



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO DE DISEÑO INDUSTRIAL
ÁREA DE TECNOLOGÍA

Errores dimensionales en la manufactura aditiva del modelado por deposición fundida

Tesis para optar por el grado de
MAESTRO EN DISEÑO INDUSTRIAL

Presenta:

Ing. Atemoc Centli de la Hoz Carranza

Director de Tesis:

Dr. Francisco Manuel Sánchez Arévalo
Instituto de Investigaciones en Materiales UNAM

Comité tutor:

Dr. Vicente Borja Ramírez
Facultad de Ingeniería UNAM
MDI. Antonio Solórzano Cisneros
Posgrado en Diseño Industrial UNAM
MDI. Erick Iroel Heredia Carrillo
Posgrado en Diseño Industrial UNAM
Mtra. Vanessa Sattelle Gunther
Posgrado en Diseño Industrial UNAM

Cd. Mx. Ciudad Universitaria, Octubre 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular al Programa de Estudios de Maestría en Diseño Industrial y al Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM), por brindarme las herramientas teóricas y tecnológicas para la realización de esta investigación.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías CONAHCYT (antes CONACYT), por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

A la DGAPA-UNAM por el financiamiento otorgado a través del proyecto PAPIIT IN102421, con el cual se financió la investigación realizada en la presente tesis.

Al Dr. Francisco Sánchez Arévalo, por el constante apoyo durante estos años y por confiar en mí.

Al Dr. Vicente Borja Ramírez y al MDI. Antonio Solórzano Cisneros por ser miembros del comité tutor de la presente tesis y ayudarme con sus conocimientos durante este proceso.

Al MDI. Erick Iroel Heredia Carrillo y a la Mtra. Vanessa Sattelle Gunther; por aceptar ser sinodales y lectores de la presente tesis, así como por sus consejos y ayuda en las diferentes materias que cursé en el programa de maestría.

A mi familia: Alberto, Inés, Antelmo, Aquetzalli y Axa, por ser el pilar más importante en mi vida.

A mis amigos: Manolo, André, Yazmín, Ichim, Gerardo, Saraly, Belén, Carlos, Víctor y Eri, por acompañarme en cada paso de la maestría y por ser un apoyo emocional durante este proceso.

RESUMEN

En la presente tesis se hace un análisis sobre los errores dimensionales en la manufactura aditiva partiendo de la premisa que existen dos grandes causantes, el error humano y el error máquina. Para minimizar el error humano, se propone seguir una serie de instrucciones que están ligadas a disminuir el error en la máquina y por lo tanto mejorar la calidad del producto. Para lograrlo, existen varias teorías y metodología para aumentar la calidad en la industria. En particular en este trabajo de tesis se hizo uso de las teorías de cero defectos, kaizen y *six sigma* las cuales consisten en una serie de pasos iterativos para mejorar la calidad y disminuir los errores en la impresión 3D. Para poder llegar a una metodología que facilite el uso de una impresora 3D fue necesario realizar una serie de 6 experimentos de al menos 15 iteraciones cada uno. Los experimentos consistieron en la caracterización de la impresora y la impresión de probetas normadas bajo el estándar ASTM D1708, cambiando los parámetros de la velocidad inicial en la primera capa de impresión y la temperatura de la cama de impresión, así como cambiando el tipo de impresora siendo la inicial una Creator Pro de Flash Forge de cama móvil en el eje z y como segunda impresora una ZMorph Fab de cama fija en el eje z. El material utilizado en todos los experimentos de impresión fue PLA (ácido poliláctico) comercial. Después de realizar los experimentos y analizar los datos, se obtuvo que es posible mejorar la calidad dimensional de los productos haciendo modificaciones en los dos parámetros anteriormente mencionados. Se observó que se pueden alcanzar los parámetros óptimos de impresión a través de la metodología propuesta en la presente tesis. Se recomienda tomar los parámetros de impresión sugeridos por el fabricante del material a depositar, en este caso PLA y posteriormente, optimizarlos con los cambios de parámetros de impresión. Los resultados obtenidos mostraron que los parámetros que mejor comportamiento mostraron fueron una velocidad de impresión 30 mm/s a 45 ° C y 45 mm/s a 60 ° C para la Creator pro y la ZMorph Fab respectivamente. La impresora ZMorph fue la que presentó menor error dimensional promedio del 0.61 % al finalizar las correcciones siendo una característica importante su configuración de cama fija en el eje Z. Es importante resaltar que los parámetros de impresión no son extrapolables; es decir, son característicos de cada impresora.

Palabras clave

Impresión 3D, errores, calidad, mejora, diseño, manufactura digital

Índice general

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
Introducción	XI
1. Antecedentes	1
1.1. La manufactura aditiva en el diseño	2
1.1.1. Impresión 3D en el campo del diseño industrial	3
1.1.2. Impresión 3D en la construcción de viviendas	4
1.1.3. La impresión 3D en la industria	5
1.1.4. Movimiento <i>MAKER</i>	9
1.1.5. La impresión 3D y sus implicaciones éticas	9
1.1.6. Errores en la manufactura aditiva	12
1.2. Estado del Arte	16
2. Formulación del problema	19
2.1. Planteamiento del problema	20
2.2. Pregunta de investigación	20
2.3. Hipótesis	21
2.4. Objetivos	21
3. Metodología	23
3.1. Diseño experimental	24
3.2. Desarrollo experimental	25
3.2.1. Geometría de estudio	28
3.2.2. Impresión 3D a través del lenguaje G	29

ÍNDICE GENERAL

3.2.3. Experimentos de impresión	34
3.2.4. Determinación de errores estadísticos	38
4. Resultados	43
4.1. Resultados de la geometría	44
4.2. Resultados del código G	45
4.3. Resultados del primer experimento: el efecto de los parámetros iniciales	47
4.4. Resultados del segundo experimento: el efecto de la cama de im- presión	61
4.5. Resultados del tercer experimento: disminución del efecto pie de elefante	82
4.6. Resultados del cuarto experimento: aumento de la velocidad en la primer capa de impresión	84
4.7. Resultados del quinto experimento: tipo de impresora respecto a la configuración de la cama de impresión	84
4.8. Resultados Sexto experimento: Ajustes de parámetros en la impre- sora ZMorph Fab	96
4.9. Análisis de Resultados	106
4.9.1. Primer experimento: El efecto de los parámetros iniciales .	106
4.9.2. Segundo experimento: El efecto de la cama de impresión .	106
4.9.3. Tercer experimento: Disminución del efecto de pie de elefante	107
4.9.4. Cuarto experimento: Aumento de velocidad en la primer capa de impresión	107
4.9.5. Quinto experimento: Tipo de impresora con respecto a la cama de impresión	107
4.9.6. Sexto experimento: Ajustes de parámetros en la impresora ZMorph Fab	108
5. Conclusiones	113
Bibliografía	117
A. Manual	121
A.1. Justificación	122
A.2. Diseño Orientado al Usuario	123
A.3. Desarrollo	123

B. Anexos	135
------------------	------------

Índice de figuras

1.1. <i>Ejemplo de proceso de impresión, imagen tomada de fabrikasimf en Freepik</i>	2
1.2. <i>Prototipo impreso en 3D</i>	4
1.3. <i>Construcción de viviendas haciendo uso de la manufactura aditiva, imagen tomada de www.bemore3d.com</i>	5
1.4. <i>Piezas impresas por Manufactura Mx</i>	6
1.5. <i>Collar impreso en 3D, imagen de belenreyes jewellery</i>	7
1.6. <i>Proyección conceptual de una impresión de un corazón, imagen tomada de kjpargeter en Freepik</i>	8
1.7. <i>Arma de fuego impresa en 3D, imagen tomada de (Tapia, 2017)</i> .	10
1.8. <i>Principales errores en la impresión 3D</i>	15
1.9. <i>Tabla con las soluciones de los principales errores en la impresión 3D</i>	16
3.1. <i>Diagrama del área de trabajo</i>	25
3.2. <i>Norma ASTM D1708</i>	27
3.3. <i>Dibujo generado de la probeta con medidas en [mm], $A= 38\text{mm}$, $B= 15\text{ mm}$, $C= 22 \pm 0.25\text{ mm}$, $D= 5 \pm 0.25\text{ mm}$ y $R= 5 \pm 0.25\text{ mm}$</i>	29
3.4. <i>Posición de impresión de las probetas y comparación de interfaces</i>	30
3.5. <i>Fragmento de código G con explicación</i>	33
3.6. <i>Impresoras utilizadas para los experimentos</i>	37
4.1. <i>Dibujo mecánico de la probeta de tracción uniaxial bajo la norma ASTM D1708, Escala 2:1 con dimensiones en milímetros.</i>	44
4.2. <i>Orden de impresión</i>	48
4.3. <i>Pie de elefante en las primeras impresiones</i>	49

ÍNDICE DE FIGURAS

4.4. <i>Uso del vernier en la obtención de medidas</i>	50
4.5. <i>Medidas obtenidas con vernier sección A</i>	54
4.6. <i>Medidas obtenidas con vernier sección B</i>	55
4.7. <i>Medidas obtenidas con vernier sección C</i>	57
4.8. <i>Medidas obtenidas con vernier sección D</i>	58
4.9. <i>Medidas obtenidas con vernier sección del grosor</i>	60
4.10. <i>Diagrama del sistema de digitalización de imágenes.</i>	62
4.11. <i>Rejilla de calibración</i>	63
4.12. <i>Parámetros en la rejilla</i>	64
4.13. <i>Relación milímetros-píxel</i>	64
4.14. <i>Preparación de la imagen.</i>	66
4.15. <i>Secciones medidas</i>	67
4.16. <i>Obtención de medidas mediante el uso de Software</i>	68
4.17. <i>Datos obtenidos en medición digital</i>	69
4.18. <i>Uso del Software Wolfram Mathematica</i>	70
4.19. <i>Medidas obtenidas de manera digital sección A</i>	72
4.20. <i>Medidas obtenidas de manera digital sección B</i>	73
4.21. <i>Medidas obtenidas de manera digital sección B'</i>	74
4.22. <i>Medidas obtenidas de manera digital sección C</i>	75
4.23. <i>Medidas obtenidas de manera digital sección D</i>	76
4.24. <i>Medidas obtenidas de manera digital sección R1</i>	78
4.25. <i>Medidas obtenidas de manera digital sección R2</i>	79
4.26. <i>Medidas obtenidas de manera digital sección R3</i>	80
4.27. <i>Medidas obtenidas de manera digital sección R4</i>	81
4.28. <i>Primer cambio de parámetros de impresión</i>	83
4.29. <i>Resultados de cambios de parámetros e impresora sección A</i>	86
4.30. <i>Resultados de cambios de parámetros e impresora sección B</i>	87
4.31. <i>Resultados de cambios de parámetros e impresora sección B'</i>	88
4.32. <i>Resultados de cambios de parámetros e impresora sección C</i>	89
4.33. <i>Resultados de cambios de parámetros e impresora sección D</i>	90
4.34. <i>Resultados de cambios de parámetros e impresora sección R1</i>	92
4.35. <i>Resultados de cambios de parámetros e impresora sección R2</i>	93
4.36. <i>Resultados de cambios de parámetros e impresora sección R3</i>	94
4.37. <i>Resultados de cambios de parámetros e impresora sección R4</i>	95
4.38. <i>Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección A</i>	97
4.39. <i>Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FABsección B</i>	98
4.40. <i>Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección B'</i>	99

4.41. *Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección C* 100
4.42. *Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección D* 101
4.43. *Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección R1* 102
4.44. *Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección R2* 103
4.45. *Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección R3* 104
4.46. *Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección R4* 105
4.47. *Comparación datos iniciales y datos corregidos en las secciones D, R1, R2, R3 y R4 con medida de 5 mm.* 109
4.48. *Comparación datos iniciales y datos corregidos en la sección C . .* 110

Índice de tablas

3.1. <i>Comparación de impresoras</i>	34
3.2. <i>Definición de parámetros en los experimentos</i>	37

Introducción

En los últimos años se hizo popular la manufactura aditiva, comúnmente conocida como “ Impresión 3D”, esto debido al vencimiento de la patente en el año 2005, sin embargo esta aún no es un tipo de manufactura que sea usada a gran escala en la industria, adjudicado principalmente a la diferencia dimensional entre el modelo digital y el objeto físico. Uno de los objetivos de esta investigación es que se logre la reducción en los desechos de la impresión 3D. Este error dimensional puede ser despreciable en objetos de arte o meramente decorativos, así como en prototipos, pero no en objetos o prototipos que requieren precisión, tal es el caso de laboratorios de investigación, construcciones de vivienda y uso médico. Como sucede en el laboratorio de mecánica y micromecánica de sólidos del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la UNAM, dónde se desarrollan nuevos equipos para la impresión de biomateriales (4D) y es necesario hacer pruebas mecánicas de estos biomateriales, esto se hace a través del ensayo de tracción uniaxial y es necesario que los nuevos materiales cumplan con una forma específica denominada ”probeta” para poder realizar dicho experimento, el molde de esta geometría es impresa en 3D, por lo que se requiere un grado de precisión.

En la presente Tesis se analiza el caso del IIM, realizando la impresión de probetas y comparando el modelo físico con el real. El error puede tener dos causantes principales el error de la máquina que incluyen software y hardware y el error humano que es el más común en estos casos, es por eso que se hará un análisis para poder disminuir el error dimensional. Como resultado se presenta un manual que ayudará a disminuir el error humano.

Capítulo 1

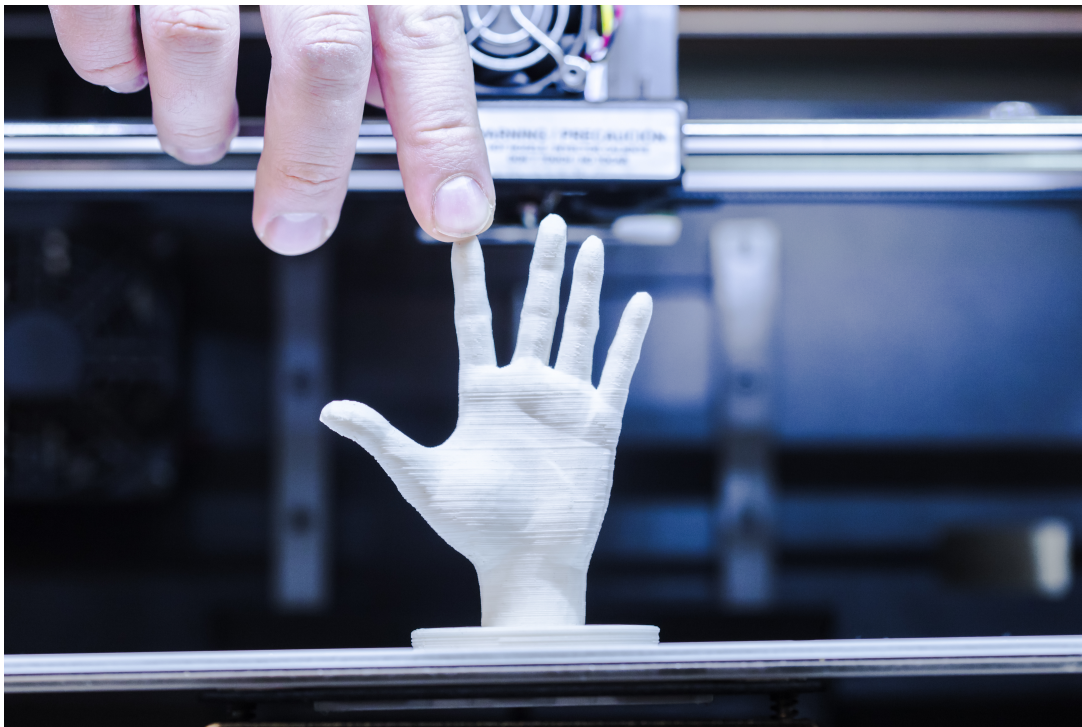
Antecedentes

1.1. La manufactura aditiva en el diseño

La Manufactura Aditiva (MA) es definida por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM, por sus siglas en inglés) como: “Un proceso de unión de materiales, para hacer un objeto a partir de un modelo digital 3D, usualmente capa por capa , contrario a las metodologías de manufactura sustractivas”.

A través de la historia del diseño se ha buscado desarrollar nueva tecnología e implementar herramientas que nos permitan encontrar maneras más efectivas de hacer productos, la impresión 3D se ha popularizado al grado de ser utilizada en gran parte de la industria como la médica, automotriz, aeroespacial y más recientemente en la impresión de concreto esto con la finalidad de construir viviendas y edificios, en consecuencia se ahorra mucho tiempo y disminuyen los costos.

Figura 1.1: *Ejemplo de proceso de impresión, imagen tomada de fabrikasimf en Freepik*

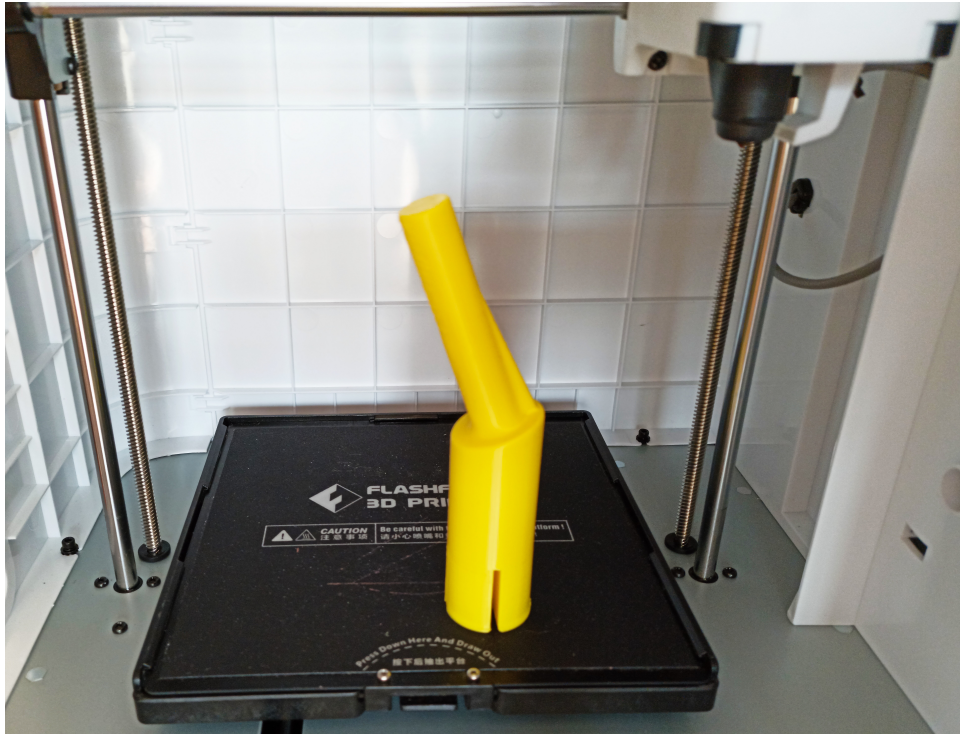


1.1.1. Impresión 3D en el campo del diseño industrial

En el campo del diseño industrial el uso de tecnología de impresión 3D es altamente relevante debido a que se utiliza a un nivel académico en el ámbito de la enseñanza e incluso de la investigación; así como también en un ámbito comercial y profesional; por ejemplo, en la construcción de viviendas mediante la impresión 3D; hoy en día es una técnica relativamente nueva que está ganando popularidad en todo el mundo debido a su eficiencia, ahorro de tiempo y recursos. A través de la impresión 3D, se pueden construir viviendas enteras en un tiempo récord y a un costo más bajo que con los métodos de construcción convencionales. De igual manera, el diseño personalizado –enfocado en un usuario en particular– y en particular la *customización* masiva (diseño personalizado en masa) han tenido gran auge en los últimos años; por lo que el uso de la tecnología de manufactura aditiva nos permite que lo anterior se haga realidad de una manera mas rápida y sencilla. En la figura 1.2 se muestra un ejemplo de prototipado rápido en la impresora Adventurer 3 de la familia Flashforge. El diseño de dicha impresora limita el uso de carretes de impresión que superen los 250 g. Ante tal limitación, los usuarios de este tipo de dispositivos han optado por resolver el problema diseñando e imprimiendo en la misma máquina una extensión que admite carretes de impresión de hasta 3 kg.

