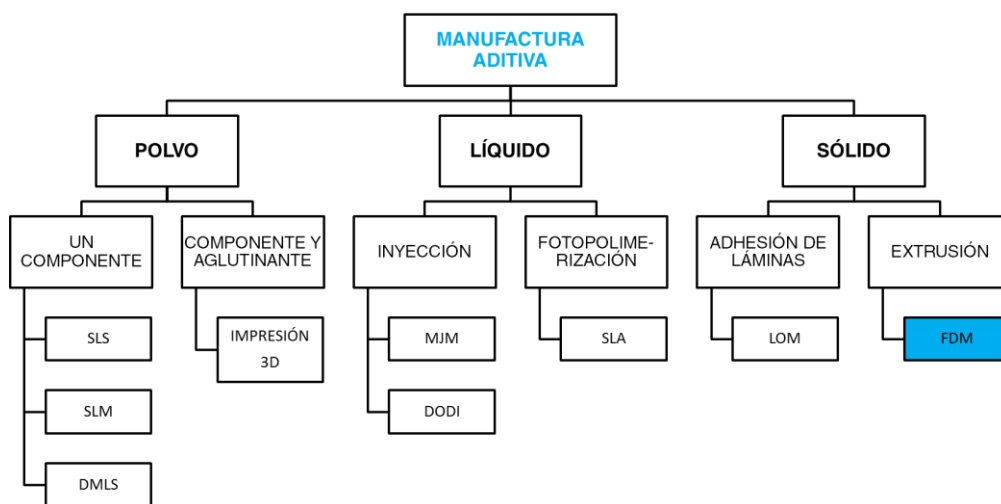


Figura 2-2 Tipos de manufactura aditiva (modificado de Short et al., 2015)

Los avances de estas tecnologías han hecho posible que ahora también sean usadas para producir productos finales (Gibson et al., 2015). Un área que se ha visto muy beneficiada gracias a la producción de productos finales a través de manufactura aditiva es el área de la ortopedia. Dado que las piezas impresas por esta tecnología son fieles al modelo digital y al que el modelo digital es fácilmente modificable por distintos softwares, ha sido posible fabricar órtesis que cumplen con los requerimientos ergonómicos sin la necesidad de un largo proceso de prueba y error al tomar moldes y probar estas órtesis e insertos plantares.

Un número significativo de investigaciones han sido publicadas en torno a órtesis fabricadas por manufactura aditiva. Un objetivo del presente trabajo es diseñar y producir un inserto plantar para un caso de estudio. Dado lo anterior, la

investigación se centró en órtesis de pie y tobillo e insertos plantares producidos por Manufactura Rápida.

Ciobanu et al. (2012) diseñaron y manufacturaron una plantilla de Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) por FDM. Concluyeron que la producción de plantillas por esta tecnología es factible en términos ergonómicos y económicos. Sin embargo, no se profundizó en las características mecánicas de la plantilla. Faustini et al. (2008) desarrollaron una órtesis pasiva-activa mediante SLS. El objetivo era verificar la factibilidad de producción, en términos de imitar la forma de órtesis ya existentes. Concluyeron que es factible desarrollar una órtesis, en términos ergonómicos, con esta tecnología. Mavroidis et al. (2011) diseñaron y fabricaron dos órtesis de tobillo y pie a través de SLA. Demostraron que ambas órtesis se ajustan mejor a la anatomía de los pacientes en comparación con órtesis prefabricadas. Además, afirman que su funcionamiento de las nuevas órtesis fue similar al de las órtesis prefabricadas. Patar et al. (2012) diseñaron una órtesis y fabricaron algunas partes por FDM en ABS y Polipropileno. Realizaron un análisis de costos y de funcionamiento, concluyendo que esta metodología permite reducir costos y que presenta un buen comportamiento. Pallari et al. (2010) diseñaron plantillas para artritis y las manufacturaron a través de SLS. Luego de testear con pacientes, concluyeron que la confiabilidad de esta técnica en términos de función y comodidad fue demostrada. Telfer et al. (2010) diseñaron dos tipos de órtesis para el pie y las fabricaron usando el SLS. Probaron los prototipos con distintos pacientes para analizar el cumplimiento de requerimientos biomecánicos.

Concluyen que la Manufactura Aditiva es factible de usar para el desarrollo de órtesis y que éstas se comportan de forma similar a las prescritas por médicos.

Los trabajos revisados anteriormente hacen evidente la factibilidad de fabricación de órtesis a través de manufactura aditiva en términos biomecánicos y de forma. Sin embargo, es posible observar que el Modelamiento por Deposición Fundida se utiliza sólo en plantillas o en piezas particulares, pero no en geometrías con mayor cobertura de la anatomía de los pacientes. Esto contrasta con el hecho de que el FDM es la tecnología más popular en la gama de la manufactura aditiva. Según un estudio del portal web Think3D de 2014, el modelamiento por deposición fundida corresponde al 85% del mercado de manufactura aditiva (Upputuri, 2014).

2.3. Modelamiento por Deposición Fundida (FDM)

Para el desarrollo del inserto plantar de este estudio, se ha decidido utilizar el modelamiento por deposición fundida, dada la presencia de este proceso de manufactura en el mercado. Esta fuerte presencia se debe a dos principales razones. Primero, a que este proceso tiene un menor costo, tanto de maquinaria como de materiales, en comparación con las otras metodologías expuestas (Pham et al., 1998). Segundo, es una máquina pequeña en comparación a las otras, lo que la convierte en una máquina de escritorio, ideal para hogares y pequeñas oficinas. Dentro de los productores de máquinas de FDM, la más importante es Stratasys, que en el año 2015 controlaba un 49% del mercado de impresoras industriales y profesionales en término de unidades (4.308 unidades). En términos de máquinas

de FDM de uso personal o de escritorio, XYZprinting con su marca da Vinci lideran el mercado con un 17% de participación del mercado (28.300 unidades). Lo sigue 3D Systems, con su marca Cubify, con un 12% del mercado (20.290) (CONTEXT, 2016).

El FDM consiste en una máquina alimentada por un filamento de plástico. Este filamento es calentado hasta su punto de fusión y pasado a través de un extrusor. El extrusor se mueve sobre el plano horizontal depositando una capa acorde a la geometría de la pieza digital a fabricar. Una vez que la capa está lista, la plataforma de impresión en la que se va depositando el material desciende, y el extrusor crea la nueva capa sobre la anterior. Esto se repite hasta lograr la geometría a fabricar, entregada por el archivo CAD. Un esquema explicativo se muestra en la figura 2-3.

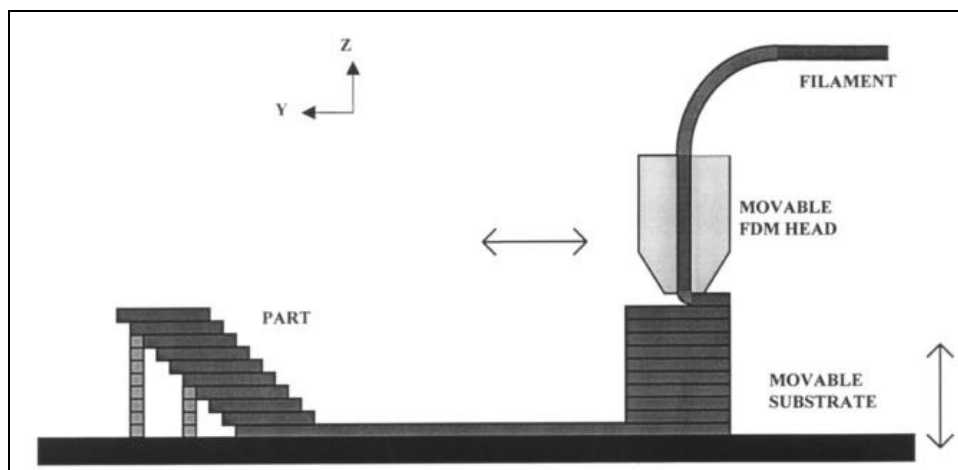


Figura 2-3 Esquema explicativo de FDM (Pham et al., 1998)

Las ventajas de este método son las buenas características mecánicas exhibidas por las piezas y el gran rango de materiales que se pueden utilizar. Las desventajas son el espacio de trabajo reducido, la menor resolución de detalles en el eje vertical y el mayor tiempo de fabricación, en relación a otros métodos de Manufactura Aditiva (Gibson et al., 2015; Wong et al., 2012).

Retomando un punto anterior, el escaso uso del Modelamiento por Deposición Fundida en la fabricación de órtesis a nivel mundial puede ser explicado por las características mecánicas del objeto producido. Estas características son variables, y dependen del material y de la configuración de cada máquina.

2.4. Selección del material

Los dos materiales más usados en el FDM son el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y el Ácido Poliláctico (PLA). De estos dos, se decidió utilizar ABS para la producción del inserto plantar por tres razones:

- El ABS presenta una densidad menor al PLA (1.05 g/cm³ vs 1.25 g/cm³). Esto es importante dado que se busca que el inserto plantar tenga el menor peso posible a ser levantado por las piernas de la paciente.
- El ABS posee una mayor capacidad de flexión (un menor módulo de flexión) que el PLA (2.1 GPa vs 4 GPa). Esto es importante dado que el pie necesita cierta capacidad de flexión para una correcta marcha.

- El ABS permite tratamiento posterior con acetona para entregar suavidad superficial.

Una comparación se muestra en la Tabla 2-1. En esta comparación se agrega también el polipropileno (PPP), material típico de fabricación de órtesis, para usarlo como referencia en la comparación.

Tabla 2-1 Comparación ABS y PLA

Material	ABS	PLA	PPP
Densidad (gr/cm^3)	1.05	1.25	0.9
Resistencia a la tracción (MPa)	33	46	35
Módulo de flexión (GPa)	2.1	4.0	1.5
Tratamiento posterior	SI	NO	NO

2.5. Importancia de los parámetros

En el modelamiento por deposición fundida, los parámetros de la máquina son claves en el resultado final del producto. Estos parámetros incluyen la temperatura de extrusión, la altura de capa, el patrón de deposición, la orientación de impresión, el porcentaje de relleno, entre otros. Estos parámetros pueden ser

configurados en la mayoría de las máquinas de FDM. Variar estos parámetros tiene como resultado distintas características mecánicas, calidad superficial y tiempo de fabricación.

Varios estudios muestran la configuración óptima de algunos de estos parámetros para un mejor comportamiento mecánico de las piezas finales producidas en ABS por el método en cuestión. Rodríguez et al. (2001) demostró que la mesoestructura, que es la estructura formada por el relleno, tiene una influencia significativa en la respuesta mecánica de las piezas. También demostró que se obtiene una mayor resistencia a la tracción cuando la pieza es sometida a esfuerzos en la misma dirección que sus fibras. Anitah et al. (2001) estudiaron distintas configuraciones de altura de capa, ancho de deposición y velocidad de deposición para minimizar la aspereza de la superficie. Concluyeron que la altura de capa es el parámetro más influyente para este objetivo. Li et al. (2002) estudiaron el proceso de FDM y las propiedades mecánicas de los prototipos fabricados. Concluyen que diferentes densidades y orientaciones de deposición pueden ser combinadas para alcanzar la resistencia a la tracción requerida. Ahn et al. (2002) caracterizaron algunas de las propiedades anisotrópicas del ABS fabricado a través de FDM. Variaron la orientación de deposición, los espacios de aire, el ancho de deposición, el color del filamento y la temperatura de extrusión. Concluyeron que los espacios de aire y la orientación de deposición son los factores que más influyen la resistencia a la tracción. Lee et al. (2005) probaron diferentes configuraciones de espacio de aire, ángulo de deposición, ancho de deposición y altura de capa para

optimizar el comportamiento elástico de un prototipo de ABS. Concluyeron que el ángulo de deposición y la altura de capa son los factores más significantes para el comportamiento elástico. Torrado et al. (2014) compararon la resistencia a la tracción de probetas fabricadas con ABS puro y probetas fabricadas en ABS reforzado con otros componentes. Determinaron que el ABS reforzado con 5% de TiO₂ fue el con mayor resistencia a la tracción. Finalmente, Ziemian et al. (2015) confirmaron que el aplicar la tensión en la dirección de las fibras plásticas provee de un mejor comportamiento mecánico. Esto lo hicieron a través de ensayos de tracción y fatiga. Además, proponen que, cuando la tensión no es siempre constante en dirección, la configuración óptima de deposición es en *criss cross*, es decir una capa en 45° y la otra en -45°.

2.6. Uso de acetona

Una característica importante del ABS, es que este reacciona al tratamiento con algunos químicos, como la acetona (dimetil-cetona). Este químico derrite la superficie del plástico, dándole una textura suave al tacto.

Algunos estudios muestran el impacto que tiene el realizar un post-procesado de acetona en las características mecánicas del ABS. Galantucci (2009, 2010) muestra que un procesamiento del ABS a través de inmersión en acetona disminuye la rugosidad superficial. Junto con esto, tiene como consecuencia una disminución menor de su resistencia a la tracción y aumenta en ductilidad. Percoco et al. (2012) estudiaron el efecto de la inmersión en acetona sobre la resistencia a la compresión

de probetas de ABS. Concluyeron que este proceso mantiene intactas las características mecánicas del material. Finalmente, Garg et al. (2016) estudiaron el efecto de un post-procesado con vapor frío de acetona sobre la resistencia a la tensión y flexión de probetas de ABS. Ellos concluyeron que hay una reducción marginal de estos valores.

2.7. Importancia del estudio

La bibliografía revisada entrega cierta noción sobre el efecto de la variación de algunos parámetros sobre las características mecánicas del ABS fabricado a través de modelamiento por deposición fundida. De esta forma, se conoce la orientación adecuada de impresión para obtener mayor resistencia, así como la necesidad de disminuir los espacios de aire en la estructura interna para que esta característica mecánica no se vea perjudicada. Junto con lo anterior, se comprende el efecto que tienen dos técnicas de procesado con acetona (inmersión y vapor frío) sobre la calidad superficial de las piezas producidas por ABS.

Sin embargo, hay un vacío en la literatura que debe ser cubierto. En primer lugar, no se explica el efecto que tiene la interacción de distintos parámetros sobre las características mecánicas. En los estudios revisados, se asume nula interacción entre los parámetros. Sin embargo, puede que ciertas interacciones de estos tengan efectos significativos sobre las características mecánicas, y que no se comporten de forma independiente. Segundo, hay parámetros, como la cantidad de *shells* a usarse que no han sido cubiertos en los estudios. Los *shells* son las fibras

exteriores que se depositan para contener el relleno de la pieza y entregar la precisión geométrica. Puede que estos *shells* tengan un efecto importante en la resistencia y flexibilidad de las piezas. Tercero, no se ha revisado el efecto de un procesado con una tercera técnica, el vapor caliente de acetona, sobre las características mecánicas del ABS.

Para el presente estudio, es necesario conocer cómo los parámetros que se pueden variar en la mayoría de las máquinas de FDM afectan tanto la resistencia a la tensión como el módulo de flexión del ABS. Lo anterior está dado a que estas cargas son las que se efectuarán sobre el diseño final del inserto plantar. Además, dado que el tratamiento con acetona entrega una mejor calidad superficial, que aumentará la comodidad en la interacción con el pie, es necesario comprender el efecto que este procesamiento tiene sobre las características mecánicas y cómo éste proceso interactúa con los otros parámetros.

Junto con lo anterior, es importante destacar que los descubrimientos de esta investigación podrán ser utilizados en la elaboración de cualquier elemento fabricado por FDM en ABS. Así, en los próximos capítulos la investigación será más general y no sólo acotada al contexto específico explicado en la introducción. Este contexto específico se retomará en el capítulo 7, en el que se aplicarán los descubrimientos de la investigación en el caso específico con el que comienza este trabajo.

.

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. Hipótesis

Es posible aumentar la resistencia a la tracción y disminuir el módulo de flexión del ABS fabricado por Modelamiento por Deposición Fundida a través de la variación de parámetros de trabajo y el uso de vapor de acetona.

3.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es optimizar las características mecánicas del ABS por modelamiento por deposición fundida para la producción de órtesis e insertos plantares.

Los objetivos específicos son:

- a) Comprender el efecto que tiene la variación de parámetros de fabricación, como la altura de capa, la temperatura de extrusión y el número de *shells* en la resistencia y flexibilidad del ABS.
- b) Comprender el efecto que tiene el baño en vapor de acetona en la resistencia y flexibilidad del ABS.
- c) Crear indicaciones de impresión para el desarrollo de productos finales con ABS

4. METODOLOGÍA

Para lograr comprender el efecto de los parámetros de FDM y el uso de un baño en vapor de acetona sobre las características mecánicas del ABS impreso, se decidió realizar ensayos de tracción y flexión bajo distintas configuraciones. Para esto, se seleccionaron los parámetros relevantes a estudiar y se utilizó la Metodología de Taguchi en el diseño del experimento. Estos puntos son explicados a continuación.

4.1. Selección de parámetros

Para realizar el estudio, se seleccionaron cuatro parámetros. Estos cuatro parámetros fueron estudiados en dos niveles. Esto quiere decir que se seleccionaron dos valores para cada uno de estos parámetros. En la tabla 4-1 se muestran los parámetros seleccionados y sus niveles.

Tabla 4-1 Parámetros y niveles

Símbolo	Parámetro	Unidad	Nivel 1	Nivel 2
A	Acetona	-	SI	NO
B	Temperatura de extrusión	°C	220	240
C	Altura de capa	Mm	0,1/0,2	0,3
D	Shells	-	1	3

Para la altura de capa, el Nivel 1 ha sido señalado como 0,1/0,2 mm. Esto se refiere a que, para el ensayo de tracción, el nivel 1 corresponde a 0,1 mm de altura

de capa y para el ensayo de flexión, el nivel 1 corresponde a 0,2 mm. Esto se decidió en base a que al fabricar las probetas de tracción, la impresión al 0,1 mm de altura de capa falló constantemente. A continuación se explican los parámetros considerados y los excluidos.