1. ANTECEDENTES

Figura 1.2: Prototipo impreso en 3D



1.1.2. Impresión 3D en la construcción de viviendas

Para la construcción de viviendas mediante la impresión 3D se utilizan máquinas grandes que pueden fabricar secciones completas de paredes, techos, y otros componentes estructurales. Estas impresoras 3D están diseñadas para trabajar con una variedad de materiales, incluyendo cemento, arcilla y plásticos reforzados con fibra de vidrio. Tal es el caso de la empresa *BEMORE3D* quienes se dedican a este tipo de manufactura para la construcción, como se muestra en la figura 1.3.

Figura 1.3: *Construcción de viviendas haciendo uso de la manufactura aditiva, imagen tomada de www.bemore3d.com*



1.1.3. La impresión 3D en la industria

Otro ejemplo del uso de la impresión 3D se encuentra en la industria aeroespacial, en la construcción de cohetes como fue el caso de la NASA; quienes construyeron un motor cuyo el 75 % de los componentes está manufacturado con la tecnología de impresión 3D (Perry, 2015).

En la industria cerámica se han explorado diferentes técnicas e incluso modificaciones de impresoras, es importante destacar que la impresión 3D de cerámica puede utilizar diferentes tecnologías y procesos específicos según la máquina y el material utilizados. Algunas impresoras utilizan la sintetización láser, mientras que otras emplean aglutinantes para unir el polvo cerámico. El proceso exacto puede variar, pero la idea principal es la creación de objetos cerámicos a partir de material en polvo, capa por capa, con un alto grado de precisión y personalización. En México un ejemplo de esto es el proyecto "Azul digital", que es una

1. ANTECEDENTES

colaboración entre Anfora Studio, Manufactura MX y la Universidad Iberoamericana, en el que se busca combinar la tradición de la cerámica y la tecnología de manufactura digital generando piezas de materiales tradicionales y geometrías complejas (Schulte, 2023), en la figura 1.4 se observan piezas cerámicas hechas con la tecnología de manufactura aditiva por Manufactura Mx.

Figura 1.4: *Piezas impresas por Manufactura Mx*



En la joyería, también se ha utilizado este tipo de tecnología, esto ha simplifi-

cado el proceso de diseño y producción, permitiendo una mayor personalización y la creación de piezas únicas. También ha acelerado la capacidad de los diseñadores y fabricantes de joyería para probar y refinar diseños antes de llevarlos a la producción final.. Un ejemplo de esto es la empresa American Pearl, que ha hecho uso de esta tecnología para ofrecer productos altamente personalizados (Mesa y Trujillo, 2016), en la figura 1.5 se observa un collar impreso por belenreyes jewellery.

Figura 1.5: *Collar impreso en 3D, imagen de belenreyes jewellery*

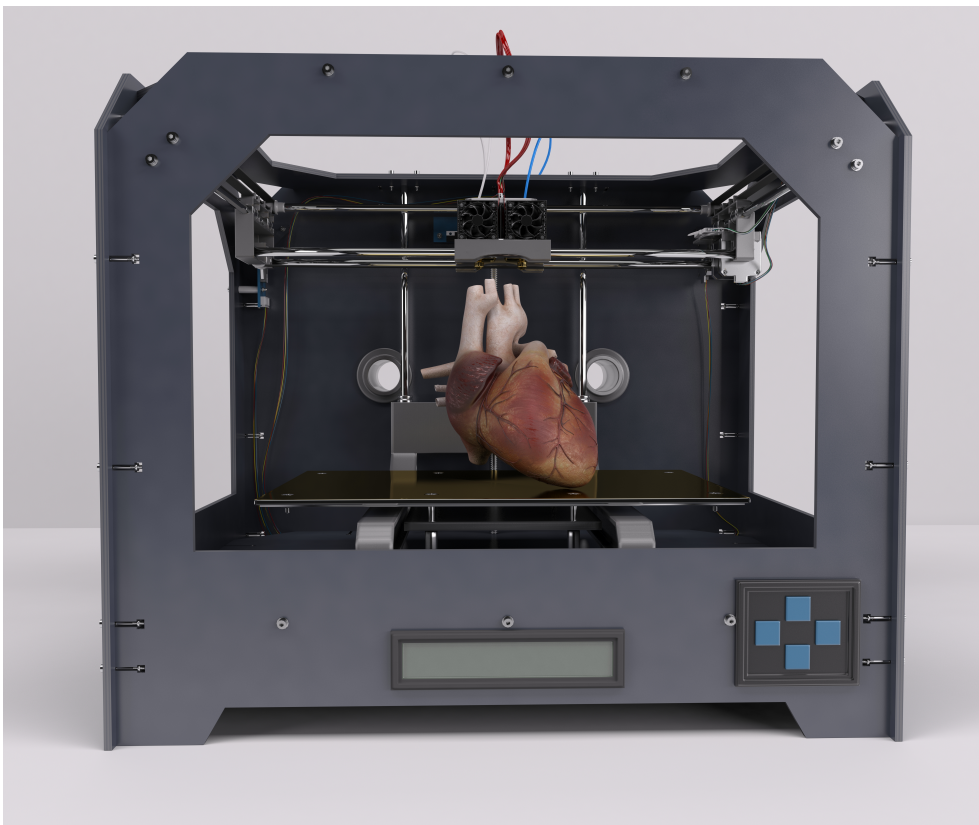


En la industria de la medicina, es un caso en el que se ha trabajado mucho, la impresión 3D ha revolucionado la medicina al permitir la creación de prótesis personalizadas, modelos anatómicos precisos para planificar cirugías y

1. ANTECEDENTES

tejidos artificiales, instrumentos quirúrgicos adaptados a procedimientos específicos, implantes ortopédicos y dentales a medida, medicamentos personalizados, dispositivos médicos personalizados y herramientas para la investigación y el entrenamiento médico. Estas innovaciones mejoran la atención médica, la precisión en los procedimientos y la calidad de vida de los pacientes. Hoy en día, es posible hacer uso de la bioimpresión para imprimir órganos, tal es el caso del MIT, que ha desarrollado pabellones auditivos a partir de cartílago humano (Oliva, 2022), en la figura 1.6 se muestra una imagen conceptual de lo que sería en un futuro una impresión de un órgano tan importante como un corazón.

Figura 1.6: *Proyección conceptual de una impresión de un corazón, imagen tomada de kjpargeter en Freepik*



Como estos, existen muchos ejemplos de la manufactura aditiva en la indus-

tria, pero estos son algunos casos que nos ayudan a comprender sus alcances.

1.1.4. Movimiento *MAKER*

En el artículo de el *Límite de lo perfecto* (Narotzky, 2010) se habla de la concepción que se tiene en el diseño de la tecnología y cómo es importante que esta no busque ser perfecta. En este punto cabe mencionar que el propósito de esta investigación es disminuir los errores en la manufactura aditiva; se sabe de ante mano que eliminarlos totalmente es imposible.

La filosofía *MAKER* nace en USA como una respuesta al *DIY Do it yourself* hazlo tu mismo esta filosofía propone la capacidad de generar nuestros propios productos a nivel no necesariamente profesional, también el derecho a reparar y modificar los productos electrónicos o mecánicos, o derivados por los que hemos pagado en algún momento esperando estos sean completamente de nuestra propiedad, un ejemplo de esto mencionado anteriormente es la modificación en la impresora FlashForge Adventurer 3, donde se imprime una pieza que permite el uso de carretes de mayor dimensión, sin embargo esto no es siempre factible debido a los derechos de propiedad industrial.

Los derechos de propiedad industrial es un tema importante, ya que cuando se liberó la patente del modelado por deposición fundida es cuando los autodenominados *makers* empezaron a innovar con esta tecnología generando diseño de *hardware* y *software* libre (Smith, 2015), ya que de esta manera la comunidad podía crear nuevas formas de hacer impresión 3D sin temor a infringir la patente.

1.1.5. La impresión 3D y sus implicaciones éticas

La impresión 3D no siempre es usada de manera ética. Tal es el caso de USA donde el derecho a la posesión de armas está permitido. Este hecho abrió el mundo a otro sector *maker*, el cual se dedica a diseñar y compartir modelos digitales de armas funcionales a las que cualquier persona tendría acceso a través de Internet y la posibilidad de imprimirlas en casa (Tapia, 2017). Esto es un caso que busca ser regulado en Estados Unidos ya que al imprimir este tipo de armas no necesariamente existe un número de serie y abre la puerta a una nueva

1. ANTECEDENTES

clandestinidad en el uso y venta de armas (Tapia, 2017). En la figura 1.7 se muestra el resultado final de la impresión de este tipo de armas.

Figura 1.7: Arma de fuego impresa en 3D, imagen tomada de (Tapia, 2017)



La popularización mundial de este tipo de manufactura se debe en gran medida al proyecto RepRap; el cual es un proyecto de la comunidad *maker* que nació después de que se venciera la patente de Scott Crump del Modelado por Deposición Fundida (Fused Deposition Modeling, FDM) en 2009. La patente, con el número US 5121329A, desarrollando una impresora 3D de *hardware* y software libre lo que permite a cualquiera modificar y tener acceso a los planos y código para su implementación, otra empresa que hizo lo mismo fue *makerbots*, que se volvió en poco tiempo la más popular en su tipo en Estados Unidos. El uso de esta tecnología en nuestra propia casa hoy en día es una realidad y este fenómeno se reproduce al rededor del mundo; aun en países en vía de desarrollo. Tal dis-

ponibilidad y asequibilidad acarrea algunas desventajas como la generación de basura.

Los errores en el modelado por deposición fundida generan problemáticas como la generación de basura por piezas o productos no logrados, lo que conlleva una sustentabilidad cuestionable y una baja eficiencia en el uso de esta técnica. El diseño sustentable propone reducir el impacto ambiental en todas las etapas de proceso de diseño; en este caso las impresoras 3D son utilizadas en un proceso de prototipado rápido, es por eso que gran parte de su materia prima termina en la basura. Uno de los objetivos de esta investigación es que se logre la reducción en los desechos de la impresión 3D. Se sabe que una tercera parte de los prototipos se van directamente a la basura debido a errores en la manufactura. Si bien es cierto que la manufactura aditiva produce una gran cantidad de prototipos y modelos en todo el mundo, es importante mencionar y destacar que el consumo energético de este tipo de manufactura es menor al utilizado en manufacturas convencionales. Sin embargo, es importante mencionar que esto no lo vuelve un producto altamente eficiente ya que la energía de la que depende es generada de modo tradicional pero sin duda es uno de los métodos de manufactura que causa menos impacto ambiental. La industrialización masiva a través del uso de impresoras 3D disminuirá drásticamente los costos de logística y transporte de componentes. En algunas ocasiones ciertos componentes deben fabricarse en algún lugar en particular; por lo que dichos componentes deberán ser transportados a su lugar de consumo/ensamble encareciendo su costo por el transporte, aduanas, etc. Este tipo de costos podría abatirse si esos componentes son fabricados en el lugar donde son requeridos a través de la manufactura aditiva. Por otro lado, también se reduciría el impacto ambiental al eliminar el transporte por avión, barco o auto y por lo tanto las emisiones de CO₂ que producen este tipo de transporte.

Es importante mencionar que el plástico es diferente a los metales, y una vez fundido, al reciclarlo o utilizarlo se pierden propiedades mecánicas por lo que se obtendrá un producto de menor calidad y es por esto por lo que la comunidad prefiere desecharlo.

Otra de las aplicaciones del modelado por deposición fundida es el uso del diseño orientado a usuarios ya que permite la generación de prototipos y productos

personalizados como es el caso del sector salud donde se pretende la impresión de órganos humanos (Murphy y Atala, 2014); sin embargo, el error y tiempo en la manufactura aditiva han imposibilitado una industrialización masiva y una desconfianza debido a que un error en una estructura ósea a implantar podría generar efectos negativos en el paciente (Goel, 2018). Por lo que el uso de esta herramienta aún se ha quedado como una técnica de prototipado rápido (Campbell y Williams, 2011).

1.1.6. Errores en la manufactura aditiva

Estos errores pueden ser provocados por el humano, los mecanismos de impresión o el mismo software. En cuanto a los errores humanos, existen metodologías para ayudar a minimizarlos o disminuirlos como es el caso de la teoría “Cero defectos ” que es un proceso de 14 pasos desarrollado por Philip Crosby (Crosby, 1979).

En particular para la disminución de errores humanos existen técnicas industriales siendo *kaizen* y *sixsigma* un ejemplo de estas. La filosofía Kaizen está representada por la frase “Un gran camino empieza por un pequeño paso” (Imai, 1986). En ella se hace referencia a la mejora continua, en algunas versiones de estas se proponen una serie de pasos.

De igual manera la filosofía o metodología del *sixsigma* nos habla de una serie de 5 pasos (Pande *et al.*, 2000) resumidos en: (I) Definir, incluyendo identificar el objetivo del problema o defecto y confirmarlo, e identificar a los participantes en el programa. (II) Medición, incluida la comprensión del comportamiento actual del problema o falla. (III) Análisis, destinado a descubrir la causa real de un problema o defecto. (IV) Mejora, permite identificar mejoras mientras se intenta minimizar la inversión que se realizará. (V) Control, basado en la adopción de medidas para asegurar la continuidad de la mejora y su medición en términos de economía y satisfacción del cliente.

Para los errores no humanos, es necesario identificar los defectos más comunes en esta manufactura y proponer un cambio en el *software* o en el mecanismo utilizado (Reason, 1990). Por esto podemos enfatizar que es necesario investigar los

errores en el modelado por deposición fundida para poder minimizarlos y de esta manera ayudar a mejorar los procesos de un tipo manufactura que podría ayudarnos a disminuir el impacto ambiental e incluso a salvar vidas por su aplicación en el sector salud.

Los errores en la manufactura aditiva tienen dos causantes principales, el error humano al momento de hacer un diseño o una mala selección de materiales y el error de la máquina generado por software y *hardware* (Aranda, 2020). Si bien el cambio y optimización de elementos mecánicos mejoraría considerablemente la función de una máquina de manufactura aditiva, esta solución no es la mejor, dado que con el uso constante de la maquina estos elementos sufrirán un deterioro y esto afectará a una pequeña pero considerable escala la impresión 3D. Por lo que una intervención mediante software y una guía de usuario son necesarias para poder disminuir los errores de una manera iterativa y constante.

Es por esto por lo que se pensó como intervención y primer propuesta para disminuir el error, un escenario donde se utiliza un software para el desarrollo y la mejora en la calidad de la manufactura aditiva, utilizando para su desarrollo metodologías de prevención de riesgos. Se propuso hacer una intervención en una impresora 3D comercial, como la Ender 3, con ligeros cambios mecánicos como el uso de un rodamiento para el dispensador de filamento, y que sea una impresora cerrada para evitar corrientes de aire, esto con el objetivo de hacer una primera iteración en la disminución de errores tal y como se describe en el artículo (Bowyer y Moore, 2011).

Si bien hacer una intervención en este tipo de impresoras comerciales es un respuesta que conlleva menor tiempo, es posible que por las patentes y derechos de autor, la intervención no sea posible por lo que se propone realizar la construcción y adecuación de una de las impresoras de software y hardware libre propuestas en el proyecto Reprap (Jones *et al.*, 2011). Las adecuaciones en la impresora serían las expuesta anteriormente que podrían optimizar el funcionamiento mecánico de igual manera se propone realizar un experimento similar al realizado por el centro de investigación y tecnología de Hellas Grecia (Charalampous *et al.*, 2021), donde haciendo uso de una cámara térmica se propone una inteligencia artificial que modifica el tamaño del diseño para lograr un ajuste métrico que permita la corrección en la impresión. Este método es innovador y una solución para algunos

1. ANTECEDENTES

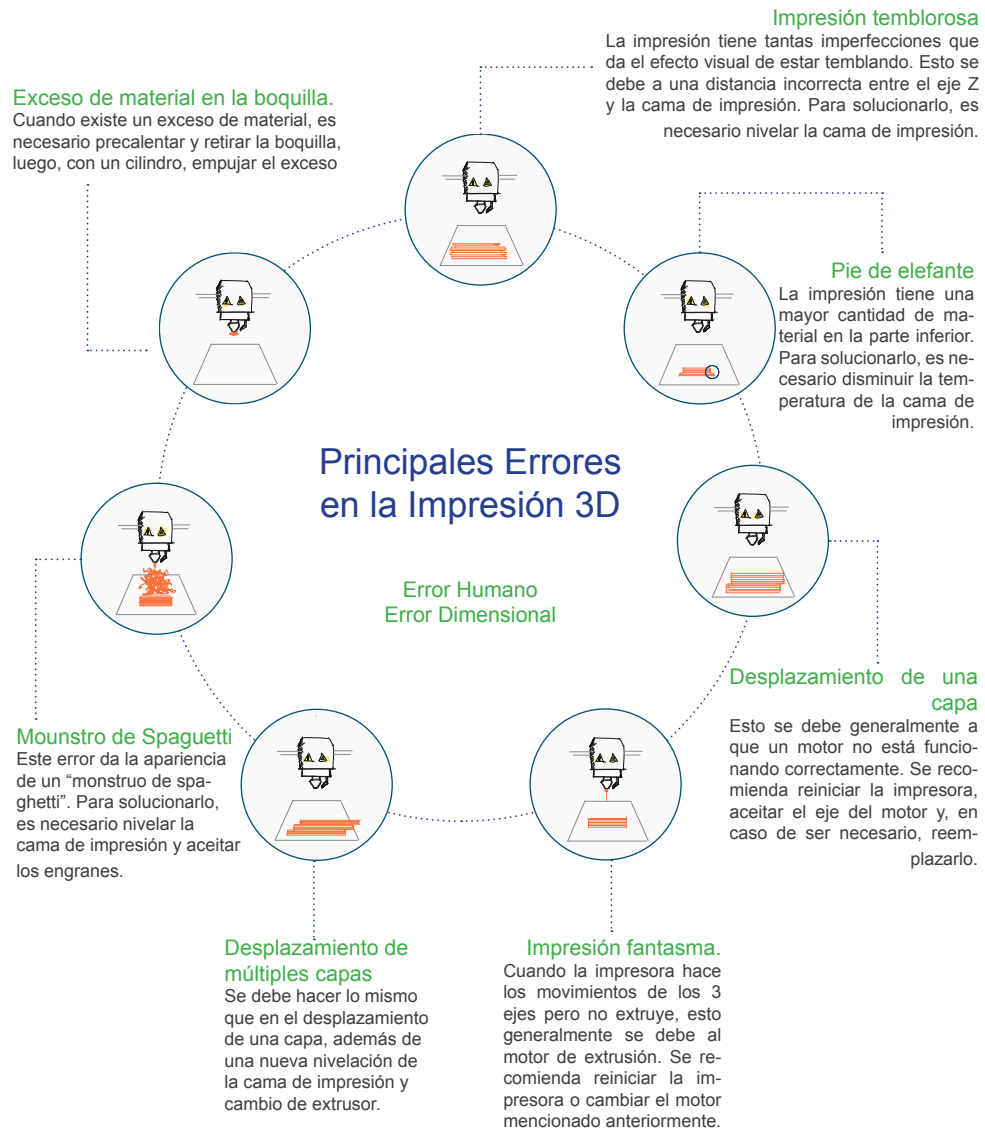
casos en específico, sin embargo, la corrección de dimensionamiento es solo en los ejes que son visibles para su cámara, de igual manera nuevos *softwares* especializados en CAD CAM como es el caso de CATIA V5 que en su nueva versión industrial propone el uso de un ajuste de mallado en la simulación para mejorar el dibujo mecánico que se utilizará para la impresión 3D. Tomando como referencia estos dos software se propone el uso de la tecnología de inteligencia artificial para desarrollar un software que mediante iteraciones modifique el movimiento de los mecanismos y proponga cambios en el diseño de impresión de la pieza y no como en el caso directamente en la pieza. Por lo que será necesario utilizar una o dos cámaras térmicas como en el caso mencionado anteriormente.

Para la medición dimensional de los errores dimensionales existen diferentes herramientas, en esta tesis nos concentraremos en dos, el uso de un venier físico y uno digital, basado en un sistema óptico, con el uso de una cámara y un software especializado se obtienen las medidas.

La misión de este proyecto de tesis es desarrollar una metodología que ayude a reducir los errores y el impacto ambiental de la manufactura aditiva, para la industrialización de esta en el área del diseño. En el libro "*cradle to cradle*" (McDonough y Braungart, 2002) se habla de una visión eco-efectiva y cómo la optimización de los procesos desde la base de los mismos es necesaria y nos ayudará a alcanzar nuevos objetivos y posibilidades de desarrollo. Tomando esto como premisa es por lo que la salida de este proyecto debe tener desde su conceptualización la visión eco efectiva teniendo como uno de sus objetivos particulares ayudar disminuir el impacto ambiental generado por este tipo de manufactura al aumentar su calidad en el proceso.

La visión es conocer los errores en la manufactura aditiva y proponer una manera de disminuirlos mediante un producto tecnológico, en este caso una impresora y el software comercial nuestro ideal es disminuir el error de manera efectiva y comprobable. En la figura 1.8 se muestran algunos de los principales errores en la impresión 3D así como la manera de solucionarlos y en la figura 1.9 se muestra una tabla con un resumen de los errores y los parámetros que se requieren modificar para disminuir ese error.

Figura 1.8: Principales errores en la impresión 3D



1. ANTECEDENTES

Figura 1.9: Tabla con las soluciones de los principales errores en la impresión 3D

Error / Solución	Retirar la boquilla	Nivelar cama de impresión	Disminuir la temperatura de la cama de impresión	Aceitar mecanismos de la impresora	Cambio de motor
Exceso de material en la boquilla	X				
Impresión temblorosa		X			
Pie de elefante		X	X		
Desplazamiento de una capa		X		X	
Desplazamiento de múltiples capas		X	X	X	X
Impresión fantasma					X
Monstro de Spaguetti		X		X	
Dimensional		X	X	X	

1.2. Estado del Arte

Se consultaron diversos artículos académicos para conocer los puntos mas importantes actuales, ente ellos los siguientes:

En el artículo *Desde automatización de FDM 3D hacia Autonomación Dinámica (Jidoka)*([Bauer y Cuello, 2022](#)), mediante uso de una IA y una red neuronal, se le enseña a la máquina a detectar errores tempranos, esto mediante el uso de una cámara que tiene durante la impresión y mediante el uso de imágenes de errores detecta cuando uno surge y así detiene el proceso de impresión de manera automática, esto debido a las largas horas en las que se deja sin supervisión el proceso de impresión.

En el artículo *“Learning-based error modeling in FDM 3d Printing process”* ([Charalampous et al., 2021](#)), propone y desarrolla el uso de inteligencia artificial mediante *machine learning* para la disminución de los errores en el proceso de impresión, esto se logra a través de un número de iteraciones y correlaciones con los datos de una impresora en particular, obteniendo resultados favorables para su investigación, los datos de esta metodología son aplicados directamente al diseño

y esto les permite que con cada nueva iteración el error disminuya. Para este estudio se utilizó filamento PLA por lo que deja pendiente la investigación y la prueba con otros materiales, el desarrollo para minimizar el error está dirigido a la corrección de velocidad y temperatura de la máquina.

En el artículo “*Material and energy loss due to human and machine error in commercial FDM printers*” (Song y Telenko, 2017), se expone como el factor humano y los errores en la manufactura FDM generan contaminantes mayores a los que se pretende evitar ya que cómo se menciona en este estudio el 34% del plástico utilizado es desperdiciado debido a las fallas en las impresiones proponen el análisis de 9 fallas comunes en esta técnica. Algo interesante de este estudio es que toma el factor humano como uno de los posibles causantes de las fallas.

En el artículo “*Minimizing error on circularity of FDM manufactured part*” (Eswaran *et al.*, 2018), se hace una comparación con una pieza circular impresa bajo diferentes condiciones y mediante un modelo matemático determinan la posición en la que la pieza se podrá imprimir con un error mínimo, destacando que otro de los factores a tomar en cuenta es la posición de la pieza al ser impresa y que su geometría podría ser determinante para esto.

Aunque es claro que hay trabajo previo dedicado a la identificación y disminución de errores en la manufactura aditiva aún falta trabajo por realizar en el desarrollo de metodologías para la detección y disminución de este tipo de errores. Dicha necesidad nos ha llevado a plantear la siguiente formulación del problema, pregunta de investigación, hipótesis y objetivos.

Capítulo 2

Formulación del problema

2.1. Planteamiento del problema

Tras la popularización de la manufactura aditiva comúnmente conocida como impresión 3D, uno de los problemas que han surgido en la actualidad se centra en la generación residuos de material de impresión 3D, ya sea por equivocaciones del usuario al momento de diseñar los elementos a imprimir o porque al imprimir las piezas, estas contienen errores en sus dimensiones y las inutilizan en procesos de ensamble posteriores. Este tipo de errores en la impresión 3D es bastante común y dado que esta técnica de fabricación rápida de prototipos ha tenido un auge a nivel mundial importante en los últimos años, la cantidad de material de impresión desperdiciado también ha incrementado notablemente; en el 2020, se estimó que mundialmente al año, 5000 toneladas de materiales utilizados en la impresión 3D se envían a la basura ([Avelar, 2020](#)).

El desarrollo de la tecnología y en especial en la manufactura aditiva nos permite hacer y compartir archivos alrededor del mundo a través de portales electrónicos y servidores de cómputo. De tal forma que estos archivos pueden ser utilizados para replicar las piezas o componentes de algún dispositivo de interés; sin embargo, al realizar la impresión 3D, es posible que no se obtengan las mismas dimensiones que obtuvo el autor del código. Para algunas piezas que requieren una precisión / tolerancias dimensionales en su fabricación, se vuelve una limitación el hecho de no tener una constante o una forma de minimizar estos errores; es por eso, que es importante identificar las causas de los errores más comunes en el uso de esta tecnología, determinar si se debe a un factor humano, social, político, económico, mecánico o de software y una vez identificado proponer mediante el diseño, si es posible, una solución. Es por lo anterior que en esta tesis se explora la fuente de este tipo de errores y se buscará el cómo minimizarlos.

2.2. Pregunta de investigación

¿Por qué la réplica de diseños o componentes manufacturados por esta técnica llegan a fallar?, ¿Es posible minimizar estos errores?

2.3. Hipótesis

Mediante la implementación de una metodología iterativa que hace uso de la medición óptica digital se pueden determinar y caracterizar la magnitud y naturaleza de los errores en la fabricación aditiva; una vez identificados será posible optimizar los procesos de impresión a partir de modificar parámetros críticos de impresión como lo son la temperatura y la velocidad; los cuales tienen impacto directo en la geometría final de las piezas manufacturadas por dicha técnica, siguiendo esta metodología es posible disminuir el error humano y desarrollar un manual a nivel usuario que permita su uso.

2.4. Objetivos

- Identificar las causas de los principales errores en el modelado por deposición fundida (impresión 3D).
- Determinar si los errores son causados por un factor humano o tecnológico.
- Desarrollar una metodología que permita optimizar los parámetros de impresión más relevantes, como la temperatura y la velocidad, a partir de mediciones dimensionales ópticas.
- Minimizar los errores dimensionales en la fabricación de piezas por manufactura aditiva.
- Mejorar la calidad de los productos finales, disminuir la cantidad de piezas defectuosas y por lo tanto disminuir los desperdicios de material de impresión 3D.

Capítulo 3

Metodología

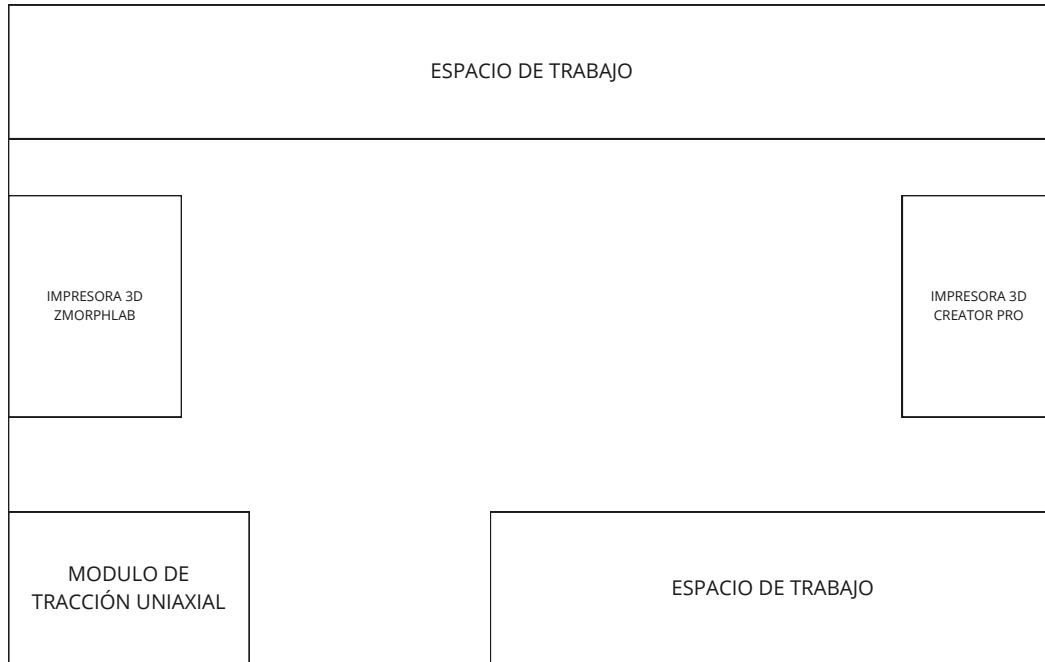
3.1. Diseño experimental

Basándose en los objetivos de la investigación, se realizaron una serie de experimentos para identificar la procedencia y cuantificar la magnitud de los errores dimensionales en la manufactura aditiva; por lo tanto, en esta sección se presenta una metodología para la detección, cuantificación y disminución de este tipo de errores; a continuación se describe a detalle los procesos a seguir para lograr las metas planteadas en los objetivos.

Es importante mencionar que todos los experimentos de esta investigación fueron realizados en el Laboratorio de Mecánica y Micromecánica de Sólidos del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, en este laboratorio se realizan diferentes investigaciones y desarrollo de nuevos materiales, de igual manera se utiliza la tecnología de bioimpresión y manufactura aditiva de modelado por deposición fundida. En la Figura 3.1 se muestra un diagrama esquemático de la distribución y del área de trabajo en dicho laboratorio.

El propósito de realizar los experimentos en un laboratorio como el arriba mencionado nos da importantes ventajas. Una de ellas es el acceso a equipos especializados en el área de impresión 3D y en el área de instrumentación y medición; como se describirá a detalle más adelante. Otra ventaja se encuentra al realizar las mediciones dimensionales en un ambiente controlado; es decir con condiciones de temperatura y humedad controladas. Estas últimas condiciones pueden afectar los materiales a caracterizar dimensionalmente y por lo tanto, incluir errores en dichas mediciones.

En resumen, la necesidad de un espacio con las variables ambientales controladas y que cuente con las facilidades para realizar la impresión 3D y su caracterización dimensional es crucial para alcanzar lo objetivos de este trabajo. Un laboratorio bien diseñado y equipado adecuadamente puede proporcionar el entorno necesario para el desarrollo y la mejora de la impresión 3D, permitiendo investigaciones innovadoras y mejoras en el área del diseño industrial aplicado a las cadenas de producción donde se requiera la manufactura aditiva.

Figura 3.1: Diagrama del área de trabajo

3.2. Desarrollo experimental

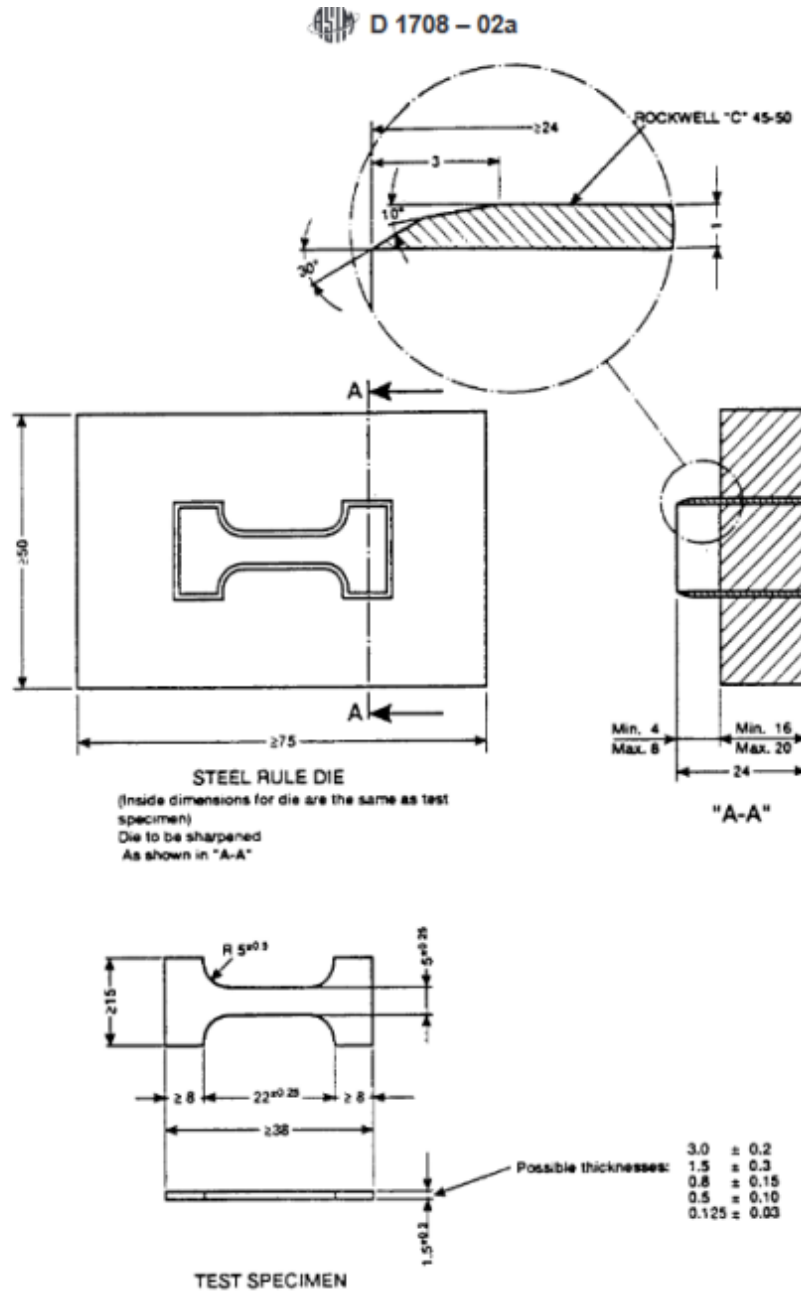
Considerando las capacidades del laboratorio descrito en la sección anterior, se plantearon los experimentos de impresión. Dichos experimentos consistieron en la impresión de un espécimen para ensayos de tracción uniaxial bajo la norma ASTM D1708 (*American Society for Testing and Materials o ASTM International*). Esta norma define las características geométricas que deben tener los especímenes para que los resultados de las mismas sean confiables. Este tipo de ensayos se requiere cuando se está validando la respuesta mecánica de nuevos materiales o simplemente para tener un buen control de calidad en un determinado proceso/producto y garantizar su resistencia mecánica.

Para realizar una serie de impresiones 3D se utilizó la geometría descrita en

3. METODOLOGÍA

la norma ASTM D1708. En esta norma es relevante mantener la geometría de los especímenes dentro de las tolerancias geométricas propuestas por la misma. En caso de que los especímenes no cumplan con la geometría requerida, los resultados concernientes a propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, resistencia última a la tensión, deformación máxima, entre otras) de material ensayado podrían verse comprometidos. La geometría descrita en la norma ASTM D1708, bajo la que se realizarán las impresiones 3D se visualizan en el espécimen o probeta que se muestra en la figura 3.2. En las siguientes subsecciones se presentará la geometría de estudio y los experimentos a realizar con sus respectivas condiciones.

Figura 3.2: Norma ASTM D1708



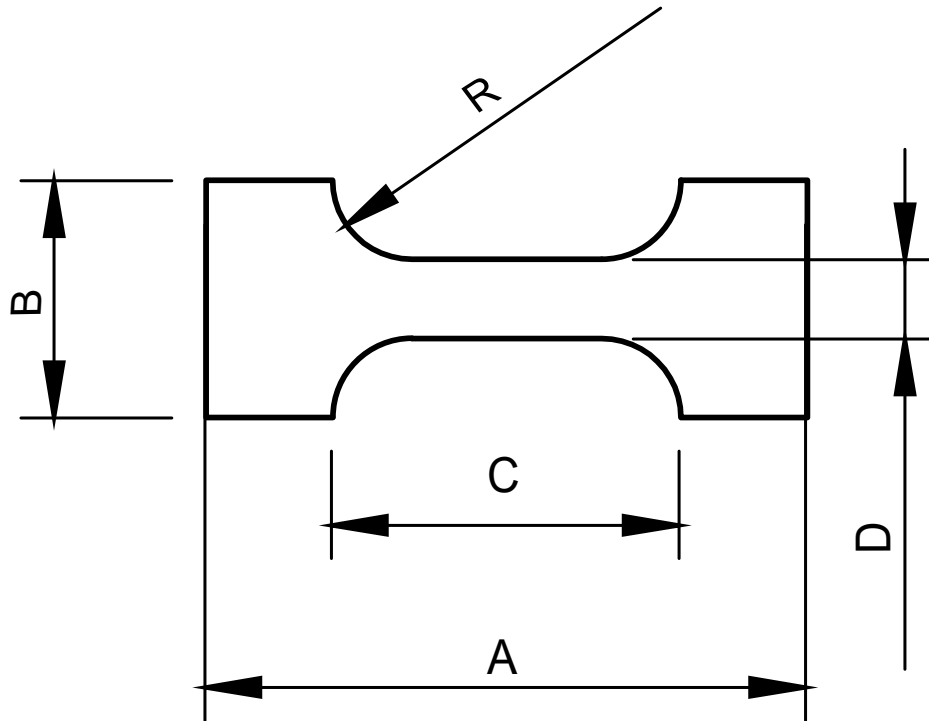
3.2.1. Geometría de estudio

El dibujo mecánico de esta probeta se realizó en el software Fusion 360 de la familia Autodesk. Fusion 360 es un software de diseño asistido por computadora (CAD) que permite a los usuarios crear modelos en dos dimensiones (2D) y tres dimensiones (3D). También permite realizar animaciones y simulaciones de movimiento e incluso realizar estudios de análisis de esfuerzos. Cabe mencionar que nuestra universidad (UNAM) cuenta con convenio con Autodesk; por lo tanto, se tiene acceso a licencias académicas para estudiantes del softwares de la familia Autodesk; entre ellos Fusion 360.

Una vez realizado el modelo digital de la geometría de la probeta bajo la norma ASTM D1708, se generó un archivo con extensión *.stl. En el se guardó toda la información requerida por los softwares de impresión 3D y su posterior procesamiento para generar el código computacional que hace posible que este tipo de máquinas realicen movimientos espaciales (xyz) perfectamente controlados en posición, velocidad y tarea asignada; este lenguaje de programación recibe el nombre de Código G, en este código se genera una serie de instrucciones basadas en comandos y coordenadas de posición (x,y,z) que indican a la máquina como moverse, así mismo se le da la instrucción al extrusor para expulsar la cantidad necesaria del material fundido y depositarlo sobre la cama de impresión. ([Altintas y Ber, 2001](#)).