4.1.1. Parámetros considerados

Los parámetros considerados fueron:

- procesamiento con vapor de acetona
- temperatura de extrusión
- altura de capa
- cantidad de *shells*.

a) Procesamiento con vapor de acetona

El procesamiento con vapor de acetona se decidió utilizar dado que esta técnica produce una reacción química en la superficie del material, suavizando la unión de capas y dándole así un acabado superficial suave. Este proceso de suavizado cobra relevancia pensando en el constante roce que los insertos plantares tienen con el pie de la paciente. Se decidió utilizar la técnica de baño con vapor de acetona dado que utiliza menor cantidad de este químico que la técnica de inmersión, disminuyendo los costos. Esto dado que la técnica de inmersión en acetona implica sumergir la pieza a procesar en el químico, utilizando así un gran volumen de este, mientras que el baño con vapor de acetona utiliza una pequeña cantidad que se evapora y recubre al objeto. Además, la técnica de baño con vapor caliente de

acetona es un proceso más rápido que el baño con vapor frío del mismo material. Para este último, se coloca papel nova humedecido con acetona alrededor de un recipiente y se coloca el objeto en medio. Se deja trabajar a la acetona por 8 horas sobre el objeto y luego se deja secar al aire. Así, este proceso toma alrededor de 12 horas por pieza fabricada. El proceso con baño de vapor caliente, en cambio, toma pocos minutos de trabajo con el vapor. El tiempo de secado es similar.

Por ahora, el efecto que tenga el vapor de acetona sobre las características mecánicas es incierto. Por un lado, puede que esta reacción permita una mejor unión de las capas de fabricación, evitando así fallas por separación de estas, lo que aumentaría la resistencia. Por otro lado, es posible que la reacción química afecte la estructura interna de material, produciendo fallas que se propagarán, disminuyendo así la resistencia. La revisión bibliográfica no entregó información del efecto del baño con vapor de acetona sobre piezas de ABS.

b) Temperatura de extrusión

La temperatura de extrusión, según la literatura revisada, no presenta gran efecto sobre la resistencia a la tracción. Sin embargo, estos estudios se hicieron asumiendo nula interacción entre parámetros. Para este estudio, las interacciones serán tomadas en cuenta, y es de esperar que la temperatura de extrusión tenga alguna interacción importante con la altura de capa. Junto con lo anterior, no hay estudios que muestren el efecto de la temperatura de extrusión sobre la capacidad de flexión de las piezas de ABS.

Es importante comprender que el valor nominal de la temperatura de extrusión utilizada no será tan significativa, ya que este valor puede estar alterado producto de diferentes calibraciones del termopar, elemento que actúa como sensor de temperatura de las máquinas de FDM. Así, repetir exactamente este valor en futuras producciones a través del FDM no será fácil. De esta forma, lo importante en el análisis de la temperatura de extrusión es comprender cómo el alza o baja de ésta influye en la resistencia a la tracción, en el módulo de flexión y en la interacción con otros parámetros.

Los valores de la temperatura de extrusión serán 220°C para el nivel 1 y 240°C para el nivel 2. Se han elegido estos valores ya que están dentro de lo propuesto por los fabricantes de filamento ABS.

c) Altura de capa

La altura de capa hace referencia a la altura de deposición de cada capa horizontal de plástico que va formando la geometría deseada. Así, a menor altura de capa, más fiel es la geometría al archivo digital. Sin embargo, una mayor altura de capa disminuye el tiempo de impresión, dado que una capa de 0,3 mm representa tres capas de 0,1 mm. Para la altura de capa, la literatura menciona que a mayor es el valor, mayor será la resistencia. Esto se explica dado que al existir menos capas, existen también menos uniones de ésta, que son las áreas que presentan menor resistencia y que propagan la falla. Así, es de esperar que una mayor altura de capa otorgue una mayor resistencia tanto a la tracción como a la flexión.

Para la altura de capa, es interesante también analizar como interactúa éste parámetro con el uso de vapor de acetona y la temperatura de extrusión. Los valores fueron diferentes para los ensayos de tracción y los de flexión. Para los ensayos de tracción, el nivel 1 corresponde a 0,1 mm de altura de capa. El nivel 2 para estos ensayos corresponde a 0,3 mm. Para los ensayos de flexión, se utilizó 0,2 mm como valor para el nivel 1 y 0,3 para el nivel 2.

d) *Shells*

Los *shells* son las fibras continuas que rodean el relleno por capa. Estas se extruden primero y luego se extrude el relleno. Un esquema explicativo se presenta en la figura 4-1.

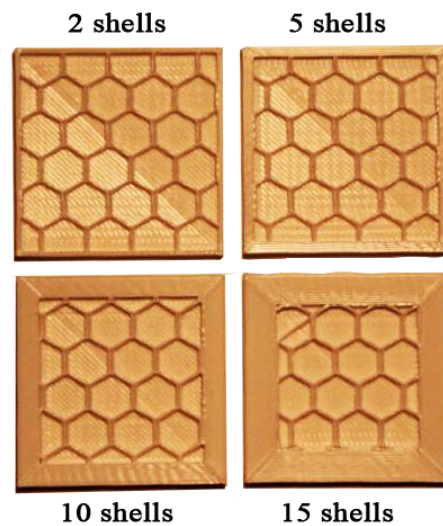


Figura 4-1 Esquema de *shells*. Imagen modificada (Enabling the Future, 2014)

La función principal de los *shells* es conservar la geometría exterior. Sin embargo, es posible que tengan repercusión en la resistencia a la tracción y la capacidad de flexión. Los valores serán 1 *shell* para el nivel 1 y 3 *shells* para el nivel 2.

4.1.2. Parámetros no considerados

Los principales parámetros no considerados fueron:

- orientación de deposición
- ángulo de deposición
- temperatura ambiente.

La revisión bibliográfica demuestra que la orientación de deposición, es un parámetro altamente estudiado. Se recomienda que la fuerza no se ejerza perpendicular a las capas horizontales, dado que esto incentiva la falla y otorga menos resistencia. Se recomienda que la fuerza se ejerza a lo largo de las fibras de plástico (Lee et al., 2005; Rodríguez et al., 2001).

El ángulo de deposición, conocido en inglés como *raster angle*, es la orientación del relleno. La configuración de este ángulo es posible de realizar en los softwares de FDM. En esta investigación, este parámetro no será considerado ya que la literatura explica que la mejor configuración para el caso en que las cargas no son constantes en dirección, como el caso del inserto plantar a ser fabricado, es en *criss cross*. Este concepto se refiere a la deposición de capas en 45° y -45° una sobre otras. Un esquema explicativo se presenta en la figura 4-2 (Ahn et al., 2002; Ziemian et al., 2015).

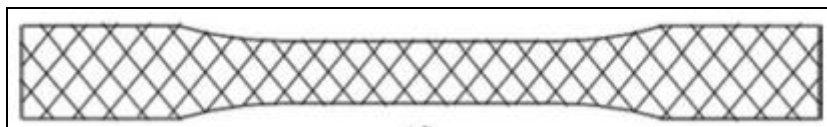


Figura 4-2 Orientación de deposición tipo *criss cross* (Ziemian et al., 2015)

La temperatura ambiente no fue considerada dado que es de difícil control. La temperatura de la habitación, las corrientes de aires, la aislación de la máquina y los diferentes gradientes de temperatura dentro del espacio de trabajo influyen en la temperatura ambiente, entregándole mucha variabilidad a éste parámetro.

4.2. Metodología de Taguchi

Para diseñar los experimentos de tracción y flexión se decidió utilizar la metodología de Taguchi. Esta es una metodología estadística creada por el japonés Gen'ichi Taguchi en la década de 1950 para la optimización de calidad de procesos de producción y de los productos finales (Lochner et al., 1990). Dentro de sus postulados, está su diseño de experimentos, que permite la obtención de diseños más robustos y con menos variabilidad. Además, permite comprender el impacto de distintos factores sobre la característica buscada.

El diseño de experimentos de la metodología de Taguchi se basa en dos partes. Primero, en la creación de arreglos ortogonales que permiten simplificar los experimentos. Así, es posible alcanzar todo el espacio de los parámetros en menor cantidad de pruebas que en un diseño factorial de experimentos. Esto permite un ahorro de costos y tiempo para experimentos con varias combinaciones de niveles de parámetros, como el caso de estudio actual.

La segunda parte del diseño de experimentos de la metodología de Taguchi es el análisis de resultados. Este análisis es llevado a cabo a través de varias herramientas. En primer lugar, se utiliza en análisis de efectos principales, que muestra a grandes rasgos cómo los diferentes factores o parámetros afectan las características estudiadas. En este análisis es posible observar también el efecto que tienen las interacciones de los parámetros.

La segunda herramienta es el análisis de variabilidad. Junto con analizar la variabilidad de cada configuración, este análisis ayuda a identificar las variables que son más significantes en la variabilidad de los resultados.

Un tercer análisis a realizar corresponde al radio señal-ruido. Este análisis entrega un entendimiento de la sensibilidad de la característica en relación a los parámetros. El radio de señal ruido está compuesto por la media de los ensayos (señal) y la variabilidad de estos (ruido). Así, a mayor radio señal-ruido, más robusta será la configuración. Junto con esto, es posible observar cómo los parámetros afectan individualmente esta relación. Este análisis es importante dado que permitirá identificar las combinaciones más robustas, es decir con mayor resistencia y flexibilidad y menor variabilidad, para fabricar de forma óptima el inserto plantar.

Finalmente, el cuarto análisis a realizar es en análisis de varianza, conocido como análisis ANOVA (*Analysis of Variance*). Este análisis ayuda a identificar las variables que son estadísticamente más significantes en las características estudiadas. Permite identificar cuales se deben considerar como relevantes e indica el porcentaje de contribución de cada factor sobre esta característica. La metodología en su totalidad será replicada para el ensayo de tracción y el ensayo de flexión.

4.3. Arreglo Ortogonal

Para diseñar el experimento, se utilizó un arreglo ortogonal L8 de Taguchi. Éste fue creado usando el software Minitab. Cuatro columnas fueron configuradas

según los parámetros y otras tres columnas fueron dispuestas para analizar la interacción entre los factores. Dado el uso de un arreglo ortogonal, algunas interacciones pueden confundirse entre ellas. Estas están denotadas con un signo ‘=’ entre las interacciones. Los ‘1’ y ‘2’ corresponden a los niveles para cada parámetro, presentados en la sección 4.1. Las combinaciones se muestran en la Tabla X.

Tabla 4-2 Arreglo ortogonal para ensayos de tensión y flexión

Run	A: Acetona	B: Temp extrusión	C: Altura capa	AB =CD	AC =BD	AD =BC	D: Shells
R1	1	1	1	2	2	2	1
R2	1	1	2	2	1	1	2
R3	1	2	1	1	2	1	2
R4	1	2	2	1	1	2	1
R5	2	1	1	1	1	2	2
R6	2	1	2	1	2	1	1
R7	2	2	1	2	1	1	1
R8	2	2	2	2	2	2	2

5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.1. Preparación de probetas

Para estudiar el impacto de los parámetros sobre las características mecánicas se realizaron ensayos de tracción y flexión a probetas. Estos ensayos fueron realizados según las normas internacionales ASTM D638-03 y ASTM D790-03 respectivamente (ASTM International, 2004, 2014).

Se realizaron tres réplicas para cada experimento. Cada experimento contó con ocho distintas combinaciones de parámetros. Esto implica que se fabricaron 24 probetas para el ensayo de tracción y otras 24 probetas para el ensayo de flexión.

Las probetas para el ensayo de tracción son del tipo I de la norma ASTM D638-03.

Las probetas para el ensayo de flexión están fabricadas según las medidas propuestas para plásticos termo formables en la norma ASTM D790-03. Los detalles de las medidas de las probetas se presentan en las figuras 5-1 y 5-2.

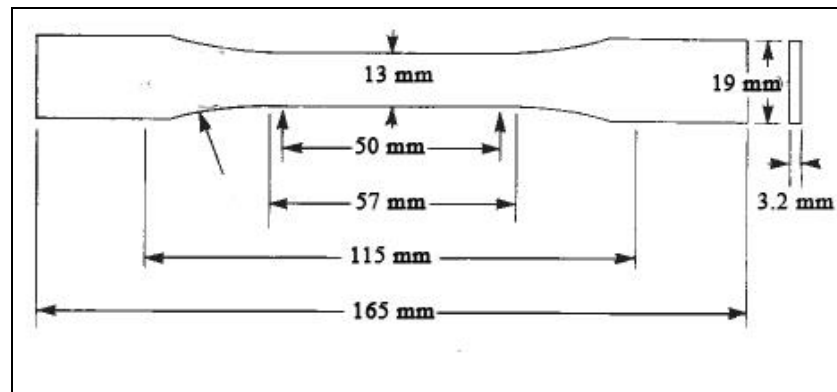


Figura 5-1 Medidas para probeta de ensayo de tracción

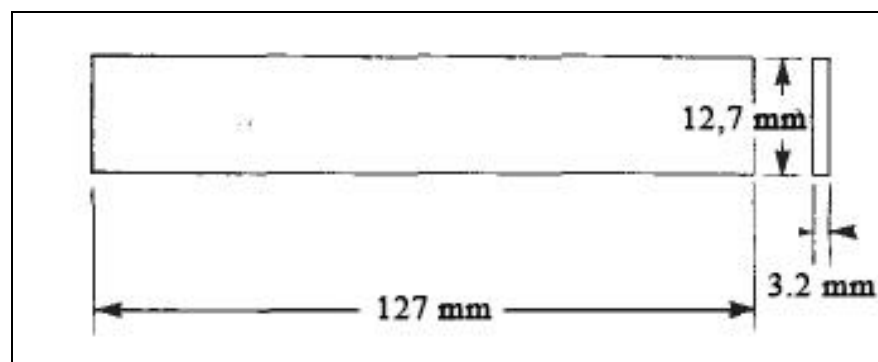


Figura 5-2 Medidas para probeta ensayo de flexión

Las 48 probetas fueron fabricadas en una máquina de Modelamiento por Deposición Fundida (FDM) MakerBot Replicator 2X. Se eligió esta máquina ya que tiene una alta penetración en el mercado latinoamericano. El diseño tridimensional fue realizado en el software Autodesk Inventor 2016. Para la configuración de parámetros y orientación de impresión se utilizó el software MakerBot Desktop. Las probetas se imprimieron con filamento de acrilonitrilo

butadieno estireno (ABS), cuyo diámetro corresponde a 1,75 mm. El fabricante es Shenzhen Esun Industrial Co, Ltda. Las probetas de tracción se imprimieron en filamento naranja y las de flexión en filamento blanco. La plataforma de impresión fue cubierta con *kapton tape* y una mezcla de acetona con ABS para evitar el efecto *curling* típico de este tipo de fabricación. Imágenes con las probetas se presentan en las figuras 5-3 y 5-4.



Figura 5-3 Probetas para ensayo de tracción

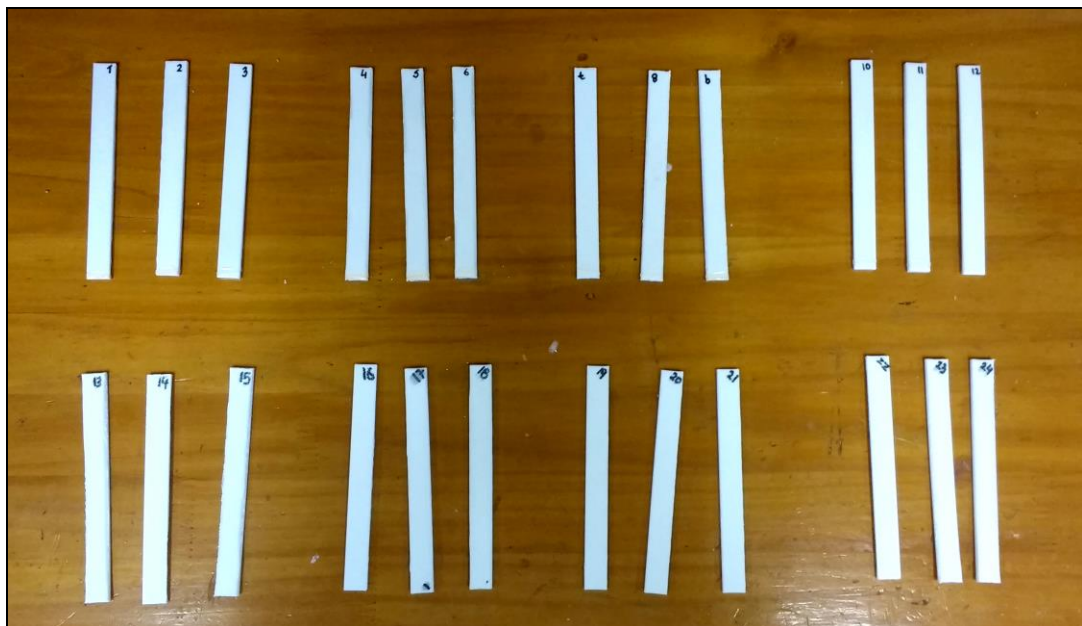


Figura 5-4 Probetas para ensayo de flexión

5.2. Baño con vapor de acetona

Una vez fabricadas, se separaron las probetas que debían ser tratadas con el baño con vapor de acetona. Para realizar este proceso, cada probeta fue sujeta por un alambre dentro de un recipiente de vidrio. Se colocaron 15 ml de acetona en el fondo del recipiente. Esta fue calentada a 100°C durante 150 segundos. El tiempo fue definido a partir de varias iteraciones de prueba. Se observó menos tiempo no era suficiente para tener un efecto visible a lo largo de toda la probeta y más tiempo afectaba a la geometría de ésta. Para mantener la temperatura constante, el jarro de vidrio se colocó sobre agua hirviendo. Una imagen del sistema se muestra en la figura 5-5. La figura 5-6 muestra la comparación entre una probeta tratada con acetona y una no tratada.



Figura 5-5 Sistema de procesamiento con vapor de acetona

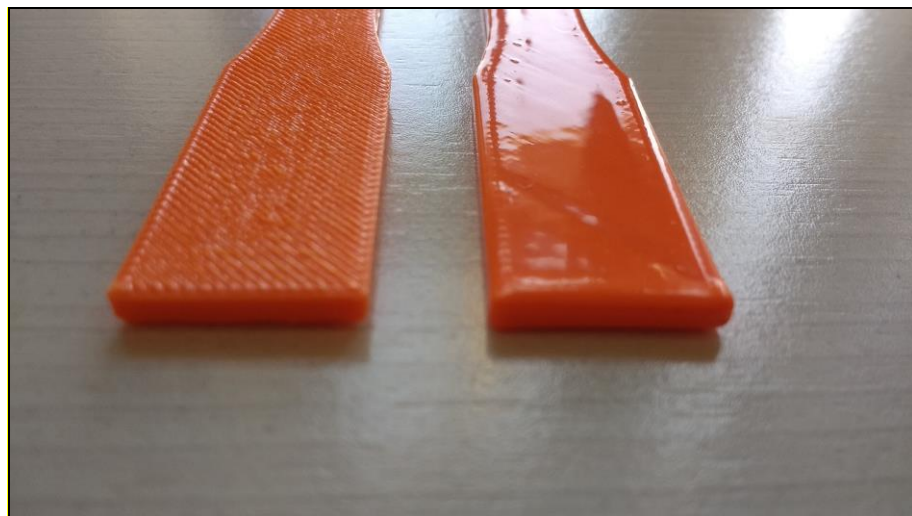


Figura 5-6 Comparación probeta procesada y probeta no procesada con acetona

5.3. Equipamiento y parámetros de ensayo

Los ensayos para ambos tipos de probeta fueron realizados en una máquina Instron 4206 (Figura 5-7) a 25°C. Para el ensayo de tracción, se utilizó una velocidad de 5 mm/min, dada por la norma ASTM D638-03. Las probetas se sometieron a tracción hasta alcanzar la fractura.