En la figura 3.3 se muestra la geometría de la probeta con sus dimensiones respectivas en mm. Se resaltan aquellas cotas que deben de estar bajo una tolerancia máxima y mínima, de acuerdo a lo norma mencionada, como lo son el ancho de la zona entallada de la probeta marcada con la letra D cuya medida es de 5 ± 0.25 mm, los radios entre las cabezas de la probeta marcados con la letra R y posteriormente un número identificador cuya medida es de 5 ± 0.25 mm y la sección entallada y la distancia entre las cabezas de la probeta misma que define la zona entallada o zona de prueba de la probeta, marcada con la letra C cuya medida es de 22 ± 0.25 mm. Las otras dimensiones no tienen tolerancia geométrica como la sección del ancho de la cabeza marcada con la letra B con medida de 15 mm y el largo de la probeta, marcado con la letra A, con medida de 38 mm.

Figura 3.3: Dibujo generado de la probeta con medidas en [mm], $A= 38\text{mm}$, $B= 15\text{ mm}$, $C= 22 \pm 0.25\text{ mm}$, $D= 5 \pm 0.25\text{ mm}$ y $R= 5 \pm 0.25\text{ mm}$



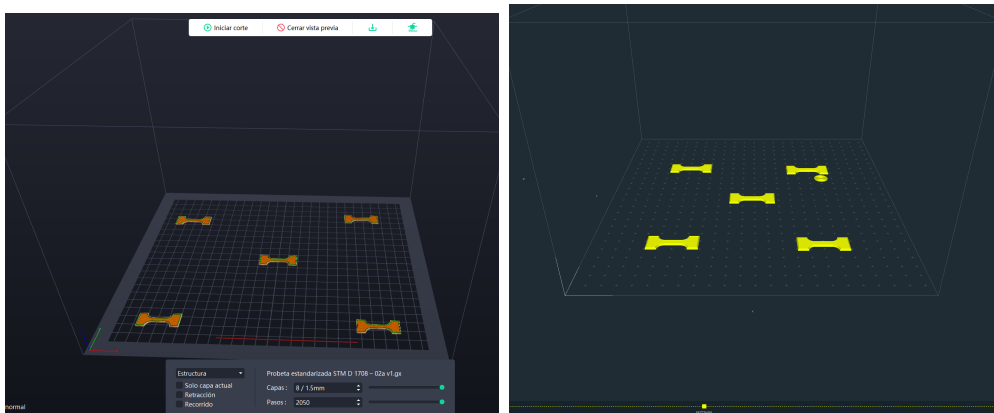
3.2.2. Impresión 3D a través del lenguaje G

Como se mencionó anteriormente, el código G es una serie de instrucciones basadas en comandos y coordenadas de posición (x,y,z) que indican a la máquina como moverse, así mismo se le dan las instrucciones al extrusor para desposicionar el material (Altintas y Ber, 2001). A continuación se presenta un pequeño segmento de código G para impresión 3D, dónde se identifican los principales comandos 3.5.

3. METODOLOGÍA

Para la obtención del código G requerido por la impresora 3D, se utilizó el mismo software de la familia de Flash Forge. Específicamente se utilizó Flash Print versión 5, el proceso es abrir el archivo de formato *.stl en el software indicado, se debe seleccionar el modelo de la impresora que se tiene y el programa va a generar un modelo de la plancha y el espacio de impresión; posteriormente se debe acomodar la pieza, seleccionar los parámetros de impresión y una vez terminado este proceso, es posible generar el código G donde el archivo generado tiene una extensión *.gx. En este programa se realizó la impresión de 5 probetas (con la geometría descrita anteriormente). Cuatro de ellas se colocaron una por esquina y una más en el centro de la cama de impresión; como se muestra en la figura 3.4 de igual manera se muestra una comparación entre las interfaces de cada impresora. Este experimento se pensó para evaluar el procedimiento de nivelación de la cama de impresión. Cabe mencionar que este tipo de impresora tiene el eje z en voladizo y la nivelación de dicho eje es susceptible a perder dicha nivelación e incurrir en errores dimensionales; principalmente en el espesor final de las muestras impresas. Este experimento también ayudará a conocer si existe una dependencia entre la posición en la cama de impresión, los parámetros geométricos y calidad de impresión de los elementos impresos.

Figura 3.4: Posición de impresión de las probetas y comparación de interfaces



(a) *FlashPrint 5*

(b) *Voxelizer3*

El código G puede cambiar según el modelo de la impresora, pero en general

tiene la misma base, para la impresora Creator Pro, los comandos tipo M, responden a ordenes misceláneas como órdenes de encender o apagar un motor o definir un estado en la impresora. Los comandos G se relacionan con el movimiento de la máquina; el comando E se utiliza para determinar la cantidad de milímetros de filamento que expulsara el extrusor, el comando S refiere a la velocidad del extrusor, el comando F a la velocidad en milímetros por segundo de la impresión. El comando T se utiliza para la selección del extrusor, en caso de contar con mas de uno. Algunos de los comandos más comunes en la impresora Creator Pro ([Flashforge, 2022](#)) son los siguientes:

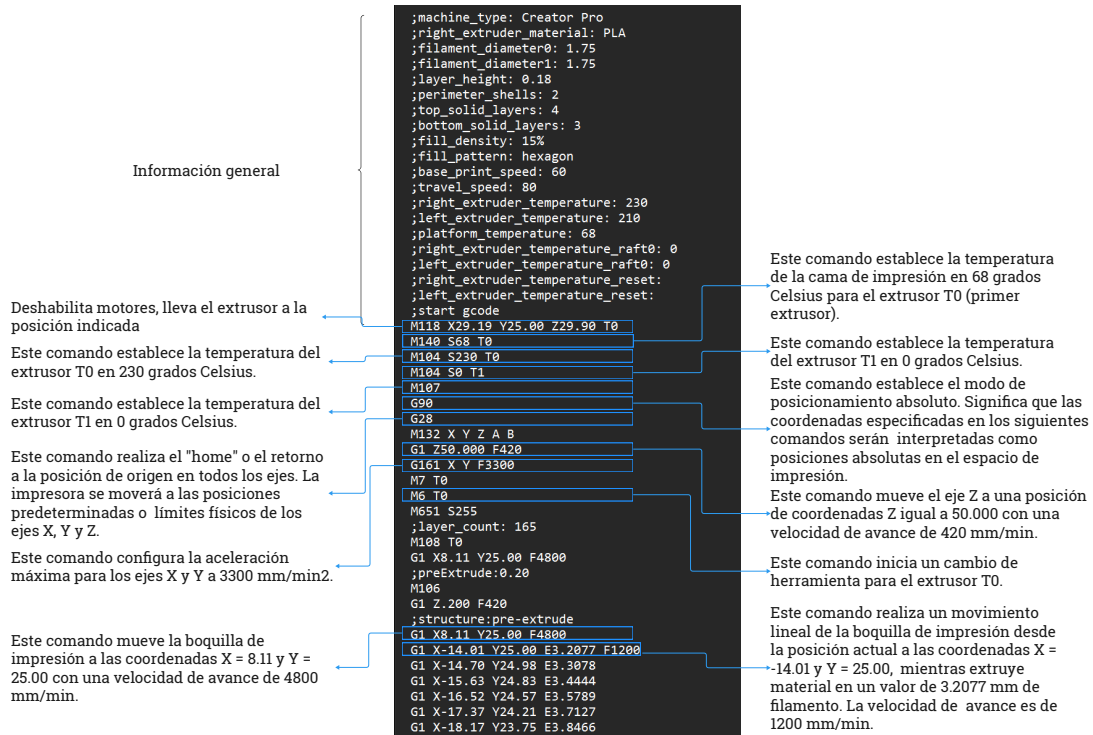
1. G0: Modo de posicionamiento absoluto.
2. G1: Modo de posicionamiento relativo.
3. G2: Arco en sentido horario.
4. G3: Arco en sentido antihorario.
5. G90: Establecer modo de posicionamiento absoluto.
6. G91: Establecer modo de posicionamiento relativo.
7. G17: Establecer plano XY (por defecto).
8. G18: Establecer plano XZ.
9. G19: Establecer plano YZ.
10. G21: Establecer unidades en milímetros (por defecto).
11. G28: Inicio de todos los ejes (home).
12. G29: Nivelación automática de la cama.
13. G10: Establecer parámetros de nivelación de la cama.
14. G11: Desactivar nivelación de la cama.
15. G12: Establecer diámetro del filamento.
16. G13: Establecer cambio de filamento.

3. METODOLOGÍA

17. M104: Establecer temperatura del extrusor.
18. M105: Obtener temperatura del extrusor.
19. M106: Establecer velocidad del ventilador.
20. M107: Detener el ventilador.
21. M140: Establecer temperatura de la cama.
22. M141: Obtener temperatura de la cama.
23. M142: Establecer velocidad del ventilador de la cama.
24. : Detener el ventilador de la cama.
25. M17: Habilitar motores.
26. M18: Deshabilitar motores.
27. M117: Mostrar mensaje.

A continuación en la figura 3.5 se presenta un fragmento de un código G generado para la impresión de una probeta estandarizada bajo la norma ASTM D1708 con la explicación de la acción de algunas líneas de código.

Figura 3.5: Fragmento de código G con explicación



Una vez concluido el proceso de impresión, se procede a despegar las impresiones y se da paso a la caracterización dimensional con instrumentos estándar como el vernier digital. Posteriormente, se procede a medir las secciones de la probeta y compararlas con las medidas del modelo digital normado, se realizan modificaciones en los parámetros de impresión y de igual manera se utilizará otra impresora disponible en el laboratorio para corroborar que el procedimiento para disminuir el error puede replicarse, la otra impresora con la que se cuenta en el laboratorio es la ZMorph Fab que se muestra en la figura ?? (b), la cual tiene una precisión de 0.2 [mm]. El código G que se utiliza en esta impresora se extrae del su propio software llamado voxelizer V3.0.

En la tabla 3.1 se muestran las características particulares de cada impresora

3. METODOLOGÍA

destacando la diferencia entre las camas de impresión.

Tabla 3.1: *Comparación de impresoras*

Característica	Creator Pro	FlashForge	ZMorph Fab
Presición		0.2 mm	0.2 mm
Tipo de cama de impresión		En voladizo	Fija

En este punto, se requiere de una herramienta estadística para evaluar la calidad de la impresión respecto a las dimensiones críticas marcadas por la norma ASTM D1708. En la siguiente sección se abordaran dichas herramientas utilizadas en la determinación de la magnitud de errores estadísticos.

3.2.3. Experimentos de impresión

En esta subsección se presentan los experimentos de impresión 3D que se realizaron en este proyecto. En todos los experimentos se utilizó la geometría descrita en la sección anterior. Esta etapa experimental consta de 5 experimentos variando parámetros críticos como la temperatura de la cama de impresión y la velocidad de la primer capa de impresión. Se utilizó PLA ColorPro de 1.75 mm como material de impresión. De inicio se tomaron las recomendaciones de temperatura de impresión del fabricante (200 ° C), el tamaño de la boquilla utilizada fue de 0.4 mm, la velocidad de impresión general fue de 60 mm/s con un alto de capa general de 0.18 mm y un alto de la primer capa de 0.27 mm. Los experimentos se llevaron acabo de la siguiente manera:

Primer experimento: Caracterización de los parámetros de impresión iniciales: para el primer experimento se realizó una serie de impresiones en un patrón de 5 probetas estandarizadas bajo la norma ASTM D1708. Cada una se imprimió en los 5 puntos espaciales clave de la cama de impresión, que son esquina superior derecha, esquina superior izquierda, esquina inferior derecha, esquina inferior derecha y centro. Este experimento permite determinar si la posición de impresión influye o afecta la calidad y dimensiones del producto impreso. Las probetas obtenidas se midieron con un vernier digital, cada probeta se midió 5 veces en cada sección (secciones A,B,C,D). El experimento se realizó de igual manera 5

veces; esto para tener una población más grande y tener una mejor estadística. Cabe mencionar que en este primer experimento los parámetros de la impresora se utilizaron tal y como se encontraban en ese momento; es decir, se utilizó la impresora sin la precaución de nivelar la cama de impresión. Este experimento revela la confiabilidad de la impresora para mantener la nivelación en su cama de impresión después de un cierto número de impresiones, para este experimento se utilizó la impresora Creator pro de FlashForge.

Segundo experimento: efecto de nivelar la cama de impresión. Se realizan los primeros ajustes de acuerdo al protocolo del fabricante para la nivelación de la cama. En este segundo experimento surge la necesidad de implementar un método óptico de medición por dos razones. La primera consiste en automatizar la medición del experimento a través de una técnica óptica de medición dimensional (vernier óptico) y así reducir el error en la medición por el factor humano. La segunda razón de implementar la técnica óptica se debió a la dificultad de medir los radios de la probeta con el vernier digital. En este segundo experimento se utilizó una temperatura de 50 grados y una velocidad de 10 mm/s, para este experimento se utilizó la impresora Creator pro de FlashForge.

Tercer experimento: disminución del efecto pie de elefante (mayor cantidad de material en la parte inferior de la impresión). En este experimento se cambiaron los parámetros de temperatura en la cama de impresión; se disminuyó a 45 ° C. Se utilizó una velocidad de impresión en la primer capa de 15 mm/s, para este experimento se utilizó la impresora Creator pro de FlashForge.

La razón por la que se eligió la temperatura de 45 ° C es porque el fabricante reporta 50 ° C para el PLA, por lo tanto se decidió explorar el efecto a una temperatura mas baja.

Cuarto experimento: Aumento de la velocidad de impresión en la primer capa. En este experimento se aumentó la velocidad de la primer capa de impresión se probó a 20 mm/s y con 30 mm/s y la temperatura de la cama de impresión se mantuvo a 45 ° C, para este experimento se utilizó la impresora Creator pro de FlashForge.

3. METODOLOGÍA

Quinto experimento: Tipo de impresora respecto a la configuración de la cama de impresión. En este experimento se utilizó una impresora de la marca ZMorph Fab. La principal diferencia entre esta impresora y la Creator Pro es la disposición de sus respectivas camas de impresión. En el primer caso la cama de impresión de la ZMorph Fab se encuentra completamente apoyada en las guías lineales de deslizamiento sobre el eje x; es decir la cama de impresión es móvil; mientras que en el caso de la Creator Pro la cama de impresión se encuentra en voladizo y únicamente tiene desplazamiento en el eje Z. En este último caso se torna mucho más complicado lograr una buena alineación de la cama de impresión. Para probar el efecto que tiene la configuración de las camas de impresión se propuso realizar este experimento partiendo de los parámetros optimizados en los experimentos anteriores (del 1 al 4); por lo tanto, se utilizaron los siguientes parámetros de impresión de 45 ° C de temperatura en la cama de impresión y 30 mm/s en la velocidad de impresión de la primer capa.

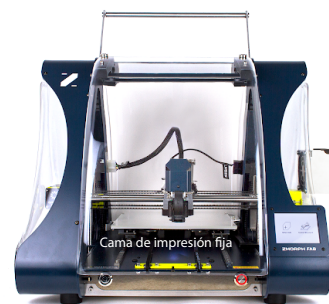
Sexto experimento: Caracterización de la impresora ZMorph Fab, haciendo uso de la metodología descrita se realizará la caracterización de la impresora ZMorph esto con la finalidad de encontrar los parámetros que mejor se ajusten a las tolerancias dimensionales, los ajustes que se realizarán serán un cambio de velocidad en la impresión de la capa inicial con una temperatura de la cama de 45 ° C, estos ajustes se realizarán de acuerdo a los resultados del experimento anterior, de igual manera se comparará con los parámetros iniciales de la impresora, los cuales son 60° C de temperatura en la cama de impresión y 18 mm/s en la velocidad de impresión en la primer capa.

Para visualizar rápidamente las condiciones de cada uno de los experimentos, se presenta un resumen en la tabla 3.2. En ella se muestran los parámetros principales de cada uno de los experimentos.

Tabla 3.2: Definición de parámetros en los experimentos

Número de Experimento	Cama Nivelada	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/s)	Instrumento de Medición	Tipo de Impresora
Primero	No	50	10	Vernier Digital	Creator Pro
Segundo	Sí	50	10	Vernier Óptico	Creator Pro
Tercero	Sí	45	15	Vernier Óptico	Creator Pro
Cuarto	Sí	45	20 y 30	Vernier Óptico	Creator Pro
Quinto	Sí	45	30	Vernier Óptico	ZMorph Fab
Sexto	Sí	45 y 60	18, 30, 34 y 45	Vernier Óptico	ZMorph Fab

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron dos impresoras: la FlashForge Creator pro y la ZMorph Fab que se muestran en las figuras 3.6(a) y 3.6(b) respectivamente. En este momento es importante mencionar las capacidades técnicas de cada una de las impresoras.

Figura 3.6: Impresoras utilizadas para los experimentos**(a) Creator Pro de FlashForge****(b) ZMorph Lab**

La impresora Creator Pro, de acuerdo al fabricante, es capaz de ofrecer una

3. METODOLOGÍA

precisión de impresión de ± 0.2 [mm] en sus tres ejes de movimiento y la cama de impresión en voladizo.

La impresora ZMorhp Fab tiene una precisión de ± 0.2 [mm] y la cama de impresión fija.

Considerando las especificaciones técnicas de ambas impresoras respecto a las tolerancias que exige la norma ASTM D1708 (± 0.25 [mm]), se observa claramente que ambas impresoras pueden cumplir con las exigencias de impresión mencionadas.

Es importante mencionar que se realizó un mayor número de experimentos en la impresora que tiene la cama de impresión en voladizo. La razón es que en esta impresora tiende haber mayor incidencia en los errores de impresión y propiamente en los asociados a las dimensiones de las piezas, otra razón es que este tipo de impresoras son más asequibles y por lo tanto están presentes en mayor número de usuarios en la comunidad *maker* y en consecuencia una mayor cantidad de material de impresión desperdiciado; por lo tanto, se vislumbra que compartir entre la comunidad *maker* un protocolo/manual para la disminución de errores dimensionales en la manufactura aditiva puede contribuir de manera importante en la disminución de material desperdiciado por impresiones fallidas (contaminación), así como el ahorro de material de impresión y por lo tanto, disminución de costos para los usuarios.

3.2.4. Determinación de errores estadísticos

Para la determinación de este tipo de errores primero se requiere considerar algunos conceptos y definiciones básicas de metrología. Recordando que la metrología es la ciencia de la medición ([Esquivel, 2015](#)).

- **Error Absoluto:** Es la diferencia entre el valor real de la medida y la que se ha obtenido en la experimentación
- **Cálculo del Error Absoluto:** $E_a = \bar{X} - X_i$

- **Calculo del Valor Real:** $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i * f_i}{n}$

Donde:

$\bar{X} \triangleq$ Valor Real.

$X_i \triangleq$ Valor experimental.

$f_i \triangleq$ Frecuencia del valor experimental.

$n \triangleq$ Número de experimentos realizados.

- **Error relativo:** Es el cociente entre el error absoluto y el valor que consideramos como exacto, se puede multiplicar por 100 para obtener el valor en porcentaje, es decir:

$$E_r = \frac{E_a}{\bar{X}} \cdot 100 \%$$

- **Error aleatorio:** Error que se presenta por variaciones impredecibles, temporales y espaciales que dan origen a las variaciones en observaciones repetidas de la variable medida.
- **Error sistemático:** Medida que resultaría de la misma magnitud en un número infinito de mediciones de la variable de interés. Este tipo de error puede deberse al instrumento de medición o incluso a una particularidad del sujeto que toma la medición.

Desviación estándar. La desviación estándar es una distribución de probabilidad que nos indica la dispersión de un conjunto de datos con respecto a la media, es decir que tanto se aleja un valor individual del valor promedio de los datos. La desviación estándar se define como la raíz cuadrada de la varianza (σ^2) (Kenney y Keeping, 1962).

$$\sigma = \sqrt{\mu'^2 - \mu^2} \tag{3.1}$$

Donde $\mu = \bar{x} = \langle x \rangle$ es la media, $\mu'^2 = \langle x^2 \rangle$ es el segundo momento descentralizado, y $\langle x \rangle$ denota el valor esperado de x . La varianza σ^2 es por lo tanto igual

3. METODOLOGÍA

al segundo momento central (es decir, el momento con respecto a la media).

$$\sigma^2 = \mu_2 \quad (3.2)$$

La raíz cuadrada de la varianza muestral de un conjunto de N valores es la desviación estándar muestral.

$$S_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.3)$$

La distribución de la desviación estándar muestral es una función ligeramente complicada, aunque bien estudiada y comprendida.

Sin embargo, debido a la terminología inconsistente y ambigua, a veces también se conoce como desviación estándar a la raíz cuadrada de la varianza corregida por sesgo.

$$\sigma^2 = \mu_2 \quad (3.4)$$

La raíz cuadrada de la varianza muestral de un conjunto de N valores es la desviación estándar muestral.

$$S_{N-1} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.5)$$

En *Wolfram Mathematica* La desviación estándar S_{N-1} de una lista de datos se implementa como `StandardDeviation[list]`.

Los científicos y físicos a menudo usan el término “raíz cuadrada de la media de los cuadrados” como sinónimo de desviación estándar cuando se refieren a la raíz cuadrada de la desviación cuadrada media de una cantidad con respecto a un valor de referencia dado.

La desviación estándar surge naturalmente en la estadística matemática a través de su definición en términos del segundo momento central. Sin embargo, una medida más natural pero menos frecuente de la desviación promedio de la media utilizada en estadísticas descriptivas es la llamada desviación media.

En este caso en particular podemos asumir que la tolerancia geométrica marcada por la norma ASTM D1708 es una desviación estándar permitida dentro del rango del fabricante, por lo que el hecho de que nuestros datos muestren que su desviación estándar permanezca dentro de límites de tolerancia marcada por el estándar ASTM D1708 podemos asegurar que cumplen con la norma. Esto quiere decir que se tomaron los datos y se calculó su desviación estándar ya que esta debe estar dentro de la tolerancia geométrica marcada por la norma. Los errores relativos se calculan al final para conocer el porcentaje de efectividad de aplicar los cambios considerados.

Capítulo 4

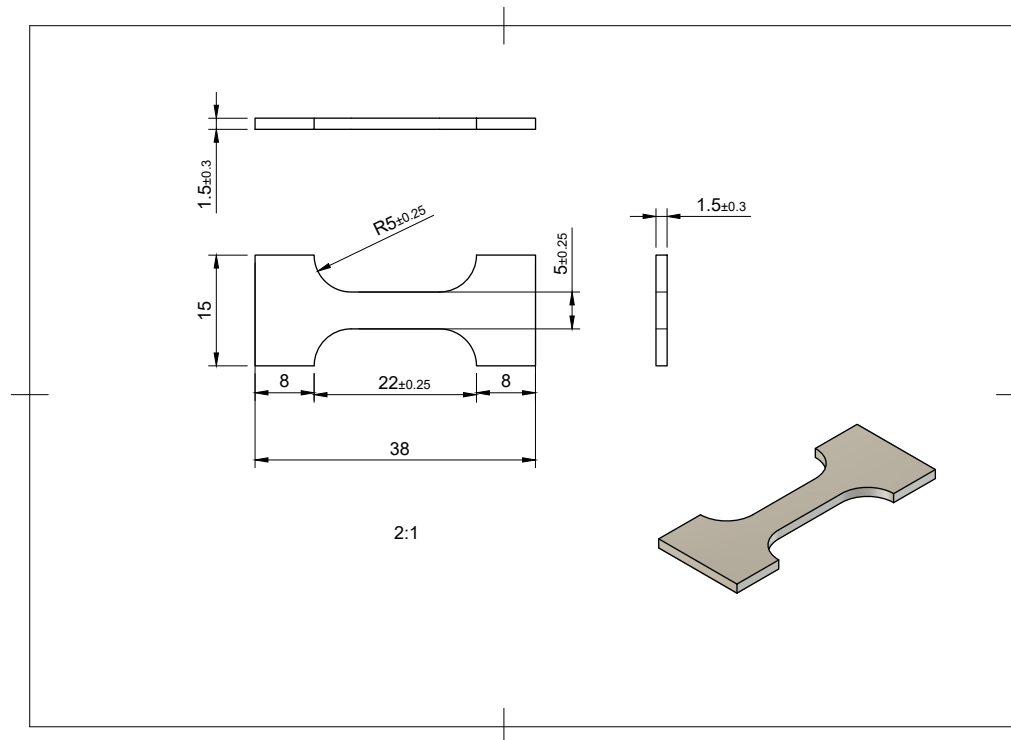
Resultados

4. RESULTADOS

4.1. Resultados de la geometría

Se utilizó el programa Fusion 360 de Autodesk para dibujar la geometría de la probeta seleccionada y estandarizada bajo la norma ASTM D1708, en la figura 4.1 se muestra dicha geometría con las cotas generadas en el software. Así mismo se destaca el uso e indicación de las tolerancias dimensionales establecidas por la norma anteriormente mencionada.

Figura 4.1: Dibujo mecánico de la probeta de tracción uniaxial bajo la norma ASTM D1708, Escala 2:1 con dimensiones en milímetros.



4.2. Resultados del código G

Para obtener el código G, es necesario generar un archivo *.stl. En este tipo de archivos se aproxima la geometría del objeto deseado a través de estructuras triangulares formando una malla.

El archivo *.stl se importa al software FlasPrint 5, en donde se obtuvo el código *.gx con las instrucciones para el funcionamiento de la impresora 3D. A continuación, se muestran las primeras 50 líneas del código G, esto con el objetivo de visualizar el tipo de instrucciones que siguió la máquina de forma inicial, así como generar cualquier cambio de manera rápida directamente en el código; el código final generó un total de 14605 líneas. Con este código fue posible imprimir las probetas en una serie de experimentos de los cuales se presentarán los resultados a continuación.

```
1      ;machine_type: Creator Pro
2      ;right_extruder_material: PLA
3      ;filament_diameter0: 1.75
4      ;filament_diameter1: 1.75
5      ;layer_height: 0.18
6      ;perimeter_shells: 2
7      ;top_solid_layers: 4
8      ;bottom_solid_layers: 3
9      ;fill_density: 15%
10     ;fill_pattern: hexagon
11     ;base_print_speed: 60
12     ;travel_speed: 80
13     ;right_extruder_temperature: 200
14     ;left_extruder_temperature: 210
15     ;platform_temperature: 50
16     ;right_extruder_temperature_raft0: 0
```


4. RESULTADOS

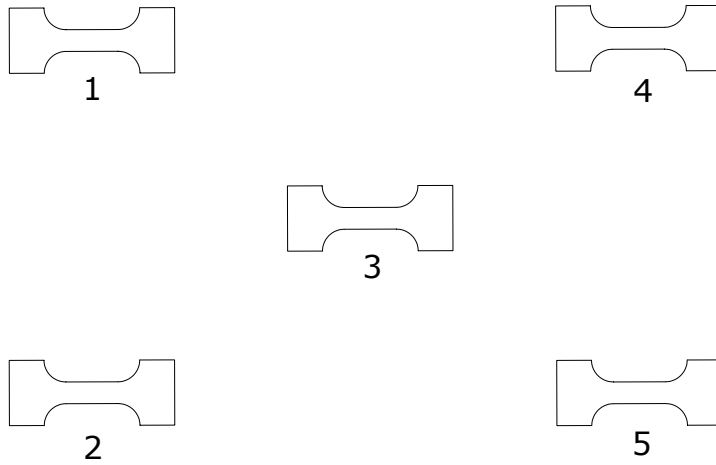
```
17      ;left_extruder_temperature_raft0: 0
18      ;right_extruder_temperature_reset:
19      ;left_extruder_temperature_reset:
20      ;start gcode
21      G90 ;absolute positioning
22      M118 X25.00 Y25.00 Z20.00 T0
23      M140 S40 T0 ;Heat bed up to first layer temperature
24      M104 S200 T0 ;Set nozzle temperature to first layer
           temperature
25      M107 ;start with the fan off
26      G90
27      G28
28      M132 X Y Z A B
29      G1 Z50.000 F420
30      G161 X Y F3300
31      M7 T0
32      M6 T0
33      M651
34      M907 X100 Y100 Z40 A100 B20 ;Digital potentiometer
           value
35      M108 T0
36      ;Purge line
37      G1 X-110.00 Y-60.00 F4800
38      G1 Z0.28 F420
39      G1 X-110.00 Y60.00 E17,4 F1200
40      ;Purge line end
41      G92 E0
42      G92 E0
43      G1 F2400 E-1.3
44      ;LAYER.COUNT:7
```

```
45      ;LAYER:0
46      M107
47      G0 F3000 X3.69 Y2.111 Z0.28
48      ;TYPE:SKIRT
49      G1 F2400 E0
50      G1 F1500 X-8.682 Y2.111 E0.57609
```

4.3. Resultados del primer experimento: el efecto de los parámetros iniciales

Se realizó una serie de impresiones de la probeta, cada impresión consistió de 5 probetas en el siguiente orden de impresión, como se muestra en la figura 4.2, como se mencionó anteriormente, esto para determinar si la posición de impresión influye en el resultado final. El orden de impresión es el siguiente: 1 esquina superior derecha, 2 esquina inferior derecha, 3 centro, 4 esquina superior izquierda y 5 esquina inferior izquierda. A primera vista la calidad de impresión y el tamaño de las probetas parece ser igual en todas las posiciones; sin embargo, al momento de realizar las mediciones con un vernier se notó que no es así. Es importante mencionar que para este primer experimento se utilizaron los parámetros de configuración inicial con los que ya contaba la impresora y no se realizó ninguna especie de calibración física de la impresora.

Figura 4.2: *Orden de impresión*



En las primeras impresiones se encontró un error llamado comúnmente pie de elefante tal y como se aprecia en la figura 4.3. Este error es causado por una mala calibración en la base de la cama de impresión donde el eje Z se encuentra demasiado cerca de la cama y se caracteriza porque la base de la impresión es más ancha que el resto, dando el efecto visual de una base o un pie de elefante. Como se aprecia en lo reportado en la literatura ([Aranda, 2020](#)).

4.3 Resultados del primer experimento: el efecto de los parámetros iniciales

Figura 4.3: *Pie de elefante en las primeras impresiones*



Las primeras mediciones se obtuvieron de manera manual con el uso de un vernier digital como se muestra en la figura 4.4.

4. RESULTADOS

Figura 4.4: *Uso del vernier en la obtención de medidas*



Tras obtener las medidas de manera manual se hizo uso del software *Wolfram Mathematica* para generar una serie de gráficas, donde se comparan los datos obtenidos calculando valores promedio y sus respectivas desviaciones estándar; a continuación se muestra el código utilizado para obtener la gráfica del lado A mediante el software mencionado.

Posteriormente se realizaría el mismo procedimiento con el resto de datos en las diferentes secciones.

4.3 Resultados del primer experimento: el efecto de los parámetros iniciales

```
1      %% DATOS
2      datAE1 = {{1, 38.06}, {2, 38.12}, {3, 38.016}, {4, 38.22},
3              {5, 38.012}};
4      datApos1 = {{1, 38.06}, {2, 38.08}, {3, 38.01}, {4, 38.03},
5                {5, 38.08}};
6      datApos2 = {{1, 38.11}, {2, 38.03}, {3, 38.05}, {4, 38.05},
7                {5, 38.11}};
8      datApos3 = {{1, 38.19}, {2, 38.03}, {3, 38.03}, {4, 38.03},
9                {5, 38.19}};
10     datApos4 = {{1, 38.11}, {2, 38.07}, {3, 38.03}, {4, 38.01},
11               {5, 38.11}};
12     datApos5 = {{1, 38.11}, {2, 38.06}, {3, 37.97}, {4, 38.98},
13               {5, 38.11}};
14     AE1dimA = Apply[#2 &, datAE1, 1];
15     Apos1dim = Apply[#2 &, datApos1, 1];
16     Apos2dim = Apply[#2 &, datApos2, 1];
17     Apos3dim = Apply[#2 &, datApos3, 1];
18     Apos4dim = Apply[#2 &, datApos4, 1];
19     Apos5dim = Apply[#2 &, datApos5, 1];
20     %% ESTADISTICA
21     AE1std = {{1, Around[38.06, StandardDeviation[AE1dimA]]},
22              {2, Around[38.12, StandardDeviation[AE1dimA]]}, {3,
23              Around[38.016, StandardDeviation[AE1dimA]]}, {4, Around
24              [38.22, StandardDeviation[AE1dimA]]}, {5, Around[38.012,
25              StandardDeviation[AE1dimA]]}};
26     Apos1std = {{1, Around[38.06, StandardDeviation[Apos1dim]]},
27                {2, Around[38.08, StandardDeviation[Apos1dim]]}, {3,
28                Around[38.01, StandardDeviation[Apos1dim]]}, {4, Around
29                [38.03, StandardDeviation[Apos1dim]]}, {5, Around[38.08,
```

4. RESULTADOS

```
StandardDeviation[Apos1dim]]}];
17 APos2std = {{1, Around[38.11, StandardDeviation[Apos2dim]]},
    {2, Around[38.03, StandardDeviation[Apos2dim]]}, {3,
    Around[38.05, StandardDeviation[Apos2dim]]}, {4, Around
    [38.05, StandardDeviation[Apos2dim]]}, {5, Around[38.11,
    StandardDeviation[Apos2dim]]}}];
18 APos3std = {{1, Around[38.19, StandardDeviation[Apos3dim]]}, {2,
    Around[38.03, StandardDeviation[Apos3dim]]}, {3, Around
    [38.03, StandardDeviation[Apos3dim]]}, {4, Around[38.03,
    StandardDeviation[Apos3dim]]}, {5, Around[38.19,
    StandardDeviation[Apos3dim]]}}];
19 APos4std = {{1, Around[38.11, StandardDeviation[Apos4dim]]}, {2,
    Around[38.07, StandardDeviation[Apos4dim]]}, {3, Around
    [38.03, StandardDeviation[Apos4dim]]}, {4, Around[38.01,
    StandardDeviation[Apos4dim]]}, {5, Around[38.11,
    StandardDeviation[Apos4dim]]}}];
20 APos5std = {{1, Around[38.11, StandardDeviation[Apos5dim]]}, {2,
    Around[38.06, StandardDeviation[Apos5dim]]}, {3, Around
    [37.97, StandardDeviation[Apos5dim]]}, {4, Around[38.98,
    StandardDeviation[Apos5dim]]}, {5, Around[38.11,
    StandardDeviation[Apos5dim]]}}];
21 %% GRAFICAS
22 ListPlot[{APos1std, APos2std, APos3std, APos4std, APos5std},
    Frame -> True, Joined -> False, FrameStyle -> {{Black,
    (FontFamily -> "Arial"), 12}, {Black, (FontFamily -> "
    Arial"), 15}, {Automatic}, {Automatic}}, PlotMarkers -> {
    Automatic, 8}, Axes -> False, PlotStyle -> {{Red, Thick},
    {Green, Thick}, {Blue, Thick}, {Orange, Thick}, {Brown,
    Thick}}, FrameTicks -> {{Automatic, Automatic}, {
    Automatic, Automatic}}, PlotLegends -> Placed[{"A Pos 1",
```

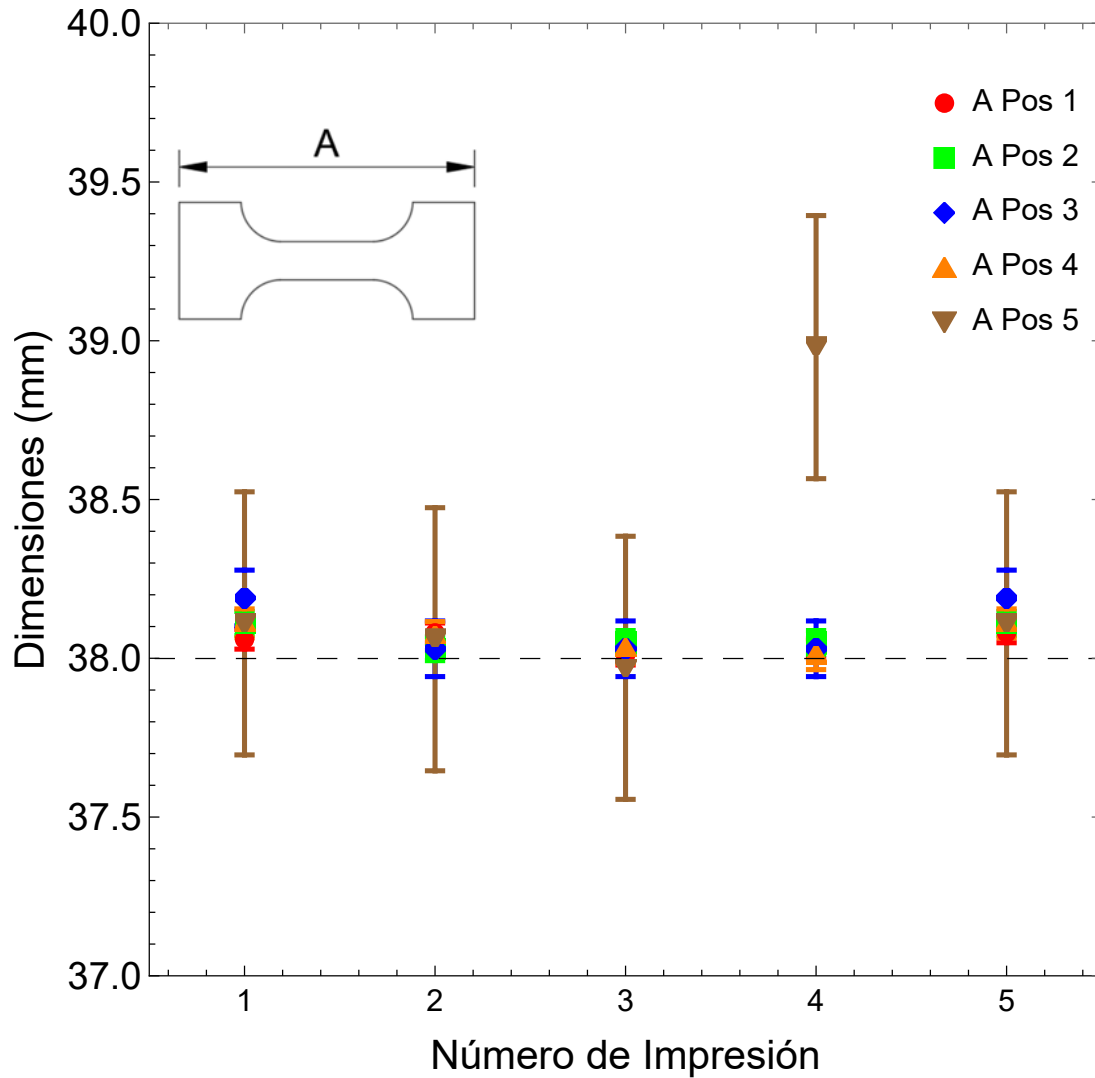
4.3 Resultados del primer experimento: el efecto de los parámetros iniciales

```
"A Pos 2", "A Pos 3", "A Pos 4", "A Pos 5"}, {0.9,
0.8}], FrameLabel -> {StyleForm["N mero de Impresi n",
FontSize -> 16], StyleForm["Dimensiones (mm)", FontSize
-> 16]}, ImageSize -> 72 6, AspectRatio -> 1, PlotRange
-> {{0.5, 5.5}, {37, 40}}
```

El código mencionado anteriormente da como resultado una gráfica mostrada en la figura 4.5; donde se presentan en formato gráfico los resultados asociados a las dimensiones de la sección A de la probeta. En el eje de las ordenadas se muestran las dimensiones de la sección A medida para cada una de las probetas (en total son 25), el número de ciclo de impresión en el eje de las abscisas, y la posición que tenían en la cama de impresión, separada por colores y marcadores (circulo rojo es la posición 1, cuadrado verde es la posición 2, rombo azul es la posición 3, triángulo anaranjado es la posición 4 y triángulo invertido marrón es la posición 5) que se representan en la gráfica junto con su respectiva desviación estándar (esta se observa en forma de barra indicando el valor máximo y el mínimo en esta serie de impresiones). También se muestra una línea punteada que representa el valor esperado que en este caso es de 38 mm, de acuerdo a la norma ASTM D-1708. Con respecto a los datos en la gráfica se nota que en la impresión número 4 la mayoría de los datos están cerca a la medida esperada, menos en la posición número 5, lo que se debe a la mala calibración de la cama de impresión y a un posible error humano al momento de medir. En el resto de impresiones (número 1, 2, 3 y 5) nos damos cuenta que la mayoría de los datos esta por encima del valor esperado y se alejan un máximo de 0.5 mm del mismo.