Figura 5-7 Máquina Instron 4206

Para el ensayo de flexión, la velocidad de ensayo está dada por la norma ASTM D790-03. Así, la velocidad está dada por

$$R = ZL^2/6d$$

donde R es radio de movimiento en mm/min, L es la separación de los soportes, d el espesor de la probeta y Z el ratio de deformación de la fibra externa, en mm/mm/min. En una primera instancia, Z debe ser igual a 0,01 mm/mm/min. Sin embargo, dado que las probetas alcanzaban su fluencia muy cerca del 5% de deformación de la fibra externa, se decidió utilizar el método B según la norma. Este método utiliza un valor de Z de 0,1 mm/mm/min y su limitación es que sólo debe ser utilizado para obtener el módulo de flexión del material.

Cada ensayo entregó una serie de datos de carga, deformación y tiempo, los cuales fueron traspasados al software Microsoft Excel para su interpretación.

5.4. Obtención de resultados

Para obtener la información de la resistencia a la tracción, se convirtieron las unidades a MPa y mm/mm.

Luego se obtuvo el gráfico de tensión versus deformación, para luego observar el punto máximo y obtener la tensión de fluencia. Dada la forma del gráfico, la tensión de fluencia es la tensión máxima, y ésta será la considerada para el estudio (Roesler et al., 2007).

Para el ensayo de flexión, se convirtieron las unidades a MPa y deflexión. Luego, se graficaron los datos y se tomó la pendiente de la parte inicial de la curva, la cual presenta un comportamiento lineal. Esa pendiente se utilizó en la fórmula

$$E_f = L^3 m / 4bd^3$$

donde E_f es el módulo de flexión, L la distancia entre soportes, b el ancho de la probeta y d el espesor de ésta. Así, el valor del módulo de flexión será el valor relevante para el estudio.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados se obtuvieron ensayando tres réplicas de ocho ensayos para cada experimento. Los resultados fueron analizados con un análisis ANOVA, análisis de variabilidad y un análisis de razón señal-ruido.

Para observar los resultados y poder realizar las asociaciones, se utilizó una tabla de respuesta de la metodología Taguchi. Esta tabla se rellena con los valores obtenidos y permite observar el efecto principal de cada parámetro, junto con otra información relevante.

6.1. Ensayos de tracción

La tabla 6-1 muestra los resultados obtenidos en la tabla de respuestas de Taguchi.

Tabla 6-1 Tabla de respuesta para ensayo de tracción

	Media (MPa)	A: Acetona		B: T° Extrusión		C: Altura capa		AB=CD		AC=BD		BC=AD		D: shells	
Corrida		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	87,38	87,38		87,38		87,38			87,38		87,38		87,38	87,38	
2	82,37	82,37		82,37			82,37		82,37	82,37		82,37			82,37
3	92,24	92,24			92,24	92,24		92,24			92,24	92,24			92,24
4	83,57	83,57			83,57		83,57	83,57		83,57			83,57	83,57	
5	97,21		97,21	97,21		97,21		97,21		97,21			97,21		97,21
6	88,27		88,27	88,27			88,27	88,27			88,27	88,27		88,27	
7	85,99		85,99		85,99	85,99			85,99	85,99		85,99		85,99	
8	90,45		90,45		90,45		90,45		90,45		90,45		90,45		90,45
Total	707,48	345,56	361,92	355,23	352,25	362,82	344,66	361,29	346,19	349,14	358,34	348,88	358,60	345,22	362,26
N° de Valores	24,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12	12	12,00	12,00
Media	29,48	28,80	30,16	29,60	29,35	30,24	28,72	30,11	28,85	29,10	29,86	29,07	29,88	28,77	30,19
Efecto		1,36		-0,25		-1,51		-1,26		0,77		0,81		1,42	

La tabla 6-2 muestra la media de la resistencia a la tracción obtenida para cada corrida. Así, es posible observar a grandes rasgos cuál es la combinación de parámetros que entrega como resultado un mejor comportamiento mecánico.

Tabla 6-2 Resistencia media para ensayos de tracción

Run	Resistencia (MPa)
1	29,13 $\pm$ 0,63
2	27,46 $\pm$ 1,65
3	30,75 $\pm$ 0,67
4	27,86 $\pm$ 1,01
5	32,40 $\pm$ 0,92
6	29,42 $\pm$ 0,63
7	28,66 $\pm$ 0,66
8	30,15 $\pm$ 0,34

Como se ve en la tabla 6-2, la quinta corrida es la que presenta una mayor resistencia a la tracción. La configuración de parámetros para este caso son los siguientes: sin baño de vapor de acetona, temperatura de extrusión en 220°C, altura de capa de 0,1 mm y 3 *shells*. La menor resistencia a la tracción se obtuvo en la segunda corrida. Los niveles para esta corrida son el uso del baño con vapor de acetona, 220°C de temperatura de extrusión, altura de capa de 0,3 mm y 3 *shells*.

Cabe destacar que la resistencia a la tracción de la quinta corrida es un 5,3% superior a la tercera corrida, que fue la que presentó la segunda más alta resistencia. De la misma forma, la resistencia a la tracción de la quinta corrida es un 18% mayor a la resistencia de la segunda corrida, que obtuvo la resistencia más baja. Finalmente, la resistencia de la quinta corrida es un 11,5% mayor a la media de la resistencia de las otras siete corridas.

6.1.1. Análisis de efectos principales

El análisis de efectos principales permite identificar el efecto total de cada variación de los parámetros sobre el resultado final. Además, se muestra el efecto que tiene la interacción de los parámetros estudiados. El gráfico de los efectos principales para los ensayos de tracción se presenta en la figura 6-1. Para la construcción del gráfico de efectos principales, se toma el promedio de los ensayos en nivel 1 y el promedio de los ensayos en nivel 2 para cada parámetro. Esos valores son colocados en los extremos. La diferencia de estos valores equivale al efecto esperado.

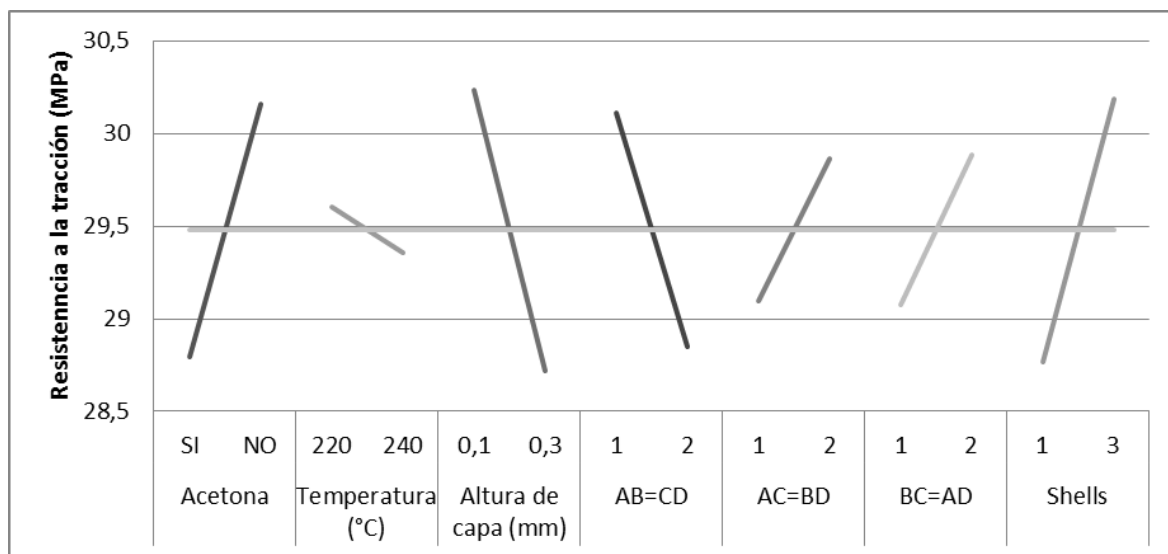


Figura 6-1 Efectos principales de ensayo de tracción

La figura 6-1 muestra que el procesamiento con vapor de acetona, la altura de capa y la cantidad de *shells* tienen un efecto importante sobre la resistencia a la tracción. De esta figura es posible concluir que el baño con vapor de acetona disminuye la resistencia a la tracción. Además, se observa que una menor altura de capa ayuda en el incremento de la resistencia. Junto con lo anterior, se observa que la temperatura de extrusión no tiene un efecto importante sobre la resistencia a la tracción de las probetas.

La figura 6-1 además muestra el efecto de la interacción de parámetros. Se observa en el gráfico que la interacción AB=CD tienen un aporte significativo sobre la resistencia a la tracción. Esto significa que la interacción del uso de acetona con la temperatura de extrusión y/o la interacción entre la altura de capa y la cantidad de *shells* tiene un efecto importante sobre la resistencia.

6.1.2. Interacciones

Para las interacciones antes mencionadas, se crearon gráficos de interacción utilizando los datos obtenidos de los ensayos. Dado que la interacción AB=CD fue la que tuvo mayor efecto sobre el resultado final, se analizarán los gráficos de interacción de AB y de CD. Esto implica que por un lado se revisarán las interacciones del uso acetona (A) y la temperatura de extrusión (B) y por el otro lado, se analizará la interacción entre la altura de capa (C) y la cantidad de *shells* (D). Los gráficos mencionados se presentan en las figuras 6-2 y 6-3.

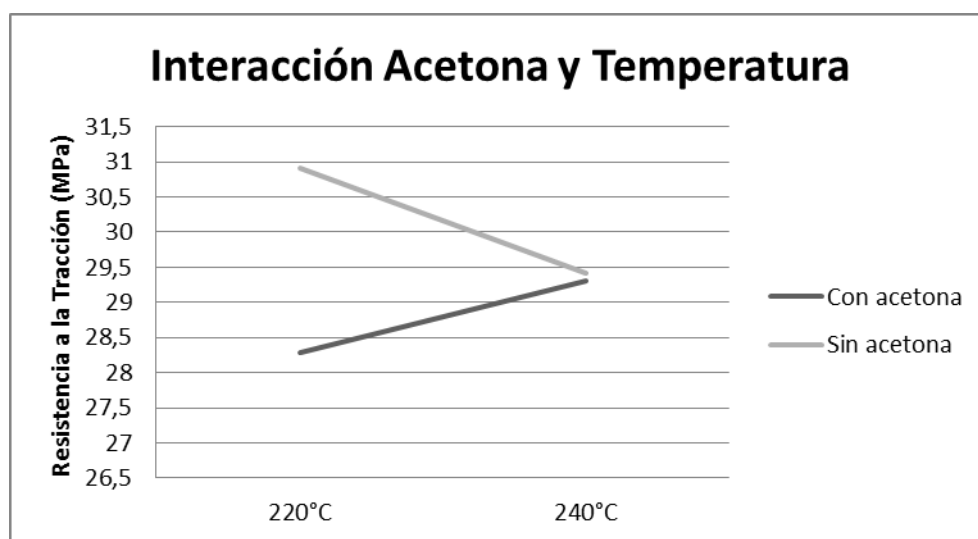


Figura 6-2 Interacción acetona y temperatura de extrusión

De la figura 6-2 se puede observar que el baño de vapor de acetona no tiene un efecto significativo cuando la temperatura de extrusión es de 240°C. Sin embargo, cuando la temperatura de extrusión es de 220°C, al procesamiento con acetona si

tiene un efecto importante. Por un lado, a 220°C y utilizando la acetona, el valor de la resistencia a la tracción disminuye. Por otro lado, si se usa acetona, el valor de la resistencia a la tracción aumenta cuando la temperatura de extrusión es de 220°C. Esto se podría explicar asumiendo que a 240°C de temperatura de extrusión, la unión de las capas es más fuerte, por lo que la acetona no afecta la estructura interna del material. Cuando la temperatura es de 220°C, la unión de las fibras depositadas por la máquina es menor.

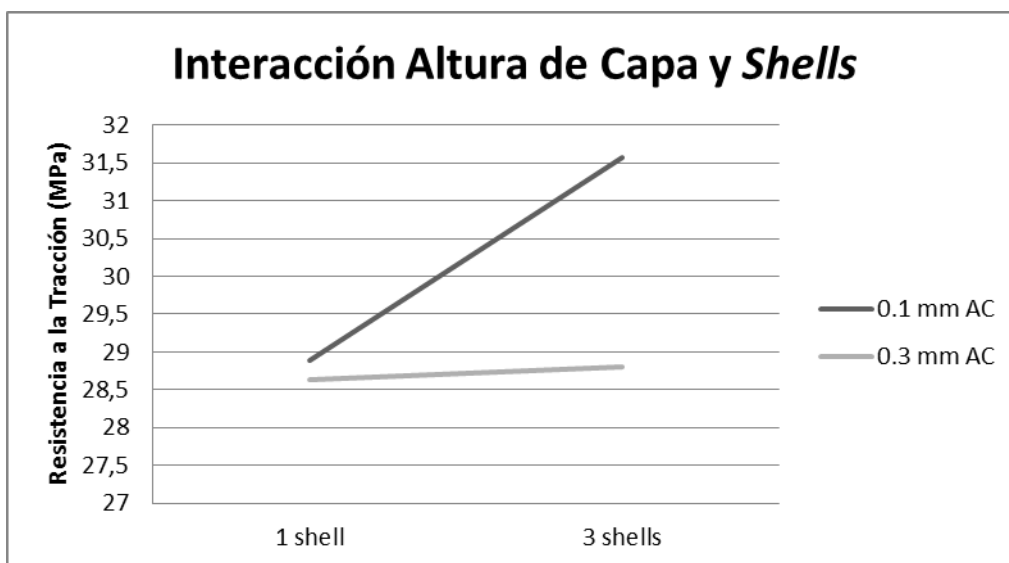


Figura 6-3 Interacción Altura de Capa y Shells

De la figura 6-3 se puede observar que, al usar un *shell* la resistencia a la tracción es similar para 0,1 mm y 0,3 mm de altura de capa. Se observa también que la cantidad de *shells* afecta más para la altura de capa en 0,1 mm que para el mismo parámetro en 0,3 mm. Esto podría explicarse con el área total de la sección transversal cubierta por el plástico. Dado que el filamento tiene una sección

transversal circular o elíptica, la deposición paralela de capas va dejando espacios de aire. Una altura menor de capa dejará menos espacios de aire, aumentando el área cubierta por plástico. En cambio, cuando la altura de capa es mayor, se dejarán más espacios de aire al cubrir menos área. Dado que los filamentos de plástico están dispuestos en la dirección de aplicación de la tensión, es esperable que al mayor uso de *shells*, mayor será la resistencia.

6.1.3. Análisis de variabilidad

Una vez analizados los efectos principales de los parámetros, se procedió a realizar el análisis de variabilidad. En este, se analizó la desviación estándar de cada corrida, además de analizar el efecto que tienen los parámetros sobre la variabilidad. Los resultados se utilizaron de forma logarítmica en base 10 para obtener un acercamiento a una distribución normal. Los resultados de la variabilidad para cada corrida se presentan en la tabla 6-3.

Tabla 6-3 Variabilidad para ensayo de tracción

Run	Log (SD)
1	-0,201
2	0,217
3	-0,172
4	0,004
5	-0,038
6	-0,202
7	0,221
8	-0,474

De la tabla 6-3 se observa que la corrida con menor variabilidad es la octava, la cual corresponde a una probeta sin tratamiento de acetona, extruida a 240°C, con 0,3 mm como altura de capa y 3 *shells*. Por el otro lado, se observa que las corridas con mayor variabilidad son la segunda y la séptima. Estas dos tienen todos sus parámetros distintos: la segunda corrida está procesada con acetona, fue extruida a 220°C, tiene una altura de capa de 0,3 mm y usa 3 *shells*. La séptima corrida tiene el otro valor para cada parámetro.

La quinta corrida, que fue la que obtuvo mayor resistencia a la tracción, tuvo una variabilidad de término medio comparada con las otras expuestas.

A partir de la tabla de respuestas de la metodología Taguchi, es posible obtener también un análisis del efecto de cada parámetro sobre la variabilidad de la muestra. Este análisis se presenta en la figura 6-4.

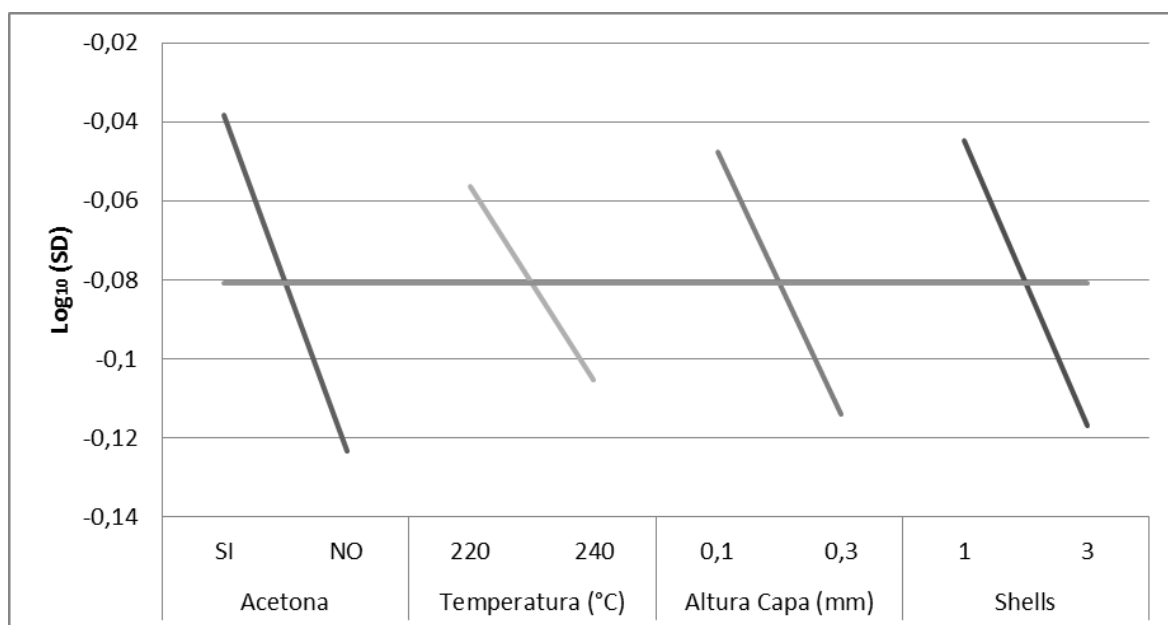


Figura 6-4 Efecto de parámetros en variabilidad para ensayo de tracción

En la figura 6-4 se puede observar que los cuatro parámetros afectan la variabilidad. Analizando cada uno de estos, se puede observar que el uso de acetona aumenta la variabilidad. Esto es de esperarse dado que es un proceso sujeto a factores poco controlables, como la temperatura externa. Además, se observa que la temperatura en 220°C, la altura de capa en 0,1 mm y usar 1 *shell* aumenta la variabilidad.

6.1.4. Análisis de razón señal-ruido

El ensayo de razón señal-ruido es un análisis que ayuda a entender el efecto de los factores de ruido en la característica estudiada. En este estudio, la razón “más grande es mejor” (*bigger-the-better*) se utiliza, dado que se busca que la resistencia a la tracción sea la mayor posible.

Para calcular este radio, se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}$$

donde y_i^2 es el cuadrado del valor para el ensayo ‘i’ y ‘n’ es el número total de ensayos por corrida (3 para este estudio). Así, una razón mayor de señal-ruido corresponde a un diseño más robusto, con menor variabilidad a causa de factores externos.

Los valores de la razón señal-ruido obtenidos se muestran en la tabla 6-4.

Tabla 6-4 Razón señal – ruido para ensayo de tracción

Run	Razón Señal - Ruido
1	29,282
2	28,740
3	29,752
4	28,887
5	30,204
6	29,370
7	29,119
8	29,584

Se observa de la tabla 6-4 que la quinta corrida es la que presenta una mayor razón de señal-ruido. Esto implica que es la corrida con el diseño más robusto. La corrida con menor razón señal-ruido es la número dos. Para comprender esto, el efecto de cada parámetro sobre la razón estudiada se presenta en la figura 6-5.

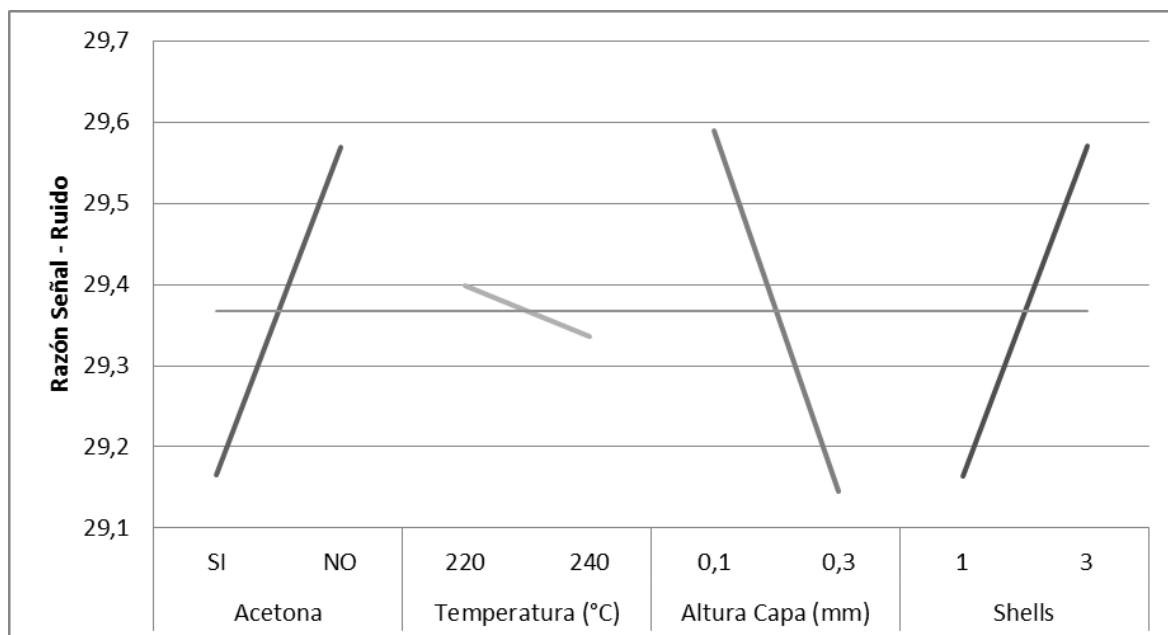


Figura 6-5 Efecto de parámetros en razón señal-ruido para ensayos de tracción

De la figura anterior se observa que el procesamiento por baño con vapor de acetona, la altura de capa en 0,3 mm y el uso de un solo *shell* disminuye la razón de señal-ruido. La temperatura de extrusión no tiene un efecto significativo sobre la razón estudiada.

Este análisis muestra que configurar la altura de capa en 0,1 mm, utilizar tres *shells* y no hacer el procesamiento con vapor de acetona es tanto la configuración con mayor resistencia a la tracción como la configuración más robusta.

6.1.5. Análisis ANOVA

El análisis ANOVA, o análisis de varianza, apunta a evidenciar el aporte de cada parámetro sobre la característica estudiada. En este caso, la característica estudiada

es la resistencia a la tracción. Para hacer esto, se utiliza el test F. En este, es necesario calcular la media cuadrática (E^2) de cada parámetro, la media cuadrática (E^2) del error y los grados de libertad del experimento. La media cuadrática de cada parámetro es simplemente el cuadrado de cada efecto observado. La media cuadrática del error, que corresponde a la variabilidad entre los grupos o corridas, para un experimento replicado como este, está dado por

$$E^2 = 4s^2/N$$

donde s^2 es la media de las varianzas de las ocho corridas y N es el total de ensayos (24 en este caso). Los grados de libertad del error están dados por el número de corridas (8), multiplicado por los ensayos de cada uno menos uno (3-1). Luego, el valor estadístico F de cada parámetro, corresponde a su media cuadrática dividido por la media cuadrática del error.

Para interpretar los números de la tabla 6-5, cada valor F debe ser comparado con el valor F dado por una tabla F de distribución (1,16) para un $\alpha=0,05$. Este valor corresponde a 4,494. Esto significa que, si un valor F para algún número es superior a este número, existe suficiente evidencia para concluir, con un 95% de seguridad, que la variable es significativa sobre la característica estudiada. Junto con lo anterior, es también posible identificar el porcentaje de contribución de cada parámetro sobre la característica. Para esto, basta con dividir el valor E^2 de cada parámetro sobre la suma de los valores E^2 . Los resultados se muestran en la tabla 6-5.

Tabla 6-5 Análisis ANOVA para ensayo de tracción

Factor	E	E2	df	F	Contribución
A	1,363	1,858	1	10,261	29,0%
B	-0,248	0,062	1	0,340	1,0%
C	-1,514	2,291	1	12,652	35,7%
D	1,421	2,019	1	11,147	31,5%
Sin efecto		0,181	16		2,8%

En la tabla 6-5 se observa que el uso de acetona, la altura de capa y el uso de *shells* tienen evidencia estadística de ser parámetros significativos sobre la resistencia a la tracción, al tener un valor F superior a 4,949. Entre estos, la altura de capa es el parámetro más importante, con un 35,7% de contribución. La cantidad de *shells* y el procesamiento con acetona también son relevantes sobre la resistencia, con un 31,5% y 29% de contribución respectivamente. La temperatura de extrusión, en cambio, tiene un valor F de 0,340, por lo que no debe considerarse significativa.

6.2. Ensayos de flexión

De forma similar al ensayo de tracción, los resultados se obtuvieron ensayando 8 corridas de 3 probetas cada una. Los resultados fueron analizados por los mismos métodos que el ensayo de tracción. La tabla 6-6 muestra la tabla de respuestas de la metodología Taguchi para los ensayos de flexión.

Tabla 6-6 Tabla de respuesta para ensayo de flexión

	Resp	A: Acetona		B: T° Extrusión		C: Altura de capa		AB = CD		AC = BD		BC = AD		D: <i>shells</i>	
Run		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	6192,65	6192,65		6192,65		6192,65			6192,65		6192,65		6192,65	6192,65	
2	6708,19	6708,19		6708,19			6708,19		6708,19	6708,19		6708,19			6708,19
3	6457,63	6457,63			6457,63	6457,63		6457,63			6457,63	6457,63			6457,63
4	7205,68	7205,68			7205,68		7205,68	7205,68		7205,68			7205,68	7205,68	
5	6299,18		6299,18	6299,18		6299,18		6299,18		6299,18			6299,18		6299,18
6	7146,00		7146	7146			7146	7146			7146	7146		7146	
7	6907,89		6907,89		6907,89	6907,89			6907,89	6907,89		6907,89		6907,89	
8	7401,62		7401,62		7401,62		7401,62		7401,62		7401,62		7401,62		7401,62
Total	54318,84	26564,2	27754,7	26346	27972,8	25857,4	28461,5	27108,5	27210,4	27120,9	27197,9	27219,7	27099,1	27452,2	26866,6
N° valores	24	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Media	2263,285	2213,68	2312,89	2195,5	2331,07	2154,78	2371,79	2259,04	2267,53	2260,08	2266,49	2268,31	2258,26	2287,69	2238,89
Efecto		99,21		135,57		217,012		8,488		6,413		-10,04		-48,8	

Luego, la tabla 6-7 muestra la media de los módulos de flexión obtenidos para cada corrida.

Tabla 6-7 Media de módulo de flexión

Corrida	Módulo de Flexión (MPa)
1	2064,22 ± 104,61
2	2236,06 ± 34,31
3	2152,54 ± 77,80
4	2401,89 ± 16,59
5	2099,73 ± 121,52
6	2382,00 ± 61,23
7	2302,63 ± 28,86
8	2467,21 ± 46,16

De la tabla 6-7, se observa que la primera corrida es la que posee un menor módulo de flexión. La quinta corrida, que es la que tiene mayor resistencia a la tracción, tiene el segundo menor módulo de flexión. Ambas corridas fueron realizadas a 220°C y con una altura de capa de 0,2 mm. Difieren en el uso de un procesamiento de acetona y de la cantidad de *shells*. Por el otro lado, la octava corrida fue la que mostró un mayor módulo de flexión. Esta corrida está configurada a 240°C, 0,3 mm de altura de capa y tres *shells*.

6.2.1. Análisis de efectos principales

La figura 6-6 muestra los efectos principales para el ensayo de flexión

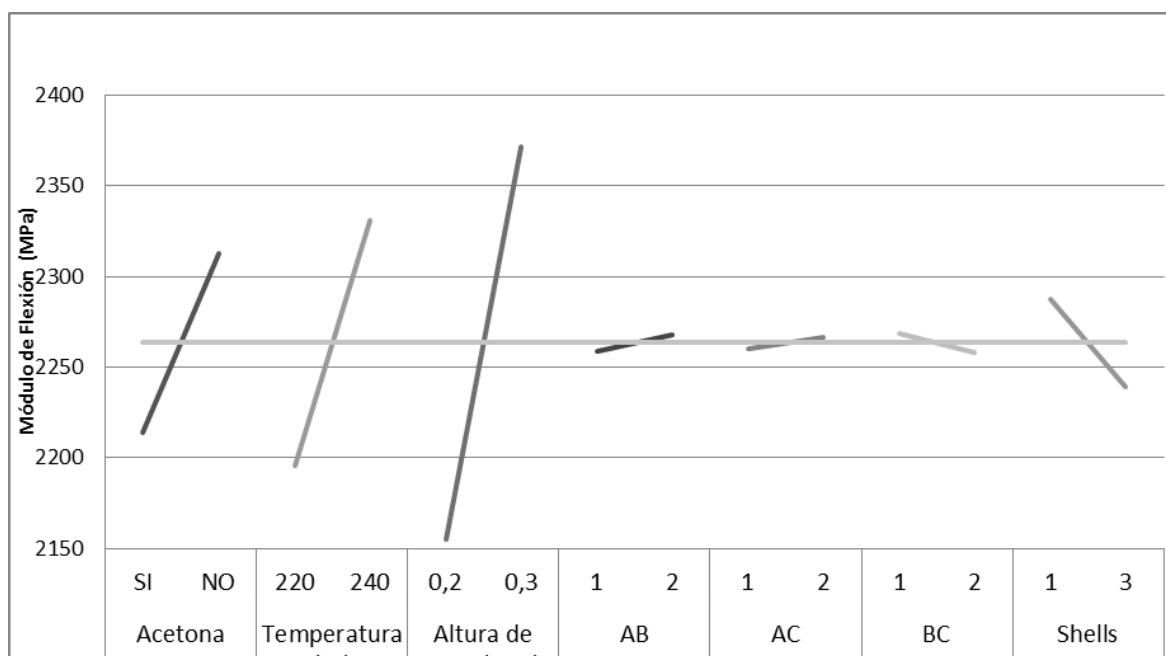


Figura 6-6 Efectos principales en ensayo de flexión

De la figura 6-6 se observa que la altura de capa es el parámetro con un mayor efecto sobre el módulo de flexión de las probetas. Con una mayor altura de capa, se espera un mayor módulo de flexión. El procesamiento con vapor de acetona y la temperatura de extrusión tienen un efecto similar. Se observa que el procesamiento de las probetas con un baño con vapor de acetona disminuye el módulo de flexión de éstas. Además, una menor temperatura de un módulo de flexión menor. La cantidad de *shells* no parece ser significativa.

De la figura 6-6 se observa que no hay efectos importantes de las interacciones. Dado esto, no es necesario analizar los gráficos de interacción.

6.2.2. Análisis de variabilidad

Al igual que para el ensayo de tracción, se procedió a realizar el análisis de variabilidad posterior al análisis de los efectos principales. Nuevamente, la desviación estándar de cada corrida fue elemento de estudio, junto con el análisis del efecto que cada parámetro tiene sobre la característica estudiada. Es importante recordar el uso de la forma logarítmica de los resultados, dado su acercamiento a la distribución normal. Estos resultados se presentan en la tabla 6-8.

Tabla 6-8 Variabilidad en Ensayo de Flexión

Run	Log (SD)
1	2,020
2	1,535
3	1,891
4	1,220
5	2,085
6	1,787
7	1,460
8	1,664

De la tabla 6-8 se observa que la corrida con menor variabilidad es la cuarta, la cual corresponde a una probeta con tratamiento de acetona, extruida a 240°C, con

0,3 como altura de capa y 1 *shell*. Por el otro lado, se observa que las corridas con mayor variabilidad son la primera y la quinta, que coinciden con las corridas con menor módulo de flexión. Ambas corridas fueron fabricadas con 220°C y 0,2 mm de altura de capa. Difieren en que la primera fue procesada con baño con vapor de acetona y se fabricó con 1 *shell*. La quinta, en cambio, no fue procesada con acetona y se utilizaron 3 *shells* en su fabricación.

En la figura 6-7 se presenta el efecto que cada parámetro tiene sobre la variabilidad del ensayo.

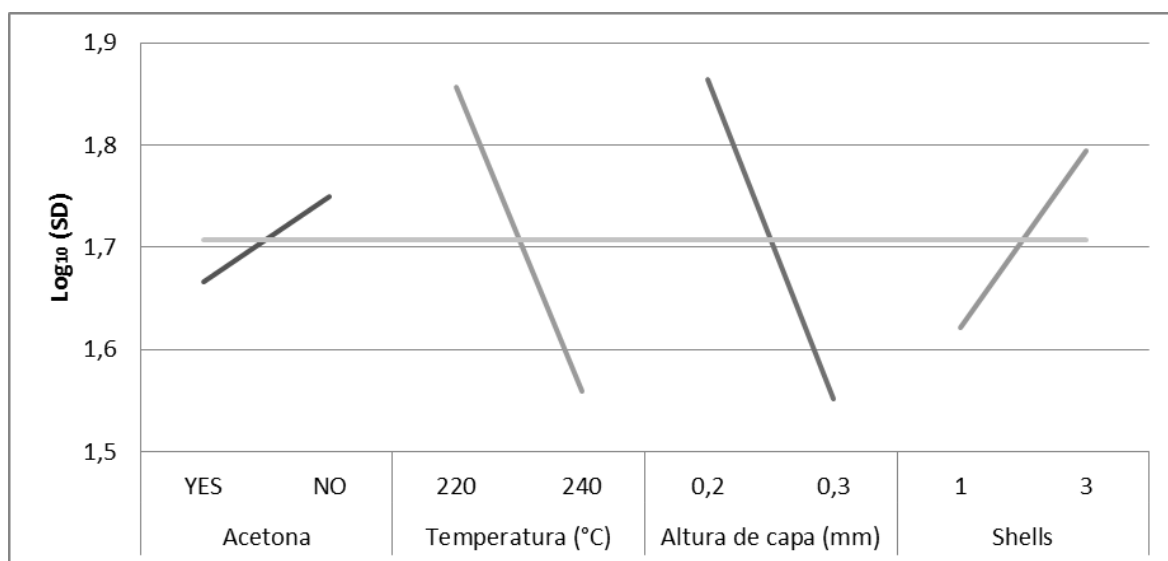


Figura 6-7 Efectos de parámetros en variabilidad para ensayo de tracción

De la figura 6-7 se observa que los dos parámetros que más afectan la variabilidad son la temperatura de extrusión y la altura de capa. Una menor temperatura de extrusión y una menor altura de capa aumentan la variabilidad del ensayo. El uso

de acetona para el procesado y la cantidad de *shells* no parecen ser determinantes para la variabilidad.

6.2.3. Análisis de razón señal-ruido

En el caso del ensayo de flexión, la razón “menor es mejor” (“*lower-the-better*”) es usada. Esto es porque a menor módulo de flexión, más capacidad tendrá el inserto plantar de flexionarse antes de romperse. Dado lo anterior, ahora la razón señal-ruido se calcula con la siguiente expresión:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$$

La tabla 6-9 muestra los valores de la razón señal-ruido para el ensayo de flexión.