4. RESULTADOS

Figura 4.5: Medidas obtenidas con vernier sección A

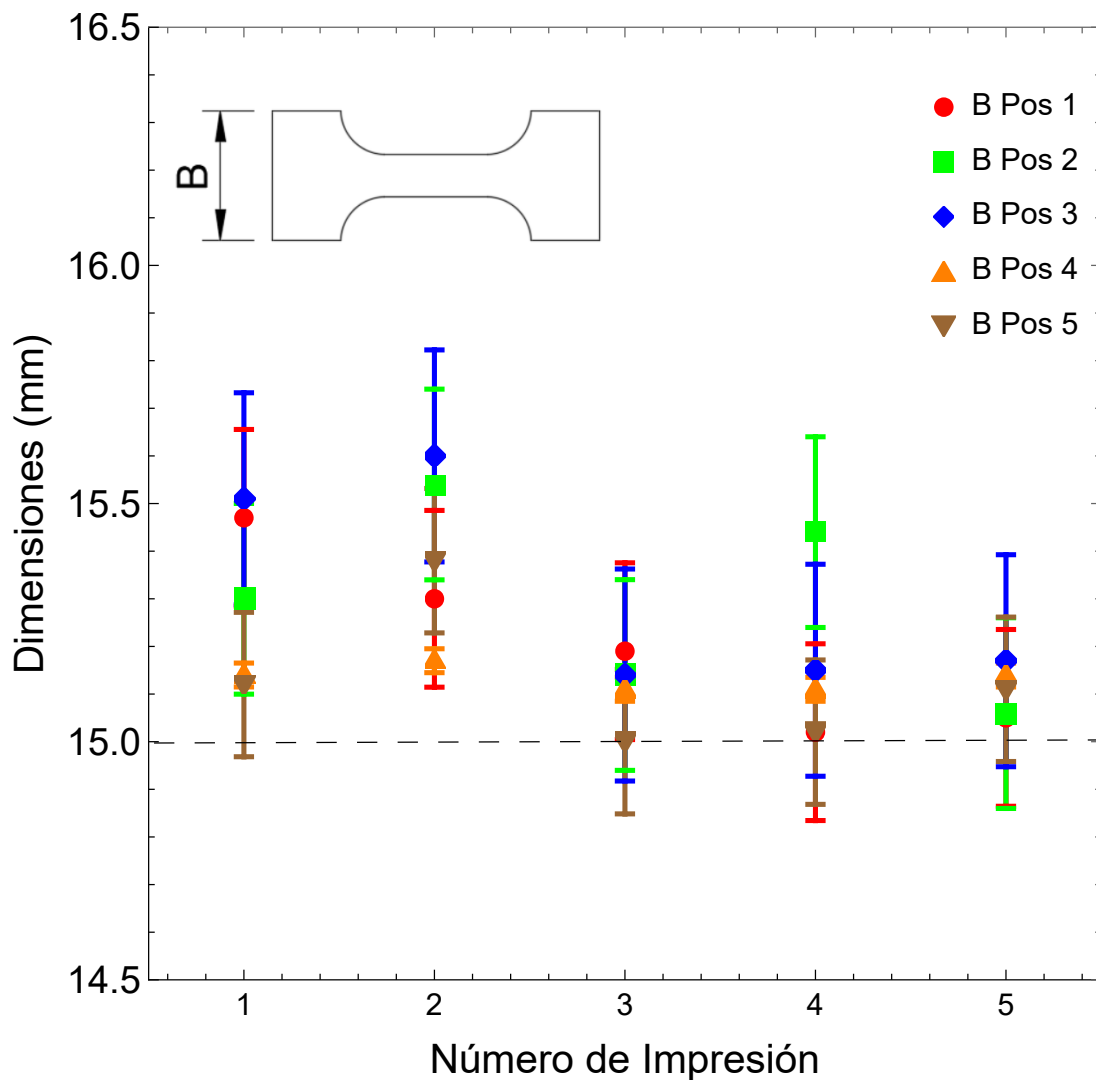


Usando un código similar de Wolfram mathematica, presentado en secciones anteriores, se obtuvieron las gráficas de las secciones mostradas anteriormente en la figura 3.3 (A,B,C,D) y el grosor de la probeta. En la figura 4.6 se presentan los resultados gráficos de la medición en la sección B, en este caso podemos observar

4.3 Resultados del primer experimento: el efecto de los parámetros iniciales

que la mayoría de datos se encuentran por encima del valor esperado, en particular en el caso de la impresión 2, donde se observa que los datos se alejan al menos 0.1 mm y hasta 0.6 mm de este valor. Aunque hay valores cercanos al valor esperado podemos observar, por el tamaño de la desviación estándar en cada posición, que existen errores dimensionales importantes.

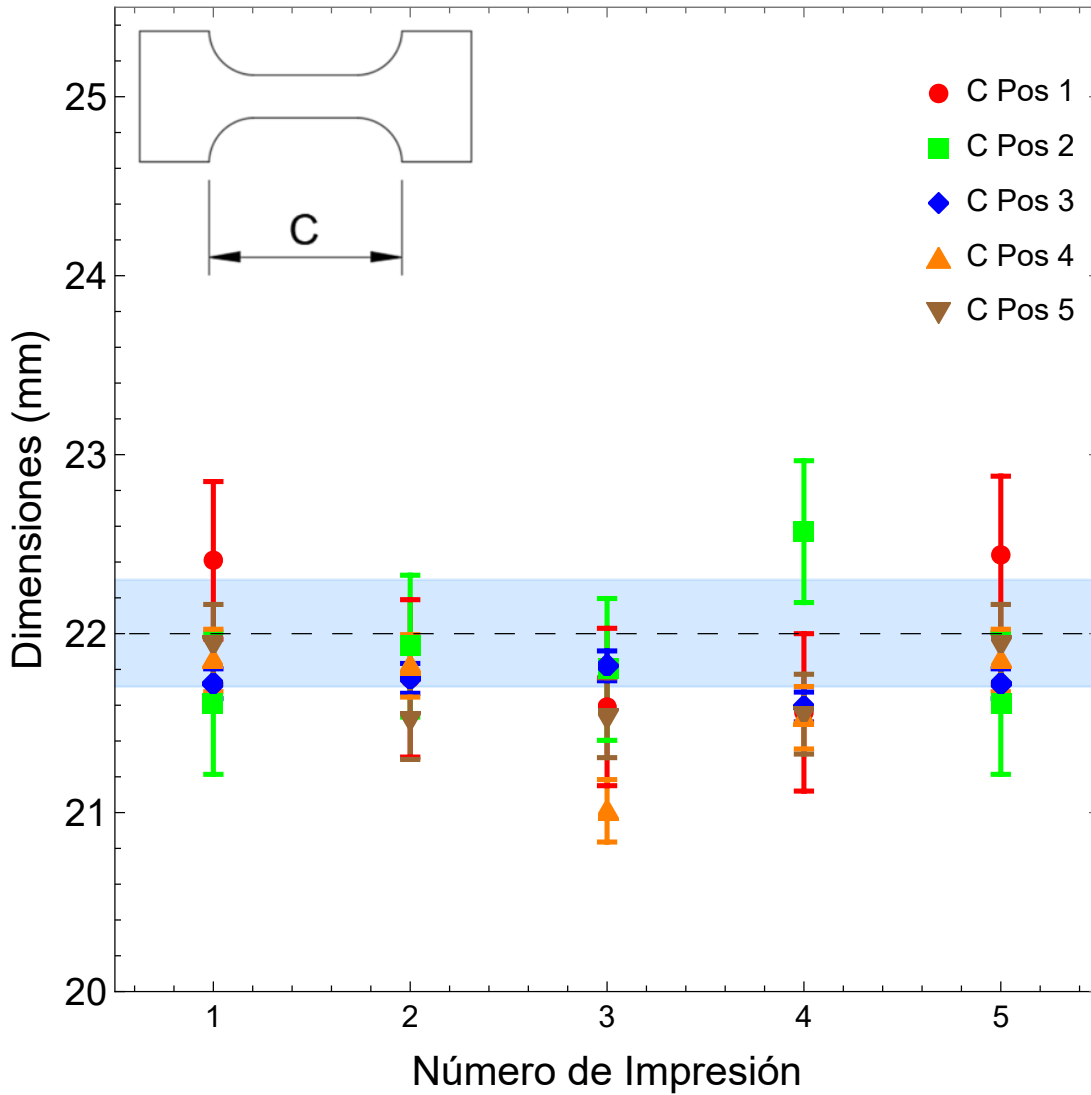
Figura 4.6: *Medidas obtenidas con vernier sección B*



4. RESULTADOS

En la sección C, mostrada en la figura 4.7, además de mostrar las características gráficas ya mencionadas con anterioridad, se agrega un fondo de color azul que representa el área de la tolerancia dimensional marcada por la norma ASTM D1708, en este caso se encuentra entre los 21.75 mm y 22.25 mm, siendo una tolerancia de ± 0.25 mm, esta tolerancia se repite en la sección C y más adelante en las secciones de los radios son el mismo valor de 0.25 mm en las secciones anteriores (A y B) no existe una tolerancia dimensional marcada por dicha norma; como dato particular, para esta sección se notó que la posición 2 de la impresión número 4 tiene una diferencia considerable con el resto de medidas, que incluso sale de la zona de tolerancia dimensional, esto se repite en la sección B, mostrada anteriormente, por lo que este error es atribuido a una mala medición física (error humano).

Figura 4.7: Medidas obtenidas con vernier sección C

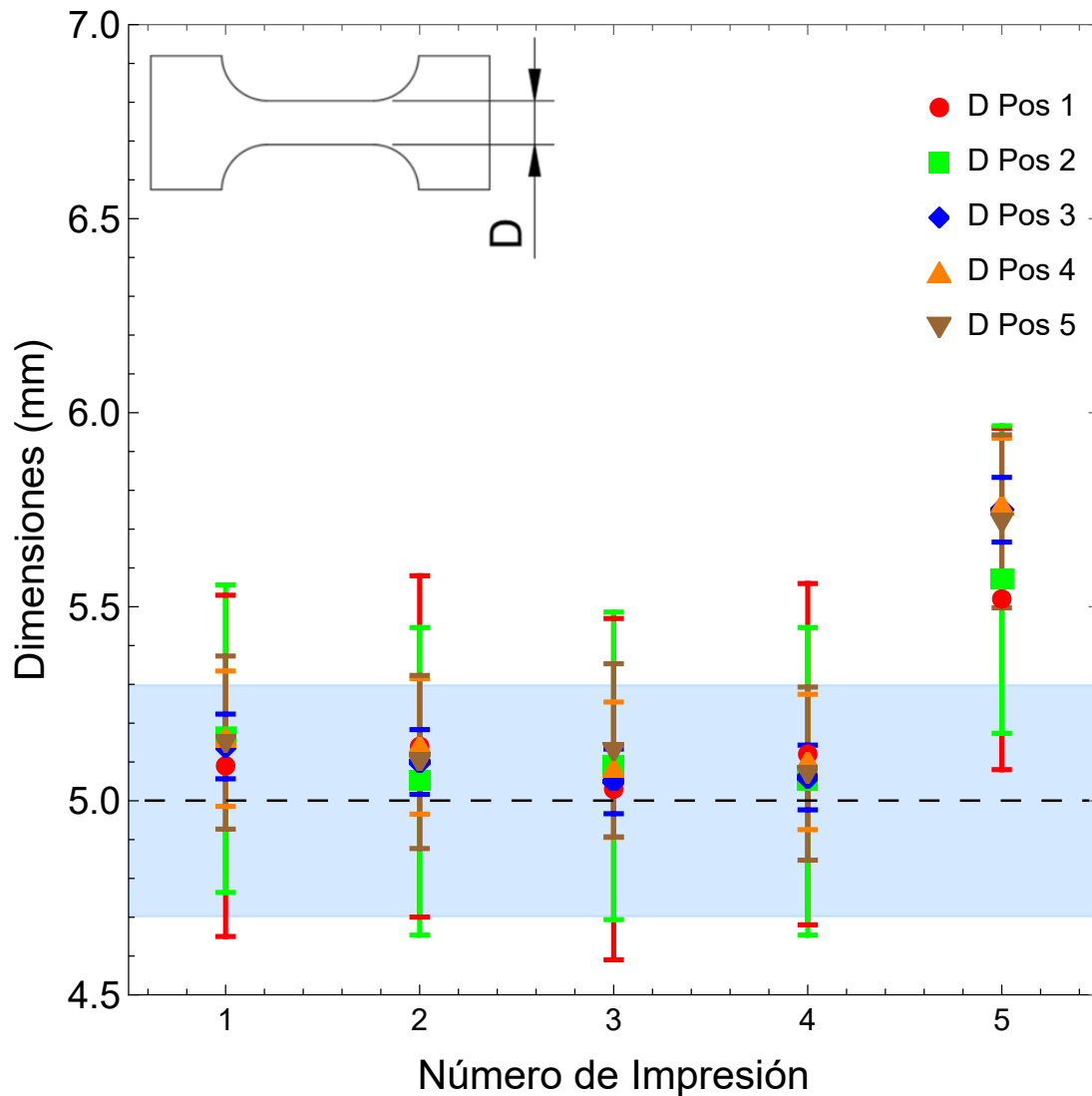


Para la sección D, mostrada en la figura 4.8, se nota que la mayoría de las medidas se encuentran dentro del espectro de tolerancias permitidas, a excepción de los valores de la impresión número 5 donde todos los valores exceden conside-

4. RESULTADOS

rablemente el rango de tolerancia, de igual manera nos damos cuenta que todos los datos están por encima del valor esperado. Lo anterior se podría atribuir a la nivelación de la cama de impresión.

Figura 4.8: Medidas obtenidas con vernier sección D



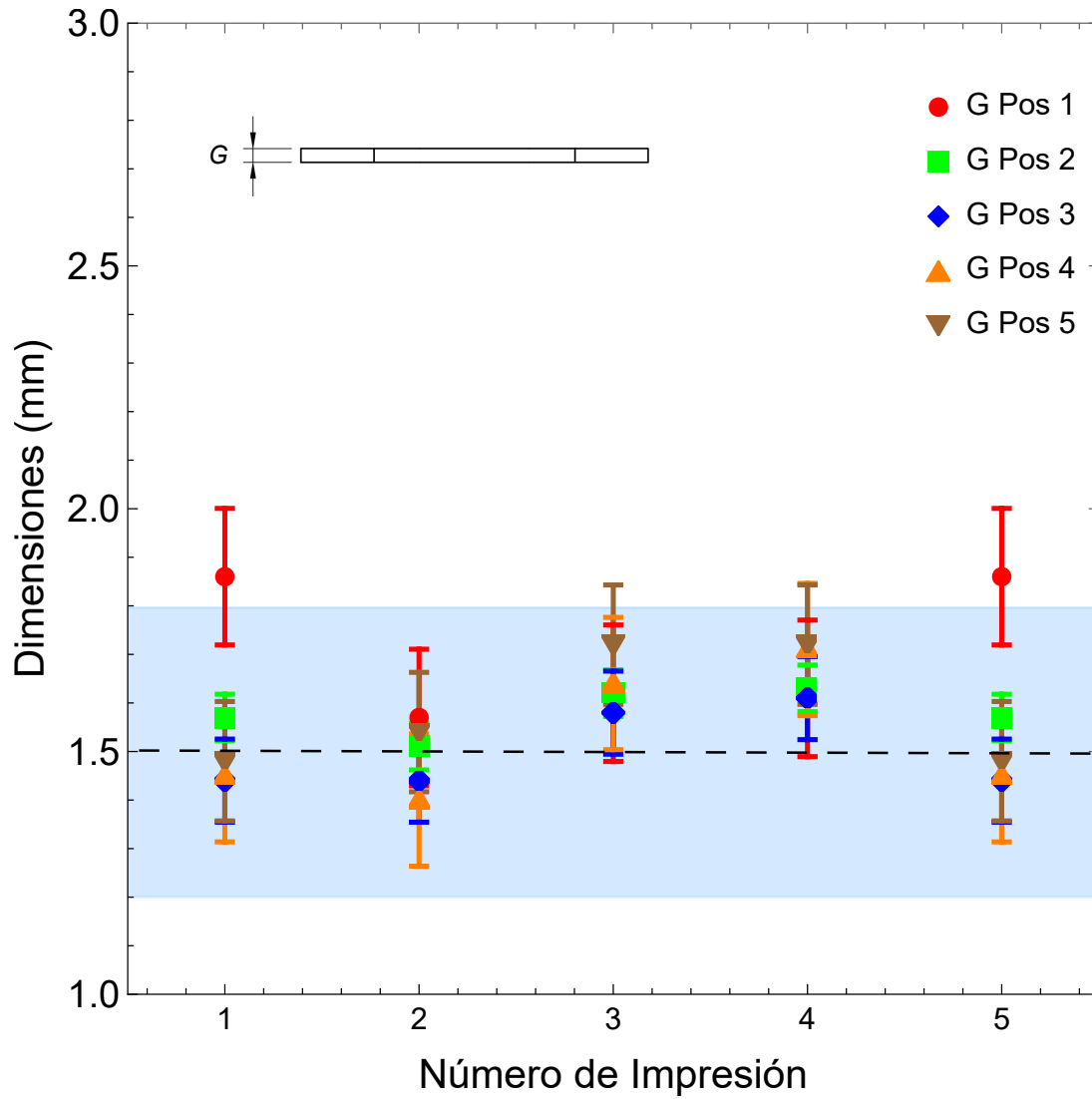
4.3 Resultados del primer experimento: el efecto de los parámetros iniciales

En la figura 4.9 se muestran el grosor de la probeta, es decir, las medidas en el eje Z.

En este caso se observan dos puntos fuera de la zona de tolerancia en la posición 1 tanto para la impresión 1 como para la 5. Ambas mediciones mostraron un valor en espesor de 1.86 mm. El resto de los datos asociados al espesor de la probeta se encontraron dentro de la zona de tolerancia marcada por norma, aun sin realizar cambios de parámetros, por lo que en experimentos futuros no se analizará esta sección.