Tabla 6-9 Razón señal-ruido para ensayos de flexión

Corrida	Razón Señal Ruido
1	-66,303
2	-66,990
3	-66,663
4	-67,611
5	-66,453
6	-67,541
7	-67,245
8	-67,845

De la tabla 6-9 se observa que la primera y la quinta corrida tienen las mayores razones señal-ruido. Esto implica que estas corridas son las que se pueden considerar como más robustas. Estas dos corridas coinciden con las dos corridas con menor módulo de flexión.

El efecto de los parámetros en la razón señal-ruido para los ensayos de flexión se muestran en la figura 6-8.

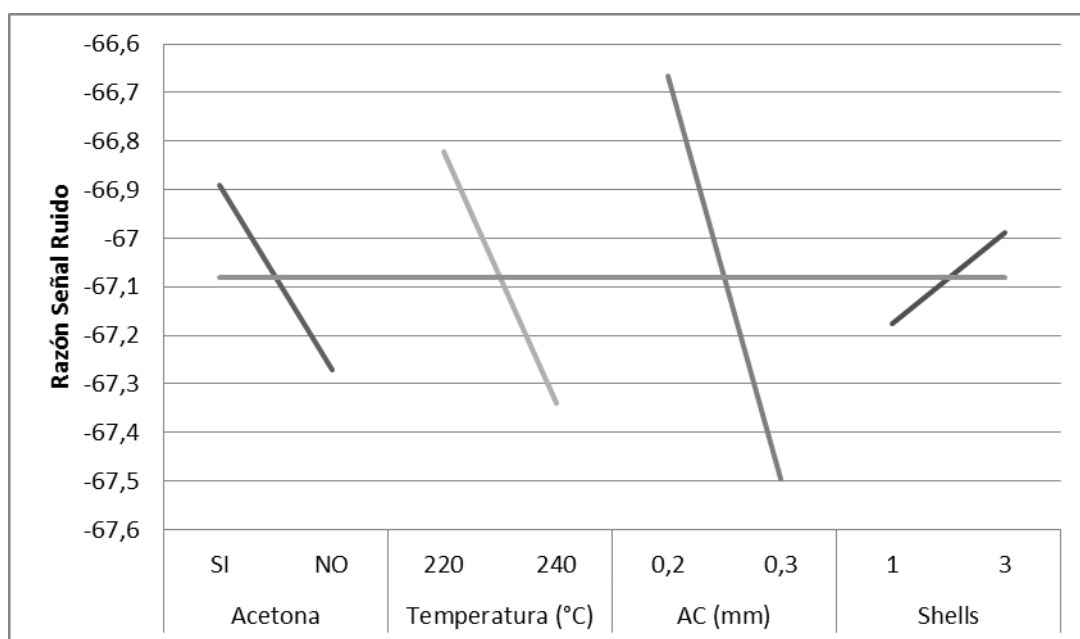


Figura 6-8 Efecto de parámetros en razón señal-ruido para ensayo de flexión

De la figura 6-8, se observa que la altura de capa es el parámetro con un mayor efecto en la razón señal-ruido. Una menor altura de capa ayuda a tener una configuración más robusta. Además, el uso de acetona para el procesado y utilizar

una baja temperatura de extrusión ayudan a la fabricación de un producto con un menor efecto de fuentes externas.

6.2.4. Análisis ANOVA

De forma similar al análisis al ensayo de tracción, se desarrolló un análisis ANOVA para el ensayo de flexión. Los resultados se muestran en la tabla 6-10.

Tabla 6-10 Análisis ANOVA para ensayo de flexión

Factor	E	E2	df	F	
A	99,212	9842,955	1	11,833	12,5%
B	135,567	18378,321	1	22,095	23,4%
C	217,012	47094,063	1	56,617	60,0%
D	-48,800	2381,440	1	2,863	3,0%
No effect		831,804	16		1,1%

De la tabla 6-10, se observa que el procesamiento con acetona, la altura de capa y la temperatura de extrusión tienen una contribución significativa en el módulo de flexión. De estos tres parámetros, la altura de capa es la más importante. Éste parámetro tiene una contribución de un 60%. Los otros dos parámetros mencionados tienen una contribución menor. Para el procesamiento con baño con vapor de acetona, esta contribución corresponde a un 12,5%. Para la temperatura

de extrusión, la contribución es de un 23,4%. La cantidad de *shells* no tiene una contribución importante.

6.3. Resumen de los resultados

En la tabla 6-11 se presenta un resumen de los resultados y valores para cada combinación o corrida.

Tabla 6-11 Resumen resultados por combinación

Corrida	Ensayos de Tracción			Ensayos de Flexión		
	Media (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Razón Señal- Ruido	Media (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Razón Señal- Ruido
1	29,13	0,63	29,282	2064,22	104,61	- 66,303
2	27,46	1,65	28,740	2236,06	34,31	- 66,990
3	30,75	0,67	29,752	2152,54	77,80	- 66,663
4	27,86	1,01	28,887	2401,89	16,59	- 67,611
5	32,40	0,92	30,204	2099,73	121,52	- 66,453
6	29,42	0,63	29,370	2382,00	61,23	- 67,541
7	28,66	1,66	29,119	2302,63	28,86	- 67,245
8	30,15	0,34	29,584	2467,21	46,16	- 67,845

En las figuras 6-9 y 6-10 se puede observar la media y la desviación estándar de cada combinación para cada experimento.

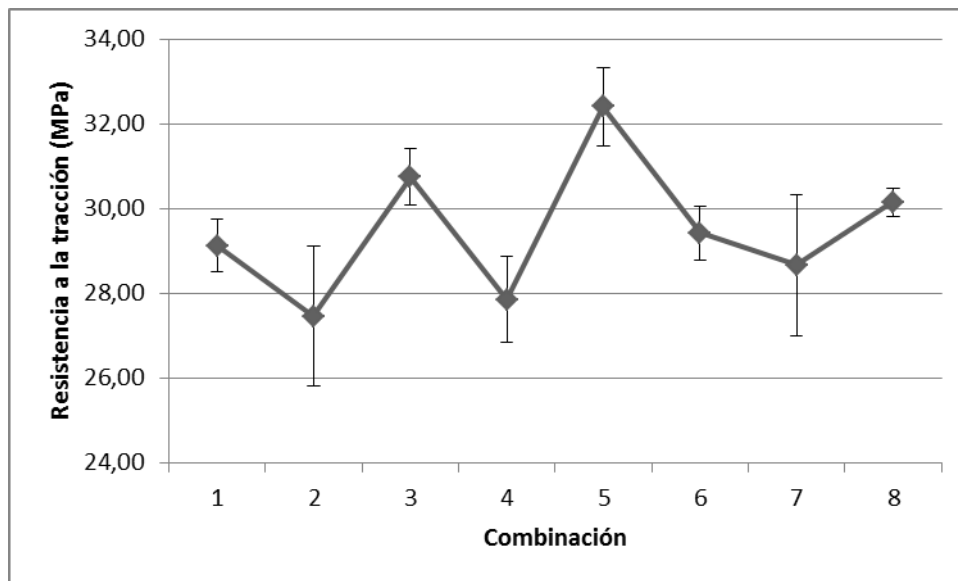


Figura 6-9 Media y desviación estándar para ensayos de tracción

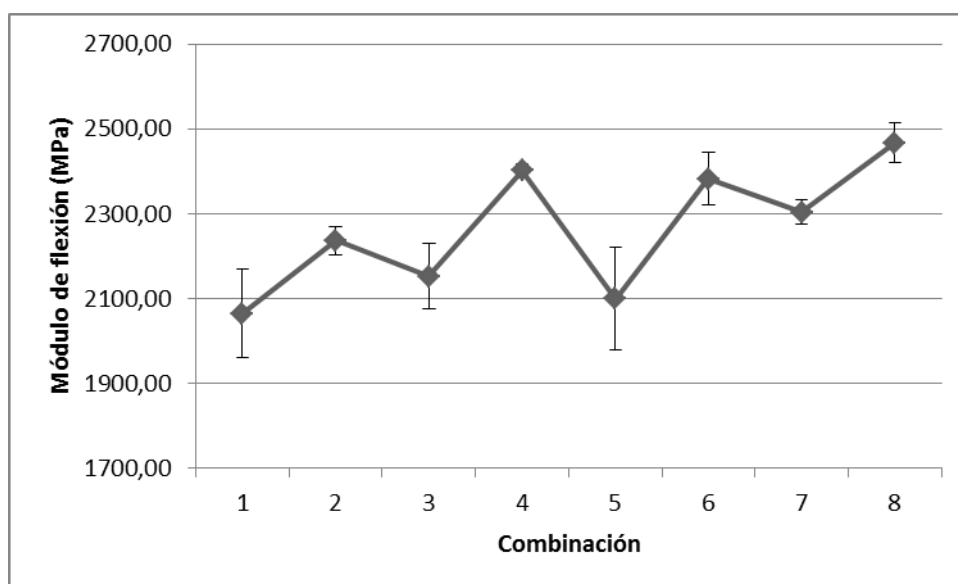


Figura 6-10 Medias y desviación estándar para ensayos de flexión

Finalmente, los porcentajes de contribución de cada parámetro para cada característica mecánica se presentan en la Tabla 6-12.

Tabla 6-12 Contribución de parámetros en características mecánicas

Parámetro	Resistencia a la tracción	Módulo de flexión
Acetona	13%	29%
Temperatura	23%	1%
Altura de capa	60%	36%
Shells	3%	31%

7. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE INSERTO PLANTAR

Para la aplicación de los resultados en un caso real, se diseñó y fabricó un inserto plantar por FDM en ABS para el caso de estudio. Las primeras etapas del diseño del inserto plantar se realizaron en paralelo a la preparación de ensayos. Luego, los resultados de esta investigación fueron usados para la etapa de fabricación, con el fin de tener un prototipo que cumpla con los requerimientos mecánicos y funcionales. Las etapas del diseño y fabricación del inserto plantar son explicadas a continuación.

7.1. Investigación de la paciente

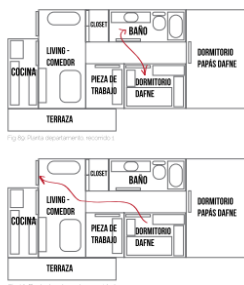
La primera etapa para el diseño y fabricación del inserto plantar fue la investigación acerca de la paciente. Gran parte de esta investigación, como rutinas y recorridos, colores favoritos y un análisis de la producción de órtesis en la historia fue desarrollado por Inés Ortuzar, alumna de la profesora Miranda en un trabajo de Investigación de Pregrado. En este trabajo se utilizaron técnicas de etnografía, tales como la observación participativa, registro de imágenes y entrevistas (Ortuzar, 2014). Un ejemplo de su trabajo se muestra en la figura 7-1.

RUTINAS Y RECORRIDOS

Norma me cuenta que **Dafne tiene muchas personas que la van a ver, y muchísimas actividades que hacer y coordinar semanalmente** (me doy cuenta de esto pues, con mis visitas, yo también paso a ser una actividad más en la pesada semana). Dice que **es una rutina agotadora para Dafne** y que está hablando en el colegio para ver la posibilidad de cerrar el año antes, pues además el pie izquierdo está empeorando cada día más rápido. Antes caminaba a la vuelta del colegio a la casa (6 cuadras) y ahora ya no puede.

rutina de un día normal de semana

La despierta su mamá, se acuesta un rato con ella. Luego va al baño, y vuelve a la pieza. No toma desayuno, solo una leche en su pieza y luego la visten. Una vez que está lista sale del departamento con su papá.



74

Cuando esta lista, camina con su papá al ascensor (aproximadamente 50 metros) y bajan al piso del estacionamiento, donde hay que caminar al auto, el papá le abre la puerta del auto y ella se sube sola.



Fig. 71 Plano edificio, recordo 3

La lleva al colegio "Santa Familia" (a 650 m), se bajan del auto y el papá la lleva a su sala, la deja instalada con todas sus cosas (cuadernos que corresponden y su estuche) y se va.

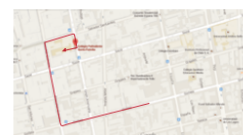


Fig. 72 Mapa de trayecto casa-colegio / www.google.com/maps

"a veces me da vergüenza porque mi papá se queda hasta que yo esté lista a pensar de que ya haya llegado el profesor"

En el recreo se come una colación y va al baño. En la hora de almuerzo se queda en la sala, le llevan de su casa la comida preparada y cortada y la come sentada en la sala. Casi nunca va al patio, dice que sólo si tiene que hablar con algún profesor. Los días martes tiene clases en la sala de arte que queda en un segundo piso, para esto la ayudan a subir, o "le dan el brazo".

Cuando se acaban las clases, se queda parada afuera de su sala hasta que llegue su mamá o su nana para que la vengán a buscar. Antes se iba caminando a su casa, ahora en auto (por su pie izquierdo).

75

Figura 7-1 Trabajo etnográfico (Ortuzar, 2014)

A partir del trabajo de Ortuzar, el investigador realizó el levantamiento de requerimientos que se presenta en este trabajo, a partir de trabajo etnográfico con la paciente y su familia. Además, se realizaron visitas a talleres de órtesis, al médico tratante de la paciente y al equipo kinesiológico que ayuda a la paciente en su rehabilitación.

7.2. Molde

La segunda etapa para la fabricación del inserto plantar fue la creación de un molde del pie de la paciente del caso de estudio. Los objetivos para este molde eran (1) escanearlo para tener un modelo 3D del pie y (2) utilizarlo para hacer pruebas de forma de los prototipos.

Para realizar el molde se utilizó un material de común uso en las clínicas dentales llamado alginato. Este material es un producto químico que se vende en formato de polvo. Al contacto con el agua, se transforma en un gel que solidifica

rápidamente. Esta solidificación da como resultado un material elástico, de características parecidas al caucho.

La forma de utilización fue la creación del gel dentro de un recipiente. Inmediatamente, se pidió a la paciente que coloque su pie dentro del gel. Previamente se le había colocado un aceite al pie de la paciente para facilitar el desmolde. Una vez que el alginato tomó su forma sólida y elástica, se retiró el pie y rápidamente se llenó el vacío con yeso. El recipiente con alginato y yeso en su interior se muestra en la figura 7-2. Se dejó secar por 12 horas y luego se retiró el alginato de alrededor del sólido de yeso. El resultado se muestra en la figura 7-3.



Figura 7-2 Recipiente con alginato y yeso



Figura 7-3 Molde de yeso

7.3. Diseño

Una vez fabricado el molde de yeso, se utilizó un escáner 3D Pizza que entregó modelos tridimensionales de distintas partes del molde. Para unir las partes y crear el sólido, se utilizó el software MeshMixer. Este software, además, permitió disminuir la resolución del modelo, para hacerlo más rápido de procesar en otros software.

Una vez obtenido el modelo del pie, se procedió a realizar un “cascarón” de este modelo mediante el mismo software utilizado anteriormente. El objetivo de este cascarón era tener una cobertura completa del pie para luego diseñar el inserto plantar a partir de extrusiones o cortes sobre ésta, y así asegurar el calce perfecto con el pie de la paciente. Este cascarón se realizó con una separación de 2,5 mm

del pie y tuvo un espesor de 2,5 mm. La primera medida tiene como fin que haya un espacio pequeño entre el pie y partes del inserto plantar para evitar el roce y posteriores heridas. Además, ese espacio será relleno en algunas áreas con material suave para evitar las heridas. La segunda medida fue decidida con el fin de que el nuevo inserto plantar quepa dentro del calzado de la paciente. A partir de esto, varios diseños fueron creados y posteriormente impresos en baja resolución, con el fin de probar la forma, tanto en términos ergonómicos como en términos estéticos.

Los prototipos y los diseños computacionales fueron entregados a Joaquín Hoffmann y Eduardo Peralta, alumnos de la profesora Miranda en el programa investigación de pregrado (IPRE) de la carrera de Ingeniería Civil. Hoffmann realizó un estudio de las zonas de temperatura del pie y Peralta utilizó esta información y los diseños, prototipos e información entregada para diseñar un prototipo avanzado del inserto plantar. Ejemplos del trabajo de ambos se muestran en las figuras 7-4 y 7-5.

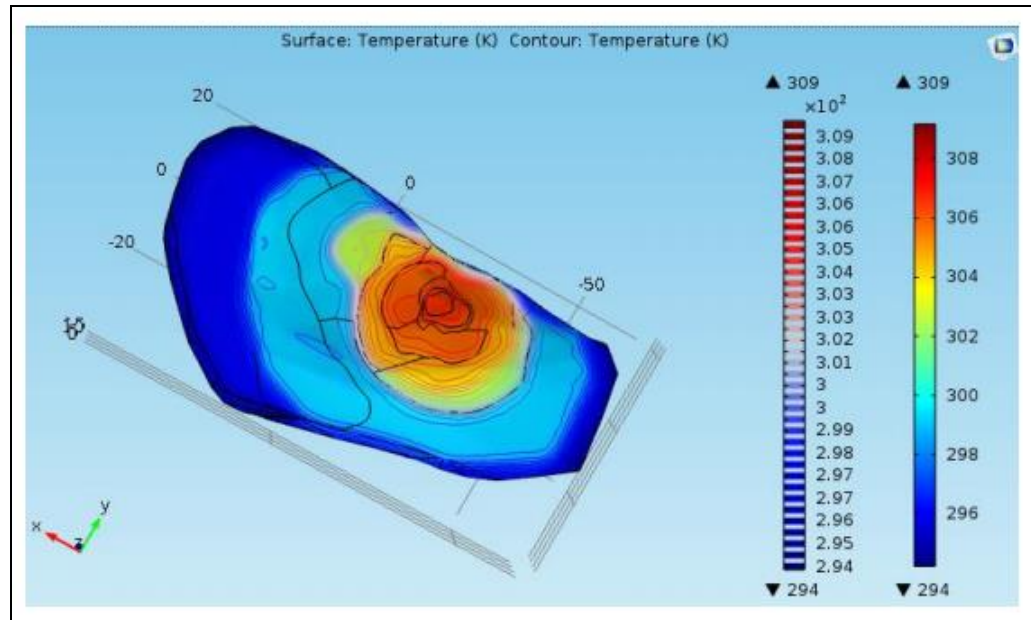


Figura 7-4 Trabajo de Joaquín Hoffmann

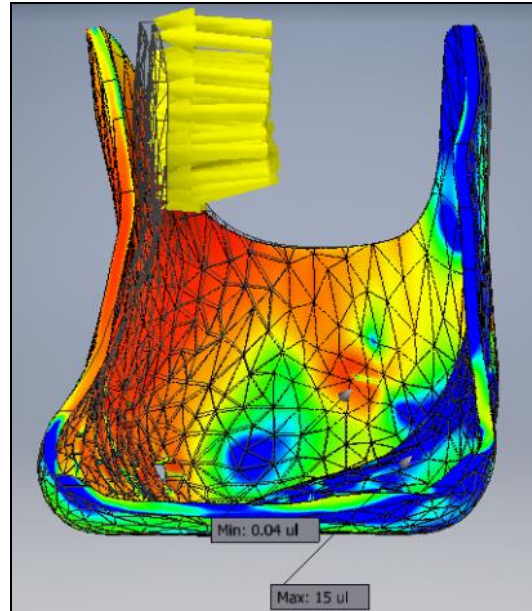


Figura 7-5 Trabajo de Eduardo Peralta

7.4. Fabricación

Una vez realizado el diseño avanzado, se procedió a fabricar dos insertos plantares por medio del Modelamiento por Deposición Fundida (FDM). Un inserto se fabricó en la misma máquina utilizada para fabricar las probetas de tracción y flexión (MakerBot Replicator 2X). El otro inserto fue fabricado con una máquina Zortrax M200. Para ésta máquina también se utilizó ABS como material. Se asumió que para ambas máquinas los parámetros afectarán de la misma forma el rendimiento mecánico. Así, se utilizaron los niveles de parámetros que, según los resultados, harían posible un mejor comportamiento mecánico del inserto plantar. Los parámetros para la fabricación de los insertos se presentan en la tabla 7-1.