4. RESULTADOS

Figura 4.9: Medidas obtenidas con vernier sección del grosor



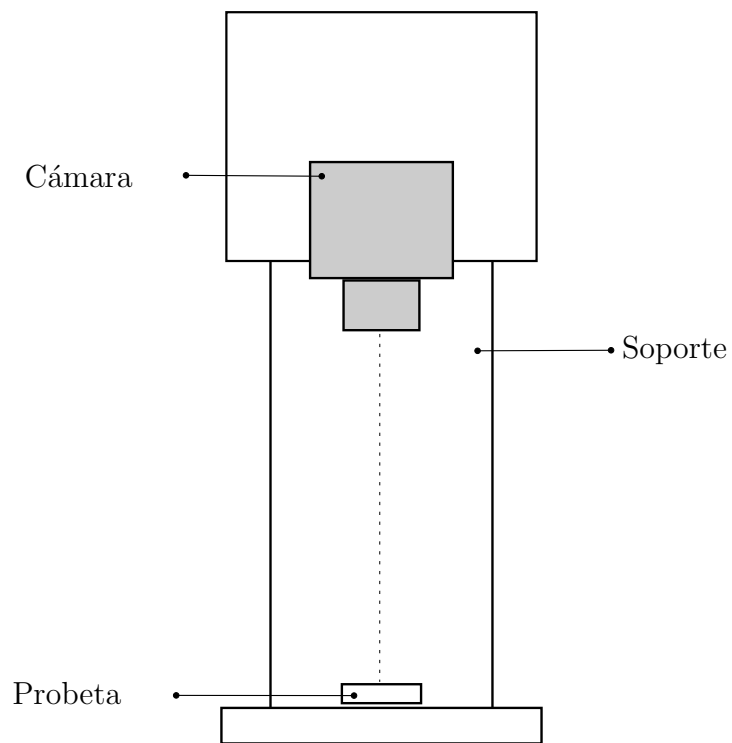
4.4. Resultados del segundo experimento: el efecto de la cama de impresión

En el primer experimento el error humano estuvo muy presente al momento de realizar mediciones; de igual manera, se dificultó la forma de medir los radios es por esto que se implementó una medición óptica, para esto se hizo uso del software Visual Assist de National Instruments. Se trata de una herramienta de programación gráfica basada en LabVIEW que permite a los usuarios crear interfaces de usuario personalizadas para sus aplicaciones de medición y automatización. El software es especialmente útil para la creación de aplicaciones de control y monitoreo de procesos, y es compatible con una amplia variedad de dispositivos de medición y control. Visual Assistant proporciona una interfaz gráfica de usuario fácil de usar que permite a los usuarios crear, depurar y desplegar aplicaciones de medición y control con rapidez y eficiencia de manera óptica. Además, el software incluye una amplia biblioteca de componentes y herramientas de análisis de imágenes para facilitar el desarrollo de aplicaciones personalizadas.

Al usar este software junto con equipo especializado en el laboratorio esperamos una disminución en el error de medición provocado por el factor humano. Se usó la cámara CCD1240C con un lente C VIS-NIR de la marca THORLABS, la cual es montada en un soporte para tomar la captura de las imágenes de las probetas y analizar sus datos métricos con el software antes descrito como se muestra en la figura 4.10.

4. RESULTADOS

Figura 4.10: *Diagrama del sistema de digitalización de imágenes.*

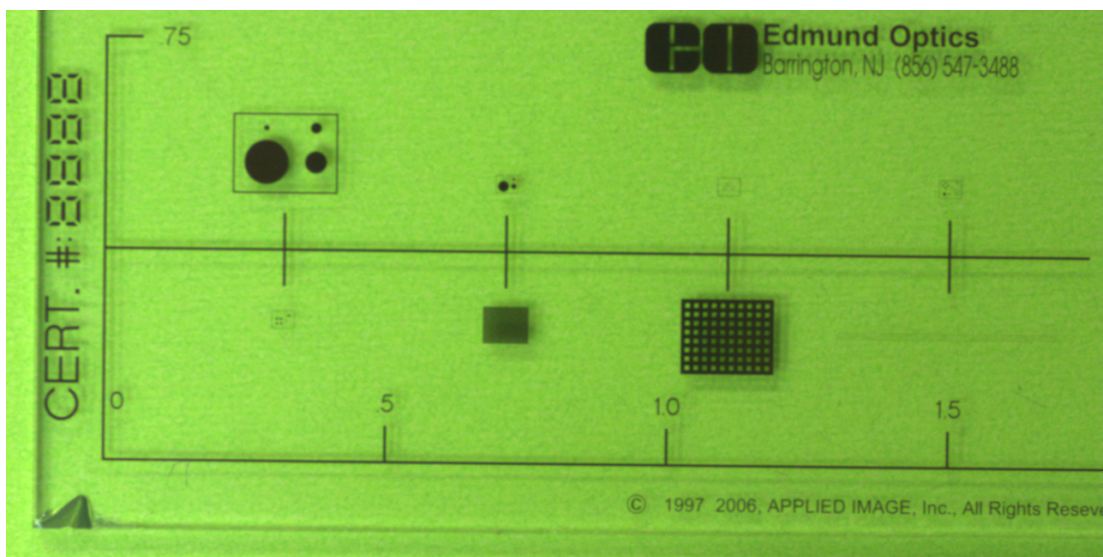


La cámara obtiene la imagen en un formato *.jpg el cual está conformado por

4.4 Resultados del segundo experimento: el efecto de la cama de impresión

pixeles que unidos representan esta imagen. Para obtener la relación del tamaño del pixel en milímetros, se requiere una calibración. Por lo tanto se utilizó una rejilla de calibración óptica, la cual está certificada por el NIST y cumple con la norma ASTM-E112. La rejilla es de la marca Edmund Optics mostrada en la figura 4.11, utilizada comúnmente para análisis micrómetros a partir de un instrumento óptico, ver figura 4.12.

Figura 4.11: *Rejilla de calibración*



Una vez capturada la imagen de la rejilla de calibración en el sistema óptico, se obtuvieron las coordenadas (en pixeles) para relacionar la medida digital con la real (mm). Las coordenadas se obtienen manualmente, a través de 5 repeticiones por coordenada, esto con el objetivo de realizar una regresión lineal que se puede observar en la figura 4.13 y así minimizar el error humano.

4. RESULTADOS

Figura 4.12: *Parámetros en la rejilla*

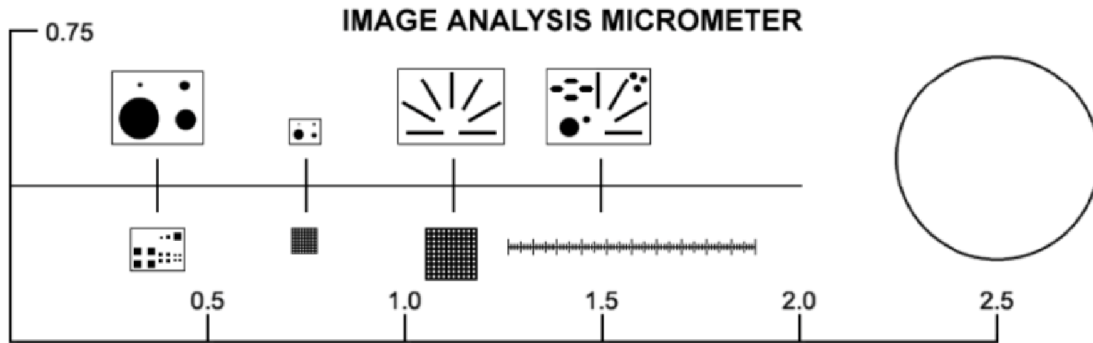
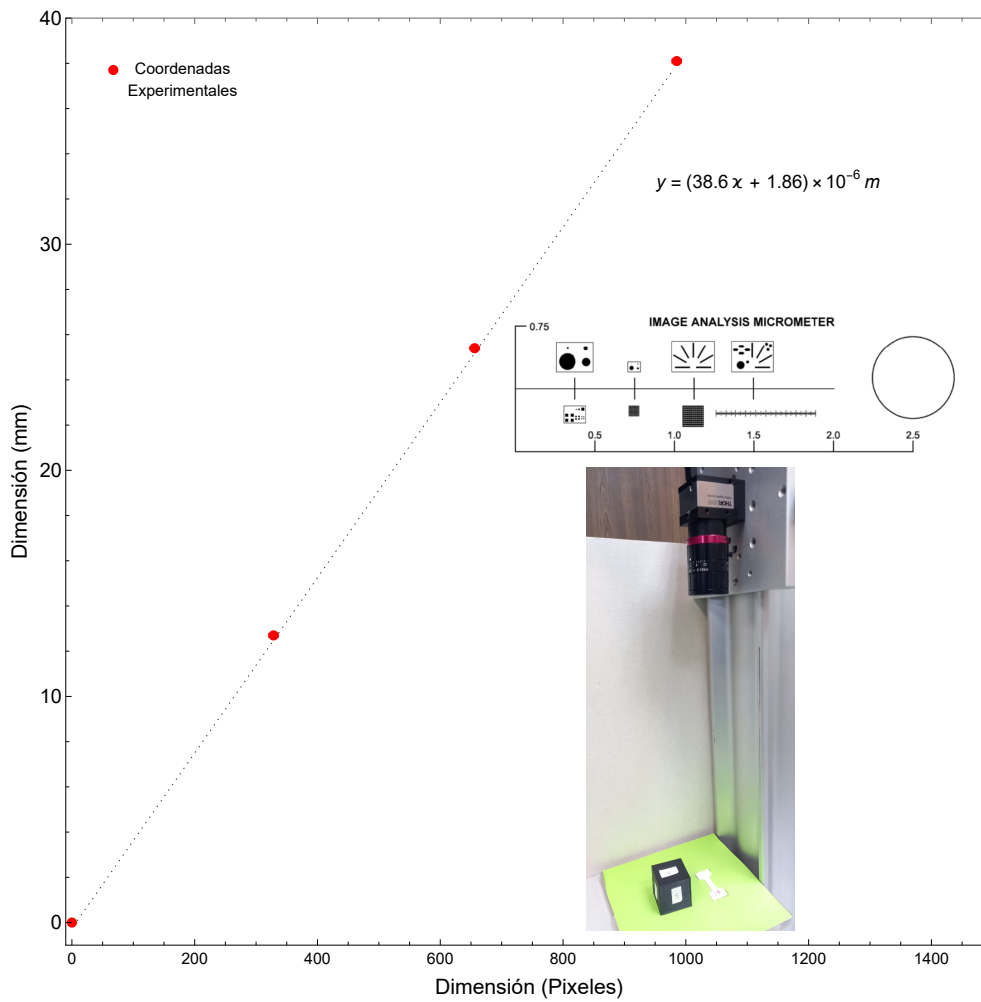


Figura 4.13: *Relación milímetros-píxel*



Como resultado se obtuvo la pendiente de la gráfica anterior a través de un modelo que relaciona los pixeles de la cámara con los milímetros en el mundo real, es importante mencionar que esta calibración solamente será válida para esta configuración que involucra la cámara CCD1240C, el lente C VIS-NIR y altura utilizada (320 mm) en el proceso experimental. Si alguno de estos elementos o incluso la distancia cambia se tendrá que repetir el proceso de calibración; el modelo obtenido en dicha calibración es el siguiente.

$$y = 38.6X + 1.86 \quad (4.1)$$

donde: 38.6 se encuentra en micrómetros por pixel.

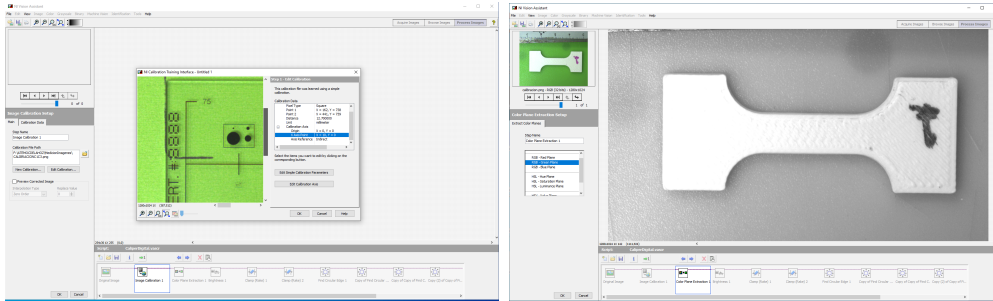
$$\therefore 1[\text{pixel}] = 38.6[\mu\text{m}] \pm 0.02$$

Para el uso del software se usaron los siguientes módulos de filtrado y análisis de imágenes para la preparación de las mismas:

- (*Image Calibration*) Este sub-instrumento virtual se utiliza para cargar el valor o el tamaño del pixel, que correlaciona el número de pixeles en la imagen con un número de milímetros en el espacio real. Este valor es obtenido en la calibración previa.
- (*Color Plane Extraction*) Este comando se utiliza para la separación de capas de color RGB. En nuestro caso, todo el análisis posterior se realizó en la capa verde. Esto es necesario ya que para procesos posteriores como la edición de brillo y contraste de la imagen se facilita trabajar en una sola capa. En nuestro caso la capa de color verde reveló mayor cantidad de detalles en los bordes geométricos.
- (*Brightness*) Este comando se utilizó para la corrección de brillo de la imagen donde buscamos eliminar sombras y definir con mayor detalle la geometría de la probeta, como se muestra en la figura 4.14. La corrección de brillo es un paso previo que facilita y mejora las mediciones a realizar en el software.

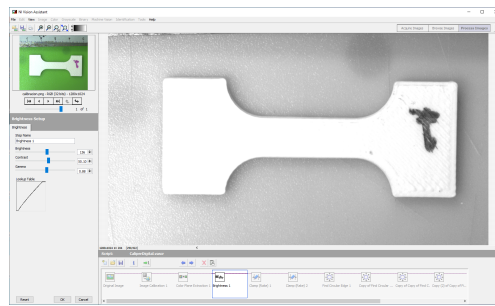
4. RESULTADOS

Figura 4.14: *Preparación de la imagen.*



(a) *Selección de calibración*

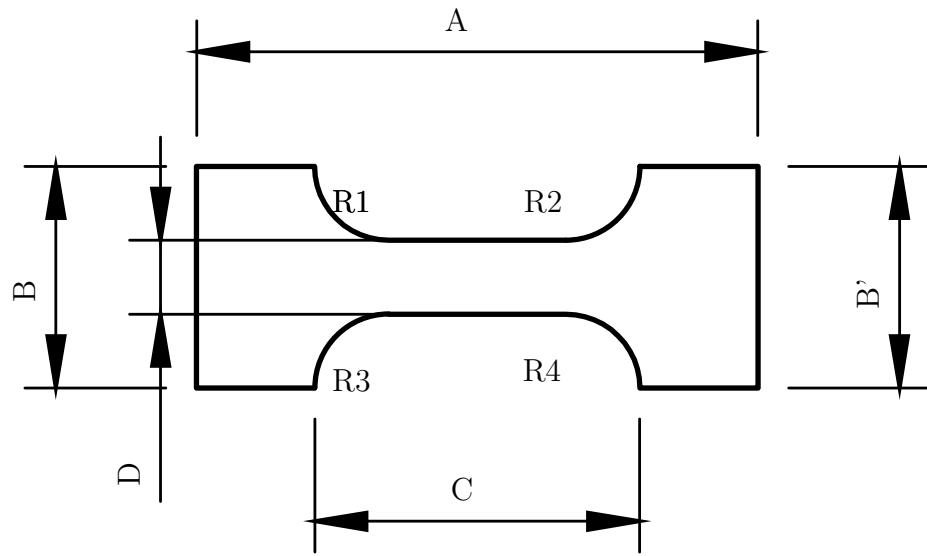
(b) *Corrección de color*



(c) *Corrección de brillo*

Con el software Vision Assistant se utilizaron las herramientas de medición para obtener las medidas A, B, B', C, D, R1, R2, R3, R4 mostradas en la figura 4.15 que corresponden respectivamente al largo de la probeta, el ancho de la cabeza izquierda, el ancho de la cabeza derecha, la sección entallada, el ancho de la zona entallada, el radio superior izquierdo, el radio superior derecho, el radio inferior izquierdo y el radio inferior derecho.

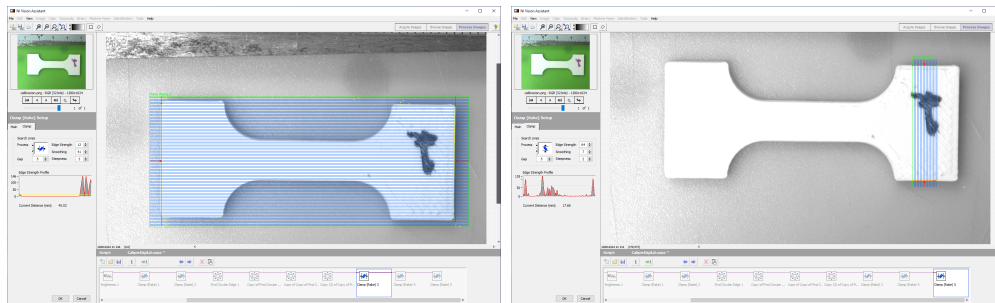
Figura 4.15: *Secciones medidas*



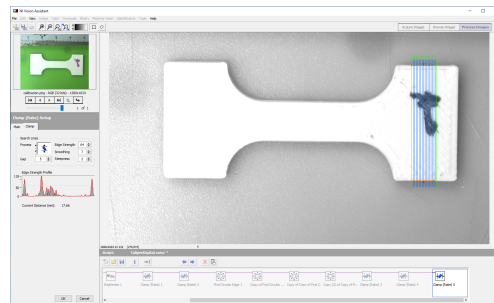
En el arreglo de figuras 4.16 se muestra el proceso de utilización del software y obtención de medidas con el módulo *Clamp Rake* para los anchos y largos y el módulo *Find Circular Edge* para los radios, para finalmente exportar los datos con la opción de *Mesure*. 4.17.