Tabla 7-1 Parámetros para fabricar insertos plantares

Parámetro	Valor
Uso de acetona	NO
Temperatura de extrusión	220°C
Altura de capa	0,2 mm
Cantidad de <i>shells</i>	3

Se decidió no utilizar el procesamiento con baño con vapor de acetona, dado que disminuye la resistencia a la tracción, además de ser un procedimiento poco controlable.

La temperatura de extrusión fue configurada en 220°C, al demostrar ser mejor para la resistencia a la tracción.

La altura de capa se configuró en 0,2 mm. Esto se debe a que, según los resultados, una menor altura de capa era beneficiosa tanto para aumentar la resistencia a la tracción como para disminuir el módulo de flexión. Se decidió utilizar 0,2 mm y no 0,1 mm, ya que la experiencia indica que configurar la altura de capa en 0,1 mm suele generar errores de la fabricación. Al ser una fabricación tan complicada, se decidió dejar la altura de capa en 0,2 mm y así minimizar los errores.

La cantidad de *shells* se configuró para que sean 3. Según los resultados, la resistencia a la tracción se ve aumentada al utilizar más *shells*, mientras que el módulo de flexión no se ve afectado por este parámetro.

Junto a lo anterior, se configuró para que el relleno de la pieza sea de un 100%, con el fin de entregar mayor resistencia a la pieza. Otra configuración importante fue la utilización de la opción extra-soportes, recomendada para geometrías complicadas, como la de este caso.

Se decidió utilizar una orientación de impresión con el inserto plantar en diagonal. Así, la separación de capas no quedaría perpendicular a ninguna fuerza natural sobre el inserto plantar, minimizando las probabilidades de falla. Esto se muestra en la figura 7-6.

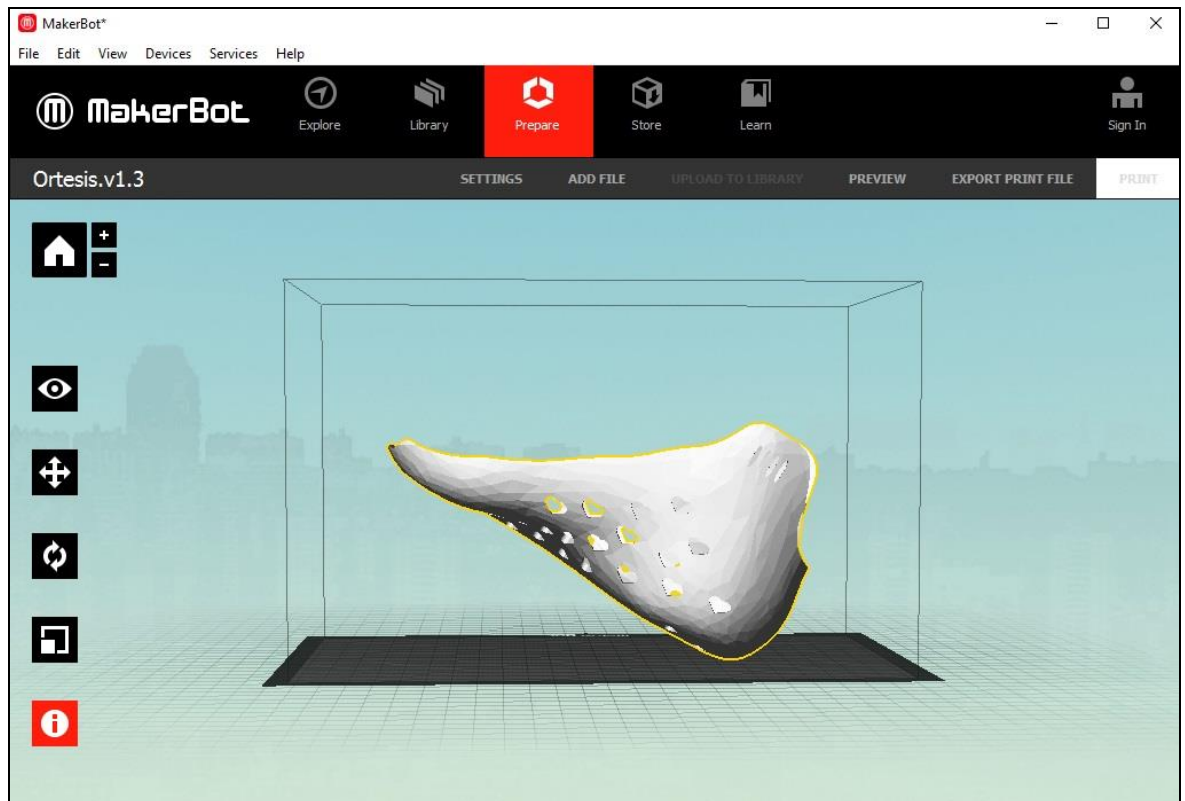


Figura 7-6 Orientación de fabricación

La fabricación tomó 14 horas de fabricación para la máquina MakerBot y 12 horas para la máquina Zortrax. Luego, fue necesario remover el material de soporte y agregar los elementos de comodidad, como las superficies suaves para las zonas de presión. Además, fue necesario lijar ciertas áreas del inserto plantar que podrían ocasionar molestias al usuario.

Imágenes del producto final se presentan en las figuras 7-7 y 7-8.



Figura 7-7 Fabricación de inserto plantar



Figura 7-8 Fabricación final de inserto plantar

7.5. Testeo

Para corroborar el correcto funcionamiento de los insertos plantares, éstos fueron probados con la paciente. En primera instancia se le pidió a la paciente que se coloque los insertos. Para esta prueba, la paciente aseguró sentirse cómoda con ambos productos. La familia de la paciente afirmó que el calce con la zapatilla de

la paciente es un avance en relación al inserto de uso actual, ya que consideraron que la instalación de este nuevo inserto en la zapatilla es más fácil y rápido.

Estéticamente, a la paciente le gustó la forma, el diseño y el color. Luego, se le pidió que camine con el inserto. En esta prueba, el inserto fabricado por la máquina MakerBot falló, produciéndose una fractura de este a la altura del maléolo interno del tobillo. La falla producida fue una separación de las capas de impresión. El inserto producido por la máquina Zortrax no tuvo fallos estructurales durante la marcha. Así, fue entregado a la paciente para una prueba de utilización de 15 días. Una imagen de la falla del inserto plantar fabricado con la máquina MakerBot se presenta en la figura 7-9.



Figura 7-9 Falla en inserto plantar realizado con MakerBot

7.6. Análisis de costos

Dentro de los costos importantes considerados para el análisis de costos se incluyen el material base, materiales adicionales y uso de máquina. Para los costos del uso de máquina, se consideró una membresía de Laboratorio de Fabricación del edificio Anacleto Angellini de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Esta membresía tiene un costo de \$100.000 y permite el uso de 50 horas de máquinas. La tabla 7-2 presenta el resumen de costos en la fabricación del inserto plantar.

Tabla 7-2 Costos de fabricación de inserto plantar

Concepto	Unidad	Costo unitario	Unidades	Costo Concepto
Materiales Molde	varios	\$4.500	varios	\$4.500
ABS	1,0 kg	\$25.000	0,268	\$6.700
Horas de impresión	1 hora	\$2.000	14	\$28.000
Materiales adicionales	varios	\$5.000	varios	\$5.000
			Total	\$44.200

De la tabla 7-2 se observa que el costo total de la producción del inserto plantar es de \$44.200 pesos. Este precio es significativamente menor al valor que se paga actualmente por el inserto plantar producido en el Hospital San Borja. También podemos considerar que sin una membresía, y solamente con una adquisición de la máquina (Zortrax) que cuesta alrededor de \$2.100.000 (3146 USD) en Chile y \$1.200.000 (1800 USD) en EEUU, se podrían producir más de 40 insertos

plantares al mes. Utilizando el mismo sistema de costo de la tabla 7-2, la inversión se recuperaría al fabricar 75 insertos plantares para una máquina comprada en Chile.

8. CONCLUSIONES

8.1. Análisis de los resultados de los experimentos

Los resultados revelaron el impacto de los parámetros estudiados sobre el comportamiento mecánico de los productos de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) fabricados a través de modelamiento por deposición fundida. Los resultados pueden ser resumidos con lo siguiente:

- a) Los resultados indican que la altura de capa de las probetas es el parámetro más significativo y que más afecta a las características mecánicas. Los efectos de este parámetro representan un 35,7% de contribución a la resistencia a la tracción y un 60% de contribución al módulo de flexión.
- b) La temperatura de extrusión y la cantidad de *shells* no siempre tienen efectos significativos. La temperatura de extrusión tiene un efecto visible en el módulo de flexión, con un 23,4% de contribución. La cantidad de *shells*, por su parte, tienen un efecto importante en la resistencia a la tracción, con un 31,5%.
- c) El uso de acetona tiene un efecto importante, tanto en la resistencia a la tracción como en el módulo de flexión, con un 29% y un 12,5% de contribución respectivamente. El baño con vapor de acetona disminuye tanto la resistencia a la tracción como el módulo de flexión.

8.2. Indicaciones de fabricación para productos finales en ABS

Dados los resultados obtenidos, es posible establecer una serie de indicaciones para la fabricación de productos finales en ABS.

- a) En términos de la altura de capa, se recomienda fabricar en el menor valor posible. Así, en caso de que la máquina de modelamiento por deposición fundida lo permita, utilizar una altura de 0,1 mm. En caso contrario, aumentar a 0,2 mm.
- b) Para la temperatura de extrusión, se recomienda utilizar un valor bajo. Para este estudio, la extrusión a 220°C se comportó mejor que la extrusión a 240°C.
- c) Para los *shells*, se recomienda utilizar el mayor valor. El aumento de estos genera un aumento en la resistencia, mientras que no tienen gran efecto sobre el módulo de flexión.
- d) El uso de un baño con vapor de acetona dependerá del objetivo del producto. Si es necesario que este cuente con una mayor capacidad de flexión o de una superficie menos rugosa, se recomienda la utilización de este procedimiento. En caso contrario, si se desea priorizar la resistencia a la tracción, se recomienda no utilizar el baño con vapor de acetona.

8.3. Análisis de la fabricación del inserto plantar

Los resultados obtenidos al fabricar y probar el inserto plantar con la paciente del caso de estudio permiten confirmar que fabricar un inserto plantar personalizado a

través del modelamiento por deposición fundida es factible para algunas máquinas de impresión. Así, es necesario utilizar una máquina que entregue una mejor unión de las capas para evitar la falla por separación de éstas.

Es importante destacar que el costo de fabricación de un inserto plantar a través de modelamiento por deposición fundida es de \$44.200 pesos, que corresponde a un rango de entre un 37% a un 55% del precio pagado actualmente.

Por otro lado, hay etapas del proceso que podrían ser optimizadas. Así, la etapa de la creación de un molde con alginato y yeso, y su posterior digitalización, podría ser reemplazada por la utilización de un escáner 3D móvil, que permita tomar el archivo digital directamente de la extremidad de la usuaria. Así, se ahorraría tiempo y también se haría un proceso más ameno para la usuaria. Además, es necesario crear una corrección de la postura del pie en el modelo digital antes de la elaboración del inserto plantar.

Otra opción de mejora es la posible parametrización del modelo digital del inserto plantar. De esta forma, no sería necesario crear el archivo digital de cero, sino sólo variar medidas para generar el calce necesario entre el inserto plantar y el pie.

La fabricación y prueba de los insertos plantares a través de dos máquinas de FDM demuestra que si bien los parámetros son importantes, distintas máquinas entregan también distintos resultados, aunque se utilice la misma configuración de parámetros. Esto es importante de considerar al momento de fabricar productos finales.

8.4. Limitantes

Una de las limitantes del presente estudio es la gran variedad de máquinas de modelamiento por deposición fundida y también de sus materiales. Si bien una de las máquinas utilizadas en este estudio es de las más populares en términos industriales-profesionales, el área de manufactura rápida está en constante y rápido desarrollo. Así, parámetros que fueron incluidos en este estudio, podrían no ser configurables en otras máquinas. De la misma forma, puede que el ABS quede obsoleto como el material ideal para la fabricación del inserto plantar dado el desarrollo de nuevos materiales.

Otra limitación importante en este estudio es la presencia de características anisotrópicas del material dada la metodología de fabricación. Así, hay una dirección en que la pieza fabricada tiene menor resistencia, según lo observado en el testeado de los insertos. Es por esto que, al momento de fabricar un producto por modelamiento por deposición fundida, hay que tener especial cuidado en que la orientación de fabricación no sea factor influyente sobre el desempeño mecánico del producto. Para este punto también es importante comprender que distintas máquinas de impresión entregan una unión distinta de estas capas, como fue el caso de la máquina Zortrax en comparación con la máquina MakerBot.

8.5. Trabajo a futuro

Las limitaciones presentadas anteriormente pueden considerarse también como oportunidades de investigación. Por un lado, para investigaciones futuras se

propone analizar cómo afectan estos parámetros a productos fabricados a partir de materiales distintos. Además, se propone la investigación de parámetros controlables en otras máquinas de modelamiento por deposición fundida y el análisis de los efectos de estos sobre las características mecánicas de sus producciones.

Junto con lo anterior, se propone investigar cómo la variación de parámetros y el uso de un baño con vapor de acetona disminuyen el efecto de la anisotropía de las piezas.

Además, se propone la investigación del efecto de orificios sobre la durabilidad del diseño del inserto plantar. Junto con esto, también se propone la investigación en torno al comportamiento plástico de las fabricaciones de ABS por FDM y en específico, cómo afecta este comportamiento al inserto plantar fabricado.

Finalmente, se propone la investigación de distintas máquinas de fabricación por FDM para así identificar cuáles presentan un mejor comportamiento mecánico usando la misma configuración de parámetros de fabricación.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257. <http://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- Anitha, R., Arunachalam, S., & Radhakrishnan, P. (2001). Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1–3), 385–388. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00980-3](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00980-3)
- ASTM International. (2004). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1, (January), 1–15. <http://doi.org/10.1520/D0638-10.1>
- ASTM International. (2014). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1, 1–11. <http://doi.org/10.1520/D0790-10>.
- Ciobanu, O., Soydan, Y., & Hızal, S. (2012). Customized foot orthosis manufactured with 3D printers. In *International Symposium On Intelligent Manufacturing Systems* (pp. 91–98). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/260686174_CUSTOMIZED_FOOT_ORTHO SIS_MANUFACTURED_WITH_3D_PRINTERS
- Colomer, J. (2007). Polineuropatías agudas y crónicas. In M. Panamericana (Ed.), *Neurología Pediátrica* (3era edici, p. 1104). Buenos Aires.
- CONTEXT. (2016). PR Newswire. Retrieved from <http://www.prnewswire.com/news-releases/global-3d-printer-market-up-35-in-2015-on-the-back-of-b2b-purchases-of-personaldesktop-printers-564110371.html>
- Ekins, S., Litterman, N. K., Arnold, R. J. G., Burgess, R. W., Freundlich, J. S., Gray, S. J., ... Moore, A. (2015). A brief review of recent Charcot-Marie-Tooth research and priorities. *F1000Research*, 1–14. <http://doi.org/10.12688/f1000research.6160.1>
- Faustini, M. C., Neptune, R. R., Crawford, R. H., & Stanhope, S. J. (2008). Manufacture of Passive Dynamic Ankle – Foot Orthoses Using Selective Laser Sintering. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 55(2), 784–790.
- Future, E. the. (2014). Enabling the Future. Retrieved from <http://enablingthefuture.org/2014/11/13/tech-talk-thursday-intro-to-3d-printing/>
- Galantucci, L. M., Lavecchia, F., & Percoco, G. (2009). Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. *CIRP Annals* -

Manufacturing Technology, 58(1), 189–192. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.071>

Galantucci, L. M., Lavecchia, F., & Percoco, G. (2010). Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 247–250. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.074>

Garg, A., Bhattacharya, A., & Batish, A. (2016). Chemical vapor treatment of ABS parts built by FDM: Analysis of surface finish and mechanical strength. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9257-1>

Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. (Springer, Ed.) (2nd ed.). <http://doi.org/10.1520/F2792-12A.2>

Kamrani, A. K., & Nasr, E. A. (2015). *Engineering Design and Rapid Prototyping* (Vol. 1). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Lee, B. H., Abdullah, J., & Khan, Z. A. (2005). Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 54–61. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259>

Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C., & Gu, P. (2002). Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties. *Journal of Manufacturing Processes*.

Lochner, R. H., & Matar, J. E. (1990). *Designing for Quality*. (C. and Hall, Ed.) (1st ed.).

Mavroidis, C., Ranky, R. G., Sivak, M. L., Patritti, B. L., DiPisa, J., Caddle, A., ... Bonato, P. (2011). Patient specific ankle-foot orthoses using rapid prototyping. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 8(1), 1. <http://doi.org/10.1186/1743-0003-8-1>

Ortuzar, I. (2014). *Investigación de Pregrado Universidad Católica de Chile: Proyecto Dafne*. Santiago.

Pallari, J. H. P., Dalgarno, K. W., & Woodburn, J. (2010). Mass customization of foot orthoses for rheumatoid arthritis using selective laser sintering. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 57(7), 1750–1756.

Patar, A., Jamlus, N., Makhtar, K., Mahmud, J., & Komeda, T. (2012). Development of Dynamic Ankle Foot Orthosis for Therapeutic Application. *Procedia Engineering*, 41(Iris), 1432–1440. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.332>

Patzkó, Á., & Shy, M. E. (2011). Update on Charcot-Marie-Tooth Disease. *Current*

Neurology and Neuroscience Reports, 11(1), 78–88. <http://doi.org/10.1007/s11910-010-0158-7>

Percoco, G., Lavecchia, F., & Galantucci, L. M. (2012). Compressive properties of FDM rapid prototypes treated with a low cost chemical finishing. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(19), 3838–3842.

Pfeiffer, G., Wicklein, E. M., Ratusinski, T., Schmitt, L., & Kunze, K. (2001). Disability and quality of life in Charcot-Marie-Tooth disease type 1. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 70(4), 548–550. <http://doi.org/10.1136/jnnp.70.4.548>

Pham, D. ., & Gault, R. . (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10–11), 1257–1287. [http://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5)

Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E. (2001). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused ... *Rapid Prototyping Journal*, 7(3), 148–158.

Roesler, J., Harders, H., & Baeker, M. (2007). *Mechanical Behaviour of Engineering Materials*. (Springer, Ed.). Berlin.

Short, D. B., Badger, P., Sirinterlikci, A., & Altieri, B. (2015). Environmental, health, and safety issues in rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 105–110.

Telfer, S., Pallari, J., Munguia, J., Dalgarno, K., McGeough, M., & Woodburn, J. (2012). Embracing additive manufacture: implications for foot and ankle orthosis design. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 13(1), 84. <http://doi.org/10.1186/1471-2474-13-84>

Telfer, S., & Woodburn, J. (2010). The use of 3D surface scanning for the measurement and assessment of the human foot, 1–9.

Torrado, A. R., David, P., & Wicker, R. B. (2014). Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials, 343–353. <http://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9>

Upputuri, R. (2014). Survey on various 3D Printers. Retrieved from <http://www.think3d.in/survey-on-various-3d-printers/>

Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10. <http://doi.org/10.5402/2012/208760>

Ziemian, S., Okwara, M., & Ziemian, C. W. (2015). Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene. *Rapid Prototyping Journal*, 3(September 2013),

270–278. <http://doi.org/10.1108/RPJ-09-2013-0086>

ANEXOS

ANEXO A: RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN Y FLEXIÓN

Corrida	Ensayo 1 (MPa)	Ensayo 2 (MPa)	Ensayo 3 (MPa)
1	29,77	28,52	29,09
2	25,56	28,52	28,29
3	30,81	30,04	31,38
4	29,02	27,26	27,29
5	33,17	32,66	31,38
6	29,68	28,71	29,88
7	27,82	27,59	30,58
8	30,25	30,42	29,77

Corrida	Ensayo 1 (MPa)	Ensayo 2 (MPa)	Ensayo 3 (MPa)
1	1945,49	2142,85	2104,31
2	2253,15	2258,47	2196,57
3	2107,56	2242,38	2107,69
4	2420,14	2397,83	2387,71
5	1980,52	2223,43	2095,23
6	2350,08	2343,33	2452,59
7	2270,93	2327,37	2309,59
8	2462,84	2515,39	2423,39

ANEXO B: PAPER ENVIADO A REVISTA INTERNACIONAL

Prototypes to Products: FDM Optimization for ABS Orthosis

Sebastián Corthorn, MSc (c)

Constanza Miranda, PhD

DILAB: Engineering Design Initiative at the School of Engineering Pontificia Universidad Católica de Chile

Abstract

Purpose This paper reveals the impact of manufacturing parameters such as extruding temperature, layer height, number of shells and the use of acetone vapor, on the tensile strength and flexural modulus of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) specimens fabricated by fused deposition modeling (FDM).

Methodology Taguchi's orthogonal array was used to design an experiment of tensile and flexural test. Using different FDM parameters, a variety of specimens were produced. Then, these were tested to obtain their tensile strength and flexural modulus. Results were analyzed by main effects, signal-noise ratio and ANOVA analysis.

Findings Layer height was the parameter with the most significant effect. With a higher layer height a lower tensile strength and a higher flexural modulus is expected. Extruding temperature and number of shells are not always significant. Applying bath of acetone vapor on specimens proved to diminish both the tensile strength and the flexural modulus.

Practical implications There is a significant trend of using FDM for final products that are subjected to high tensile conditions such as orthosis. This study gives recommendations for using ABS and FDM in the manufacturing this typology of physical aids.

Originality This work adds to the limited published reviews on parameters, such as the numbers of shells, and the effect of acetone processing.

Keywords: Orthosis, Taguchi, Orthogonal array, FDM, Rapid Prototyping, acetone vapor bath

1. Introduction

In the last 20 years, Engineering and Design firms have promoted the idea to fail early with prototypes that can be tested before going to market. Nonetheless, with the spread of rapid prototyping technologies such as Fused Deposition Modeling (FDM), prototypes have become closer to final products. Due to the expiration of a series of 3D modeling patents, the improvements in the quality, fidelity and precision of the so-called 3D printers have made it possible to execute final products from the comfortability of your home. An area that has benefited from this is orthopedics. Accuracy of this process has enabled to use additive manufacturing in fabricating orthoses that fulfill ergonomic requirements without a long process of trial and error for molds and fittings. A meaningful body of published papers conclude that is feasible to develop a final orthosis

with additive manufacturing (Ciobanu et al., 2012; Faustini et al., 2008; Pallari et al., 2010; Telfer et al., 2012). This context begs the question: what are the optimal parameters for using FDM in orthosis? This work is part of a larger study related to fabricating an ankle-foot orthosis using FDM.

FDM consists in a machine fed by a plastic filament. This goes through a hot extruder that takes it to its fusion point. The material is deposited layer-by-layer over a printing platform until it reproduces the full geometry previously created in a CAD file. FDM works primarily with two types of plastic: Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and Polylactic acid (PLA). Advantages related to this method rely in the absence of a requirement to do chemical-based processes after the construction takes place. Disadvantages are the reduced working space and low resolution of details in the vertical axis (Wong et al., 2012).

Key parameters include the temperature of the extruder, the layer height, the raster pattern, orientation of the part, the amount of shells and infill percentage. These parameters can be modified in most of FDM machines. Variation to those parameters ends up in different mechanical properties, superficial quality and fabrication time. Studies show optimal configuration parameters for a better mechanical performance in final fabricated pieces using FDM. Rodríguez et al. (2001) demonstrated that mesostructure, that is the structure made by the infill, has a significant influence in the stress strain response and that higher tensile strength was achieved when the piece is subjected to stress along the same direction as the plastic fibers. Anitha et al. (2001) studied different configurations of layer thickness, road width and speed of deposition in order to minimize the surface roughness. They discovered that the layer thickness is the most significant parameter. Li et al. (2002) studied the FDM process and the mechanical properties of the fabricated prototypes. They conclude that different densities and orientations of deposition can be combined to reach the required tensile strength. Ahn et al. (2002) characterized some of the anisotropic properties of de ABS made by FDM. The orientation of deposition, air gap, deposition width, color and extrusion temperature were varied. They concluded that air gaps and deposition orientation are the factors that influence the most the tensile strength in this case. Lee et al. (2005) tried different configurations of air gap, raster angle, raster width and layer thickness in order to optimize the elastic performance of an ABS prototype. They concluded that raster angle and layer height are the most significant factors for the elastic performance. Finally, Ziemian et al. (2015) confirmed by stress and fatigues experiments that to apply the stress in the plastic fibers direction provides a better mechanical behavior. Also, they propose that, when the stress is not always constant in direction, the optimal configuration is to deposit the layers in 45°/-45° orientation, known as crisscross.

Other studies show the impact of dimethyl- ketone (acetone) post-processing on mechanical properties of ABS specimens. Galantucci (2009, 2010) shows that a chemical post-processing with dimethyl-ketone by immersion improves the surface roughness, produces a minor reduction of the tensile strength and a greater ductility. Percoco et al. (2012) studied the effect of immersion on dimethyl-ketone solution on compressive strength of ABS parts. They conclude that the processing keep the mechanical properties of the parts. Finally, Garg et al. (2016) studied the effect of a cold

vapor of acetone post-processing on the tensile and flexural strength of ABS specimens. They conclude that there is a marginal reduction of those mechanical values. This work will show a different methodology for the processing with acetone. In this case, acetone vapor will be used instead of immersion or cold vapor methodologies.

The reviewed body of work answers the questions on the effect of some parameters, as the infill and the orientation of deposition, in the tensile strength of the ABS products made by FDM. Nevertheless, there is a gap in recognizing the effect of the number of shells and the use of acetone vapor bath on the mentioned mechanical properties, and the relative significance in relation with studied parameters such as layer height and extruding temperature. This work aims to reveal the impact of the extruding temperature, the layer height, the number of shells and the use of an acetone processing on the flexural modulus and the tensile strength of ABS specimens. It will also reveal which are the most significant parameters. Finally, recommendations to fabricate a final product will be given. To address these objectives, Taguchi method will be used to design flexural and tensile test, based on an orthogonal array. Results will be analyzed by main effect analysis, signal-noise ratio and an ANOVA analysis

2. Methodology

a. Taguchi's method

The Taguchi is a statistical method that relies on estimators for the optimization of final products and processes. It is a tool that gives an optimization of the design, in order to increase quality of products. It's based on two parts. First, the simplification of experiments, that allows reaching all the parameters space in fewer test than in a factorial experiment design. This is achieved with an orthogonal array that enables to combine the variables and their different levels in a balanced way.

The second part of the Taguchi methodology is the analysis of the results. First, an analysis of the main effects that shows in a broad way how the different factors affect the studied characteristic is completed. Then, a signal-noise ratio analysis is made. This analysis provides insight of the characteristic sensibility in relation with the incontrollable parameters. The signal-noise ratio is composed of the mean (signal) and the variability (noise). Thus, a bigger ratio is desired. The final step in the analysis is the ANOVA to identify variables that are statistically significant to the studied characteristic. The whole process is replicated for studying the tensile and flexural test.

b. Taguchi's orthogonal array

For this study four parameters were considered, all of them with two levels. Those parameters are shown in table I.

Table I Parameters and Levels

Symbol	Parameter	Unit	Level 1	Level 2
--------	-----------	------	---------	---------

A	Acetone	-	YES	NO
B	Temperature of extrusion	°C	220	240
C	Layer height	Mm	0.1/0.2	0.3
D	Shells	-	1	3

For the tensile test, level 1 for the layer height was set on 0.1 mm. For the flexural test, this level was changed to 0.2 mm.

The parameters considered were acetone processing, extrusion temperature, layer height and shells quantity. The acetone parameter refers to the specimen processed with acetone vapor. This vapor melts the ABS and joins the layers. It's expected that the merging of layers increases the tensile strength of the specimen and diminishes the flexural modulus.

The extrusion temperature's nominal value will not be that significant due to the lack of control in this factor. This lack lies on the different calibration of the thermocouple and the environmental factors for the different models of machines. For this parameter it is relevant to identify how the temperature variation influences the mechanical behavior. The two levels proposed for this parameter are 220° and 240°C which are aligned with the fabricator's suggestion.

The layer height will have two levels: 0.1 mm and 0.3 mm. It's expected that a higher layer will diminishes the quantity of layer unions. Thus, the tensile strength should be higher.

The *shells* are the continuous fibers that are deposited around the infill. This parameter will have two values: one and three layers. It is expected that for a higher number of shells, a higher tensile strength will be achieved.

Then, an orthogonal array of the parameters and their levels was made. Numbers 1 and 2 refers to the levels on table I. Three columns were disposed in order to identify the interactions between parameters. Given the use of a Taguchi's orthogonal array, some interactions can be confounded. Those are noted with a “=”. Combinations are displayed in Table II.

Table II Orthogonal array for tensile and flexural test

Run	A: Acetone	B: Extruding Temperature	C: Layer height	AB=CD	AC=BD	AD=BC	D: Shells
R1	1	1	1	2	2	2	1
R2	1	1	2	2	1	1	2
R3	1	2	1	1	2	1	2

R4	1	2	2	1	1	2	1
R5	2	1	1	1	1	2	2
R6	2	1	2	1	2	1	1
R7	2	2	1	2	1	1	1
R8	2	2	2	2	2	2	2

c. Fabrication of specimens

24 specimens of ABS by FDM were made and tested for tensile test. Another 24 specimens were made using the same methodology for the flexural test.

The specimens for the tensile test were made according to the Type I of ASTM D638 norm. The specimens for the flexural test were made according to ASTM D790 norm (ASTM International, 2004, 2014). The specimens were made in a MakerBot Replicator 2X machine, with the software MakerBot Desktop. The material is an orange ABS filament of 1.75 mm of width, from Shenzhen Esun Industrial Co. The manufacturing platform was covered with Kapton tape and a mix of acetone and ABS to avoid the curling effect.

The specimens were hung by a metal wire inside a glass jar. Acetone was deposited on the bottom of the jar and heated for 150 seconds at 100°C for each specimen. Less than 150 seconds was not enough to melt the entire surface on the specimen, and more time affected the geometry. To achieve a constant temperature, the jar was introduced into a pot of boiling water.

3. Specimens testing

An Instron 4206 machine was used to perform the tensile test. The specimens were tested at 25°C. The speed was 5 mm/min. The specimens were strained till the fracture occurred. Several data of load, strain and time was noted and then analyzed on Excel software. The test was performed according to the ASTM 638 norm (ASTM International, 2004).

The same machine was used to perform the flexural test. The specimens were tested at 25°C. The speed was 18.75 mm/min. The specimens were strained until the strain of the external fiber was 5%. Data was taken and then analyzed on Excel software. The test was performed according to the ASTM 790 norm (ASTM International, 2014).

4. Results and discussion

4.1 Tensile Test

Results were obtained testing 8 runs of 3 specimens each. They were analyzed using Taguchi methods. First, the main effects were analyzed. These results were complemented with an ANOVA analysis and a signal-noise ratio analysis.

Table III shows the main of the obtained tensile strength for each test run. This allows observing, broadly, which combination of parameters had as result a better mechanical behavior.

Table III Tensile strength mains

Run	Strength (MPa)	Use of acetone	Extruding temperature (°C)	Layer Height (mm)	Number of Shells
1	29.13	YES	220	0.1	1
2	27.46	YES	220	0.3	3
3	30.75	YES	240	0.1	3
4	27.86	YES	240	0.3	1
5	32.40	NO	220	0.1	3
6	29.42	NO	220	0.3	1
7	28.66	NO	240	0.1	1
8	30.15	NO	240	0.3	3

As is seen in Table III, run number five is the one with a higher tensile strength. The levels for this run are set without an acetone vapor bath processing, and with an extruding temperature of 220°C, a 0.1 mm layer height and 3 shells.

a. Main effects analysis

A main factors analysis allows identifying the total effect of each parameter variation in the final result. Also, the effect of the interaction of parameters is shown. The main factors plot is showed in Figure I.

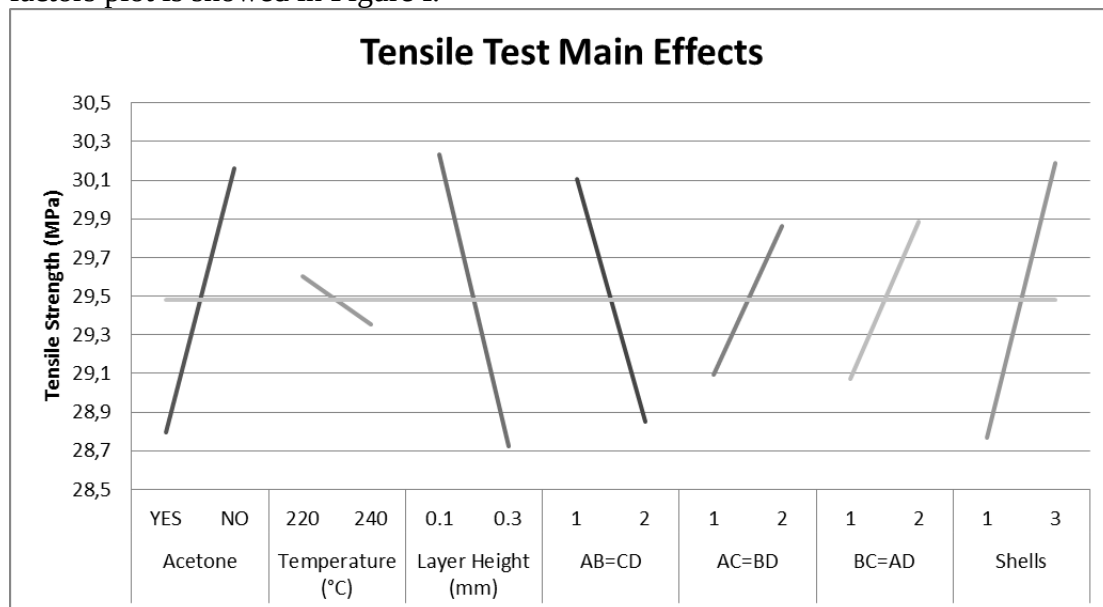
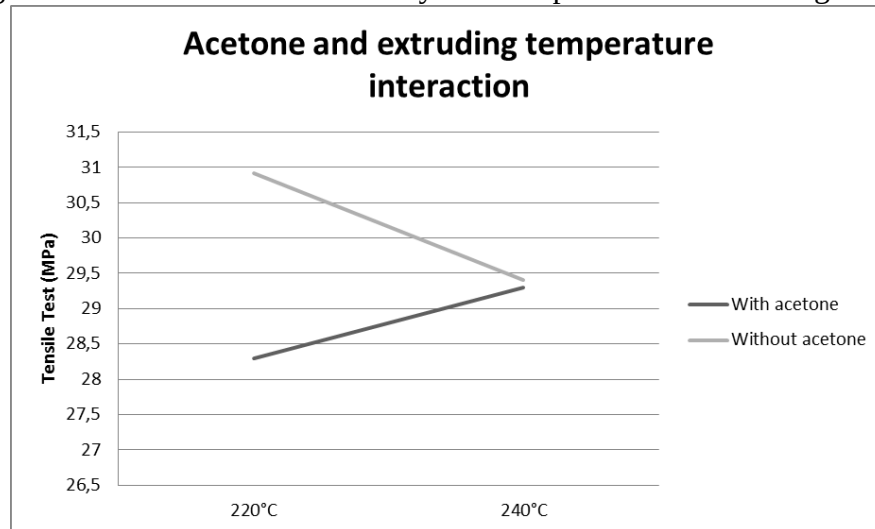


Figure I Tensile test main effects

As Figure I shows, the acetone processing, the layer height and the number of shells have a significant effect on the tensile strength. From this figure, it's possible to conclude that the acetone vapor bath processing lowers the tensile strength. Also, it's observed that a shorter layer help to increase this strength. Furthermore, it's observed that the extrusion temperature doesn't have an important effect on the tensile strength.

b. Interactions

To study the interactions between the parameters, interaction plots were made using the data of the testing. Since the AB=CD interaction was the one with the bigger effect in the main effects plot, the plots of acetone and extrusion temperature interactions and the layer height and shells interaction are analyzed. The plots are shown in figure II and III.

**Figure II** Acetone and extruding temperature interaction plot

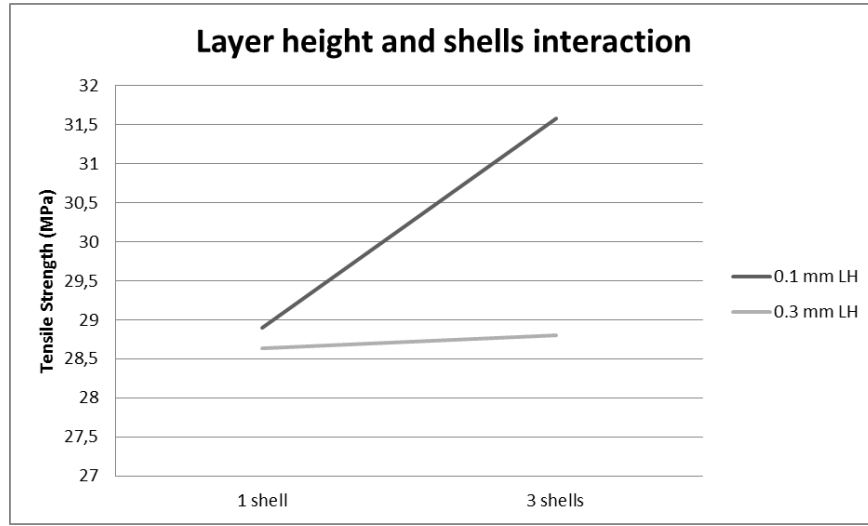


Figure III Layer height and shells interaction plot

Figure II shows the acetone vapor bath processing does not have a significant effect when the extruding temperature is set to 240 °C. Nevertheless, when the extruding temperature is set to 220°C, the acetone processing has a significant effect. In this case, the use of acetone for the post processing diminishes the tensile strength of the specimen.

Figure III shows that when using one shell, the tensile strength is similar for the 0.1 mm and 0.3 mm layer height. It can also be observed that the number of shells affects mostly the 0.1 mm layer height configuration and not the 0.3 layer height. This could be explained by the total sectional area covered by the plastic. With a smaller layer height, most area will be covered. Instead, when the layer is higher, less area is covered and there are more air gaps. Given that the shells fibers are deposited in the direction of the strain, the more shells are used the higher the tensile strength will be.

c. Signal to noise ratio

The signal-noise ratio analysis helps to understand the effect of noise factor in the studied characteristic. In this study, since we need to achieve the highest strength, the “bigger-the-better” ratio is used.

To calculate this ratio, the following expression is used:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}$$

where y_i^2 is the square of the value for the ‘i’ test and ‘n’ is the total number of test in a run (3 in this study). Thus, a bigger signal-noise ratio corresponds to a robust design, with less variability because of external factors.

The S/N ratios obtained are shown in table IV.

Table IV Signal to Noise ratios of tensile test

Run	Signal-noise ratio
1	29.282
2	28.740
3	29.752
4	28.887
5	30.204
6	29.370
7	29.119
8	29.584

Table IV shows that run number 5 has the highest signal to noise ratio. This means that this is the most robust configuration. The run with the lowest signal to noise ratio is number 2. This analysis shows that the setting with a layer height of 0.1 mm, three shells, extruding temperature set in 220°C and no acetone processing is both the better and most robust configuration in order to achieve a higher tensile strength.

d. ANOVA analysis

The ANOVA analysis aims to evidence the significance of a parameter in the studied characteristic. In this work, the studied characteristic is the strength. To do so, an F test is used. For this, it's necessary to calculate: E^2 for each parameter, no effect E^2 , and degrees of freedom of the experiment. E^2 for each parameter is the square of each expected effect. No effect E^2 , for a replicated experiment, is given by

$$E^2 = 4s^2/N$$

where ' s^2 ' is the average of the samples variances, and ' N ' is the total of trials performed. Finally, the no effects degrees of freedom are given by the number of runs multiplied by the trials for each run minus one. The F value of each parameter is just the E^2 of that factor divided by the no effect E^2 .

To interpret the numbers on the table, each F value should be compared with the value given for an F distribution (1, 16) for an $\alpha=0.05$, that is 4.494. That means that, if an F value of a parameter is bigger than 4.494, it's expected to have a significant effect on the characteristic. Also, dividing the E^2 value of a parameter over the sum of the E^2 values, it's possible to identify the percentage of contribution of each parameter.

Results are given in Table V.

Table V ANOVA analysis for tensile test

Factor	E	E2	df	F	%
A	1.363	1.858	1	10.261	29.0%
B	-0.248	0.062	1	0.340	1.0%
C	-1.514	2.291	1	12.652	35.7%
D	1.421	2.019	1	11.147	31.5%
No effect		0.181	16		2.8%

Table V shows that layer height is the most significant factor, with a 35.7% of contribution. Number of shells and acetone processing are also significant. All this three factors have an F value over 4.494. Extruding temperature, instead, is not a significant value.

4.2 Flexural Test

In a similar way than de tensile test, results were obtained testing 8 runs of 3 specimens each. The results were analyzed by the same methods than the tensile test.

Table VI shows the main of the obtained flexural modulus for each test run.

Table VI Flexural modulus mains

Run	Flexural Modulus (MPa)	Use of acetone	Extruding temperature (°C)	Layer Height (mm)	Number of Shells
1	2064.22	YES	220	0.2	1
2	2236.06	YES	220	0.3	3
3	2152.54	YES	240	0.2	3
4	2401.89	YES	240	0.3	1
5	2099.73	NO	220	0.2	3
6	2382.00	NO	220	0.3	1
7	2302.63	NO	240	0.2	1
8	2467.21	NO	240	0.3	3

Table VI shows that the first run is the one with the lowest flexural modulus. The fifth run, which was the one with the higher tensile strength, has the second lowest flexural modulus. Both of those runs were made at 220°C and with 0.2 mm layer height. They differ on the use of acetone processing and the number of shells.

a. Main effects analysis

Figure IV shows the main effects for the flexural test.

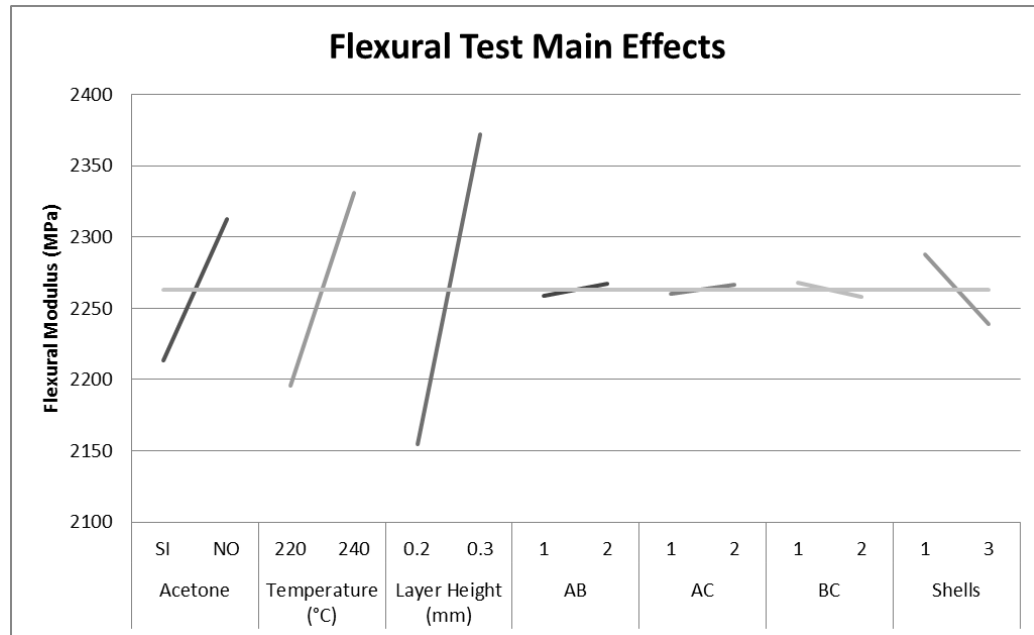


Figure IIV Flexural test main effects

From Figure IV, it is observed that the layer height is the parameter with the highest effect on the flexural modulus of the specimens. With a higher layer height, a higher flexural modulus is expected. Acetone processing and the extruding temperature have a similar effect. It's observed that the processing of the specimen with the acetone vapor bath diminishes the flexural modulus of it. Also, a lower temperature gives a lower flexural modulus. The number of shells doesn't seem to be significant.

Evidence shows that there is no significant effect from interactions. Given this, there is no need to analyze interaction plots.

b. Signal to noise ratio

Since the specimens were tested thinking in the context of an orthosis, the “lower-the-better” ratio is used. The lower the flexural modulus is, the most the specimen will bend before failure. Thus, now the signal to noise ratio is calculated with the following expression:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$$

Table VII Signal to noise ratio for flexural test

Run	Signal-noise ratio
1	-66.303
2	-66.990

3	-66.663
4	-67.611
5	-66.453
6	-67.541
7	-67.245
8	-67.845

Table VII shows that the first and fifth are the most robust runs. It can be concluded that these runs are the ones with both the lowest flexural modulus and the highest signal to noise ratio.

c. ANOVA analysis

An ANOVA analysis was made for flexural test. Results are shown in table VIII.

Table VIII ANOVA analysis for flexural test

Factor	E	E2	df	F	%
A	99.212	9842.955	1	11.833	12.5%
B	135.567	18378.321	1	22.095	23.4%
C	217.012	47094.063	1	56.617	60.0%
D	-48.800	2381.440	1	2.863	3.0%
No effect		831.804	16		1.1%

Table VIII shows that the acetone processing, the layer height and the extruding temperature have a significant contribution on the flexural modulus. From all this three parameters, layer height is the most important one. This parameter has a contribution of a 60%. The other two parameters have a lower contribution. Quantity of shells has no significant contribution.

5. Conclusions

The results reveal the impact of the studied parameters on the mechanical behavior of the products of ABS by FDM. Main points of the results are the following:

- Test results indicate that the layer height of the specimens is the most significant parameter. It represented a 35,7% of contribution to the tensile strength and a 60% of contribution to the flexural modulus.
- Extruding temperature and number of shells are not always significant. Extruding temperature has a visible effect on the flexural test and number of shells is significant on the tensile test.
- The use of an acetone vapor bath processing has a significant lowering effect on both the tensile strength and the flexural modulus.

- To fabricate a product, such as an orthosis, is recommended to set the extruding temperature at 220°C, the layer height at a lower level and to use more shells. The use of the acetone processing will depend of the seek result. For a better flexural behavior and a soft surface, the use of the acetone vapor is recommended. Instead, it's not recommended when a higher tensile strength is needed.

6. Bibliography

- Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257. <http://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- Anitha, R., Arunachalam, S., & Radhakrishnan, P. (2001). Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1–3), 385–388. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00980-3](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00980-3)
- ASTM International. (2004). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1, (January), 1–15. <http://doi.org/10.1520/D0638-10.1>
- ASTM International. (2014). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1, 1–11. <http://doi.org/10.1520/D0790-10>.
- Ciobanu, O., Soydan, Y., & Hızal, S. (2012). Customized foot orthosis manufactured with 3D printers. In *International Symposium On Intelligent Manufacturing Systems* (pp. 91–98). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/260686174_CUSTOMIZED_FOOT_ORTHOSIS_MANUFACTURED_WITH_3D_PRINTERS
- Colomer, J. (2007). Polineuropatías agudas y crónicas. In M. Panamericana (Ed.), *Neurología Pediátrica* (3era edici, p. 1104). Buenos Aires.
- CONTEXT. (2016). PR Newswire. Retrieved from <http://www.prnewswire.com/news-releases/global-3d-printer-market-up-35-in-2015-on-the-back-of-b2b-purchases-of-personaldesktop-printers-564110371.html>
- Ekins, S., Litterman, N. K., Arnold, R. J. G., Burgess, R. W., Freundlich, J. S., Gray, S. J., ... Moore, A. (2015). A brief review of recent Charcot-Marie-Tooth research and priorities. *F1000Research*, 1–14. <http://doi.org/10.12688/f1000research.6160.1>
- Faustini, M. C., Neptune, R. R., Crawford, R. H., & Stanhope, S. J. (2008). Manufacture of Passive Dynamic Ankle – Foot Orthoses Using Selective Laser Sintering. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 55(2), 784–790.
- Future, E. the. (2014). Enabling the Future. Retrieved from <http://enablingthefuture.org/2014/11/13/tech-talk-thursday-intro-to-3d-printing/>
- Galantucci, L. M., Lavecchia, F., & Percoco, G. (2009). Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), 189–192. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.071>
- Galantucci, L. M., Lavecchia, F., & Percoco, G. (2010). Quantitative analysis of a

- chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 247–250.
<http://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.074>
- Garg, A., Bhattacharya, A., & Batish, A. (2016). Chemical vapor treatment of ABS parts built by FDM: Analysis of surface finish and mechanical strength. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
<http://doi.org/10.1007/s00170-016-9257-1>
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. (Springer, Ed.) (2nd ed.). <http://doi.org/10.1520/F2792-12A.2>
- Kamrani, A. K., & Nasr, E. A. (2015). *Engineering Design and Rapid Prototyping* (Vol. 1). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Lee, B. H., Abdullah, J., & Khan, Z. A. (2005). Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 54–61. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259>
- Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C., & Gu, P. (2002). Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties. *Journal of Manufacturing Processes*.
- Lochner, R. H., & Matar, J. E. (1990). *Designing for Quality*. (C. and Hall, Ed.) (1st ed.).
- Mavroidis, C., Ranky, R. G., Sivak, M. L., Patrilli, B. L., DiPisa, J., Caddle, A., ... Bonato, P. (2011). Patient specific ankle-foot orthoses using rapid prototyping. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 8(1), 1.
<http://doi.org/10.1186/1743-0003-8-1>
- Ortuzar, I. (2014). *Investigación de Pregrado Universidad Católica de Chile: Proyecto Dafne*. Santiago.
- Pallari, J. H. P., Dalgarno, K. W., & Woodburn, J. (2010). Mass customization of foot orthoses for rheumatoid arthritis using selective laser sintering. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 57(7), 1750–1756.
- Patar, A., Jamlus, N., Makhtar, K., Mahmud, J., & Komeda, T. (2012). Development of Dynamic Ankle Foot Orthosis for Therapeutic Application. *Procedia Engineering*, 41(Iris), 1432–1440. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.332>
- Patzkó, Á., & Shy, M. E. (2011). Update on Charcot-Marie-Tooth Disease. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 11(1), 78–88. <http://doi.org/10.1007/s11910-010-0158-7>
- Percoco, G., Lavecchia, F., & Galantucci, L. M. (2012). Compressive properties of FDM rapid prototypes treated with a low cost chemical finishing. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(19), 3838–3842.
- Pfeiffer, G., Wicklein, E. M., Ratusinski, T., Schmitt, L., & Kunze, K. (2001). Disability and quality of life in Charcot-Marie-Tooth disease type 1. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 70(4), 548–550.
<http://doi.org/10.1136/jnnp.70.4.548>
- Pham, D. ., & Gault, R. . (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10–11), 1257–1287.
[http://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5)

- Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E. (2001). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused ... *Rapid Prototyping Journal*, 7(3), 148–158.
- Roesler, J., Harders, H., & Baeker, M. (2007). *Mechanical Behaviour of Engineering Materials*. (Springer, Ed.). Berlin.
- Short, D. B., Badger, P., Sirinterlikci, A., & Altieri, B. (2015). Environmental, health, and safety issues in rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 105–110.
- Telfer, S., Pallari, J., Munguia, J., Dalgarno, K., McGeough, M., & Woodburn, J. (2012). Embracing additive manufacture: implications for foot and ankle orthosis design. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 13(1), 84. <http://doi.org/10.1186/1471-2474-13-84>
- Telfer, S., & Woodburn, J. (2010). The use of 3D surface scanning for the measurement and assessment of the human foot, 1–9.
- Torrado, A. R., David, P., & Wicker, R. B. (2014). Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials, 343–353. <http://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9>
- Upputuri, R. (2014). Survey on various 3D Printers. Retrieved from <http://www.think3d.in/survey-on-various-3d-printers/>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10. <http://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Ziemian, S., Okwara, M., & Ziemian, C. W. (2015). Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene. *Rapid Prototyping Journal*, 3(September 2013), 270–278. <http://doi.org/10.1108/RPJ-09-2013-0086>

ANEXO C: CORREO DE RECEPCIÓN DE PAPER



Sebastián Corthorn Pedrasa <seba.corthorn@gmail.com>

Rapid Prototyping Journal - Manuscript ID RPJ-11-2016-0191

1 mensaje

Rapid Prototyping Journal
<onbehalfof+R.I.Campbell+lboro.ac.uk@manuscriptcentral.com>
Responder a: R.I.Campbell@lboro.ac.uk
Para: srcortho@uc.cl, seba.corthorn@gmail.com

16 de noviembre de 2016,
17:53

16-Nov-2016

Dear Mr. Corthorn Pedrasa:

Your manuscript entitled "Prototypes to Products: FDM Optimization for ABS Orthosis" has been successfully submitted online and is presently being given full consideration for publication in the Rapid Prototyping Journal.

Your manuscript ID is RPJ-11-2016-0191.

Please mention the above manuscript ID in all future correspondence or when calling the office for questions. If there are any changes in your street address or e-mail address, please log in to Manuscript Central at <https://mc.manuscriptcentral.com/rpj> and edit your user information as appropriate.

You can also view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging in to <https://mc.manuscriptcentral.com/rpj>.

Thank you for submitting your manuscript to the Rapid Prototyping Journal.

Sincerely,
Rapid Prototyping Journal Editorial Office

P.S. Don't forget, you can read the journal online at <http://www.emeraldinsight.com/ISSN-ISSN.htm>