4. RESULTADOS

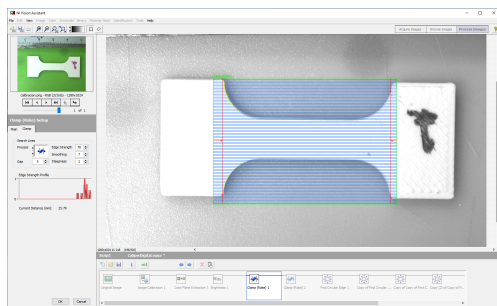
Figura 4.16: Obtención de medidas mediante el uso de Software



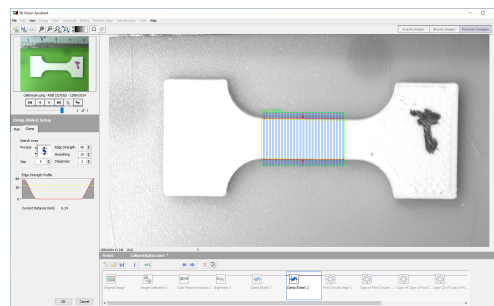
(a) Sección A



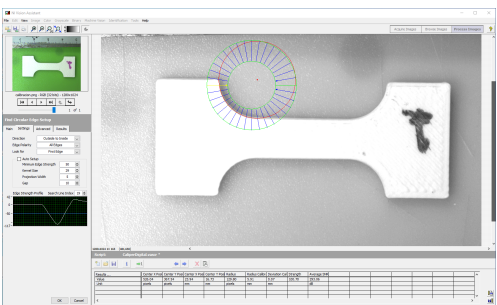
(b) Sección B



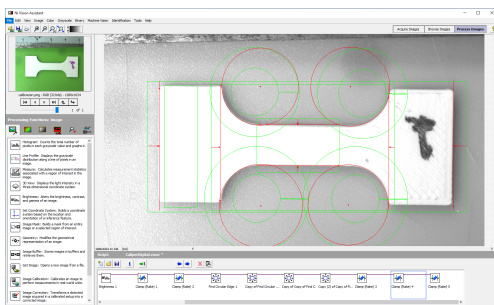
(c) Sección C



(d) Sección D



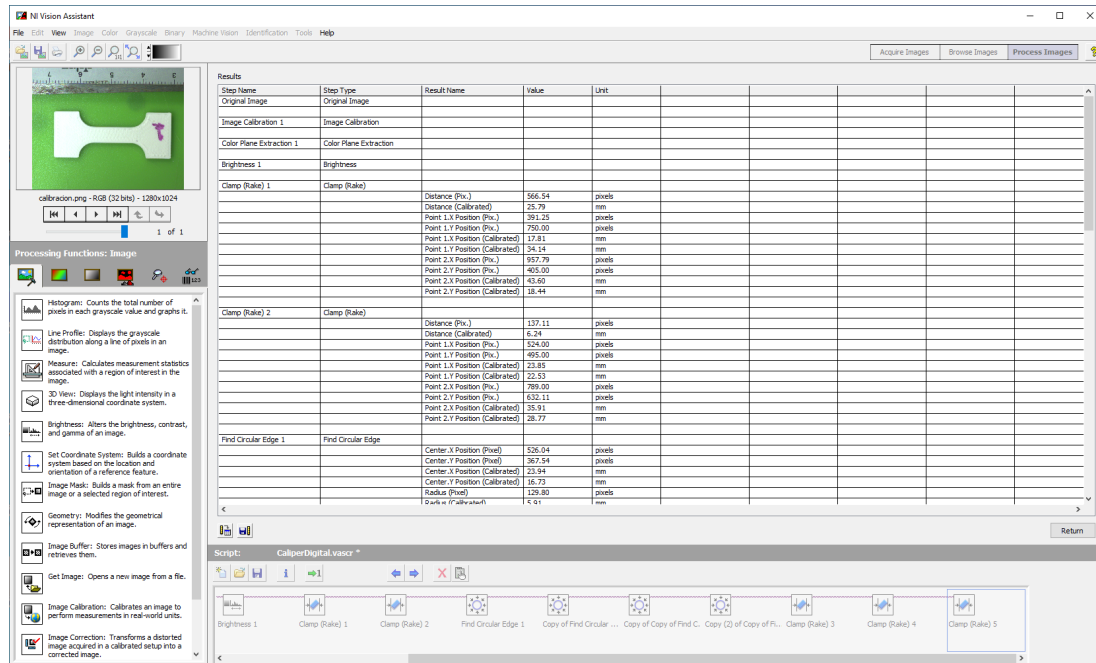
(e) Sección R1



(f) Todas las medidas

4.4 Resultados del segundo experimento: el efecto de la cama de impresión

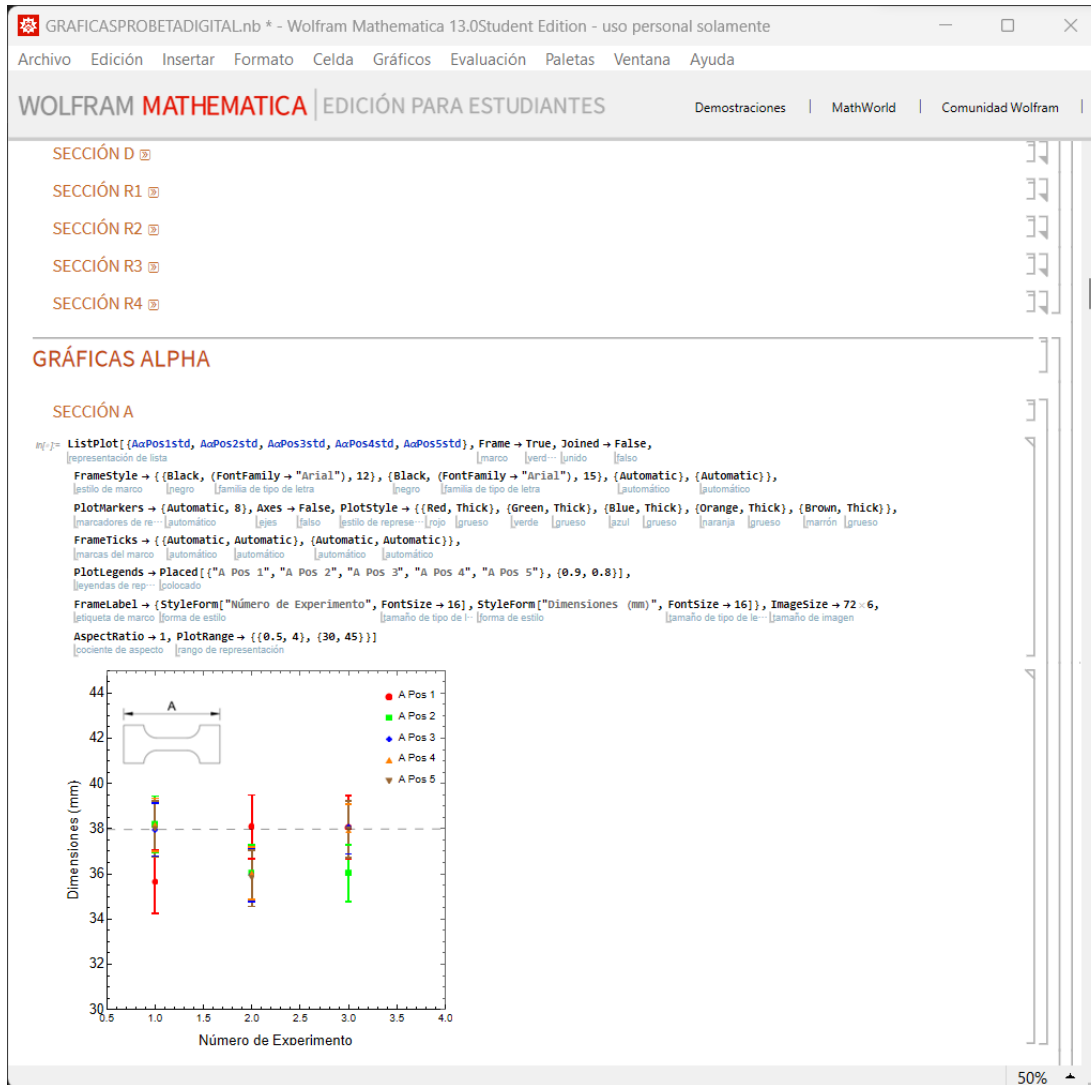
Figura 4.17: Datos obtenidos en medición digital



Tras obtener las mediciones de interés ya en milímetros a través de la cámara y el *software* de *National Instruments*, se procede a graficar estos datos con el *software* *Wolfram Mathematica*. El código fue mostrado en el experimento anterior, como se muestra en la figura 4.18. En este caso cada una de las secciones de interés fueron medidas y su información fue capturada en un archivo *.xlsx. Los datos son importados a *Wolfram Mathematica* y se colocan en un formato de parejas ordenadas. En dicho formato los datos se pueden procesar y/o graficar según se requiera. El análisis requirió un procesamiento previo que involucro la obtención del valor promedio y su respectiva desviación estándar para cada sección de interés de la probeta. Una vez obtenidos estos valores se procedió a obtener las gráficas tal como se muestra en la figura 4.18. Cabe mencionar que este procesamiento se realiza para cada una de las posiciones de impresión y sus respectivas repeticiones.

4. RESULTADOS

Figura 4.18: Uso del Software Wolfram Mathematica



Posteriormente se obtuvieron los resultados de las medidas a través del software mostradas en las siguientes figuras. Aquí se muestra el resultado de 3 impresiones en 5 posiciones diferentes, estas posiciones responden al orden mencionado con anterioridad, por lo tanto los datos se componen de 15 datos, además en este

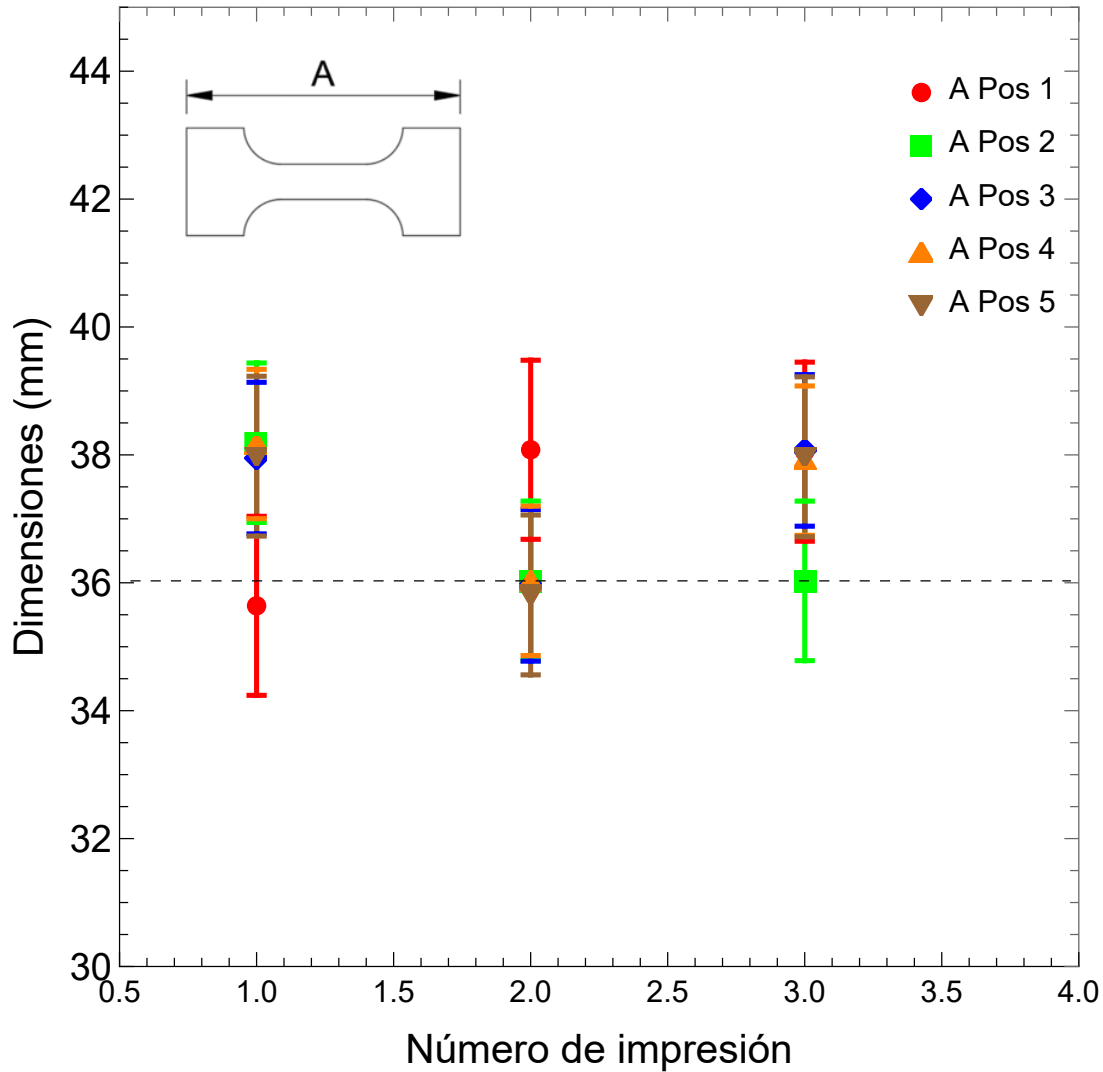
4.4 Resultados del segundo experimento: el efecto de la cama de impresión

experimento se realizó una calibración en la cama de impresión en cada una de ellas.

En la sección A, mostrada en la figura 4.19, se observa una gran diferencia entre el valor promedio y sus respectivas desviaciones estándar respecto al valor esperado (valor teórico de acuerdo a la norma). En estos tres experimentos se observó que la desviación estándar tiene un comportamiento similar, a pesar de tener un comportamiento general constante. Mientras que el valor promedio presenta oscilaciones más perceptibles; como por ejemplo en el caso de la posición 1 de la impresión número 1, su valor promedio es el más bajo con respecto a las otras posiciones (2, 3, 4 y 5) y en la impresión número 2 la posición 1 tiene el valor promedio más alto.

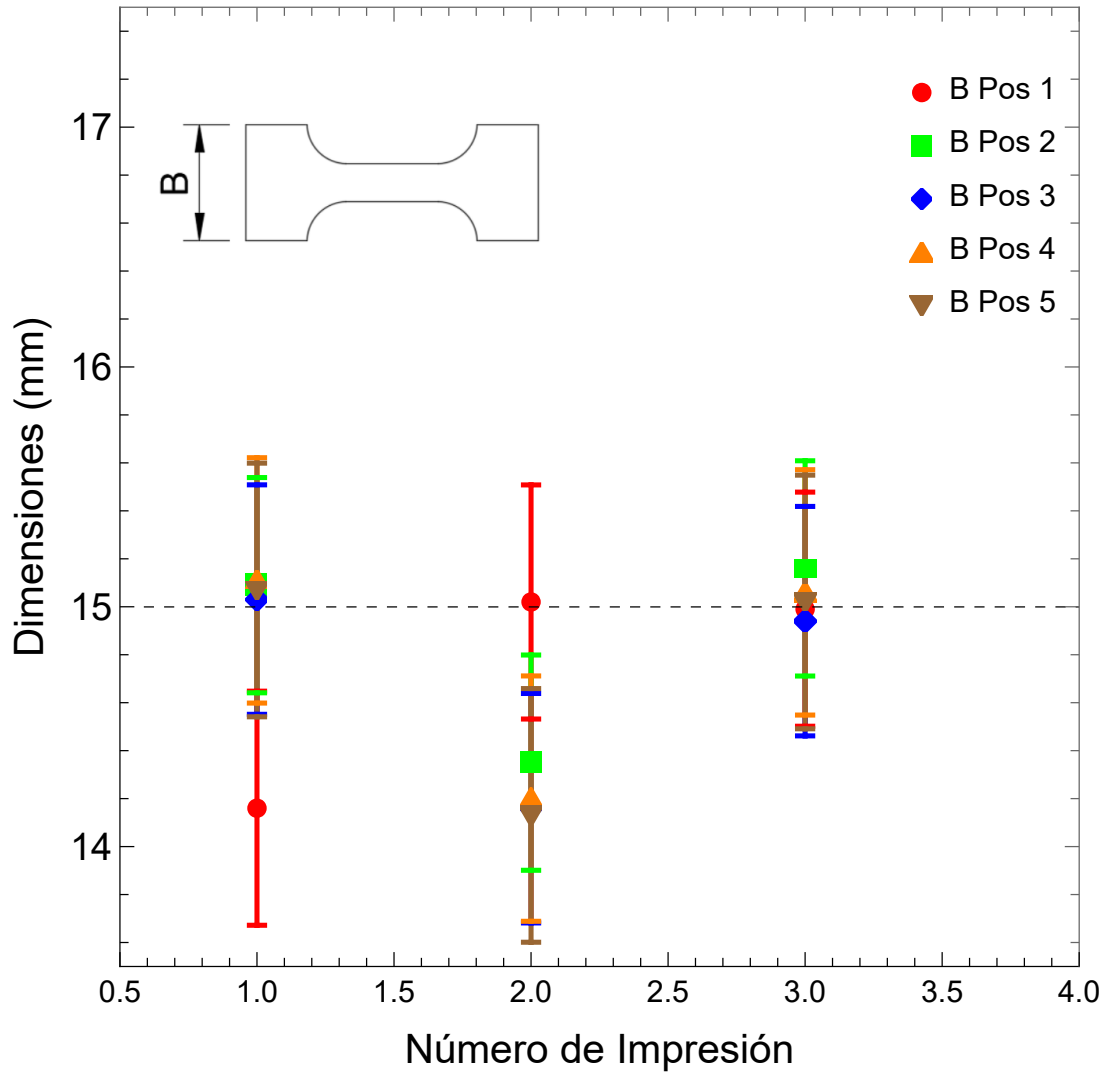
4. RESULTADOS

Figura 4.19: Medidas obtenidas de manera digital sección A



En la figura 4.20, podemos observar la sección B; aquí los valores en las impresiones número 1 y 2 tienden a tener dimensiones con un valor menor al del valor esperado, y en la impresión número 3 se muestra una diferencia menor.

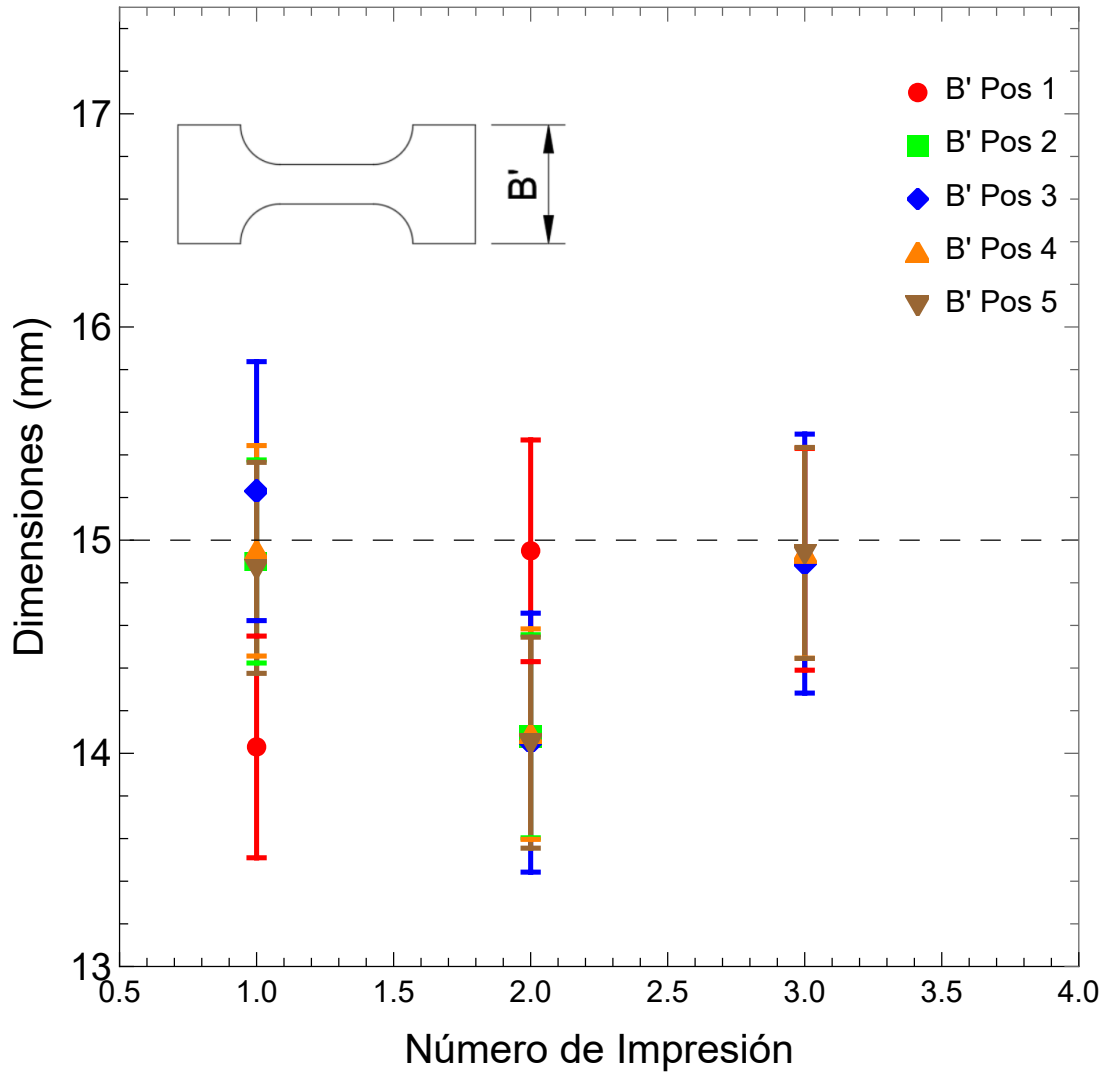
Figura 4.20: Medidas obtenidas de manera digital sección B



Para la sección B', mostrado en la figura 4.21, se observa un comportamiento muy similar a la sección B, en donde las impresiones 1 y 2 tienen una diferencia mayor comparada con el número de impresión 3.

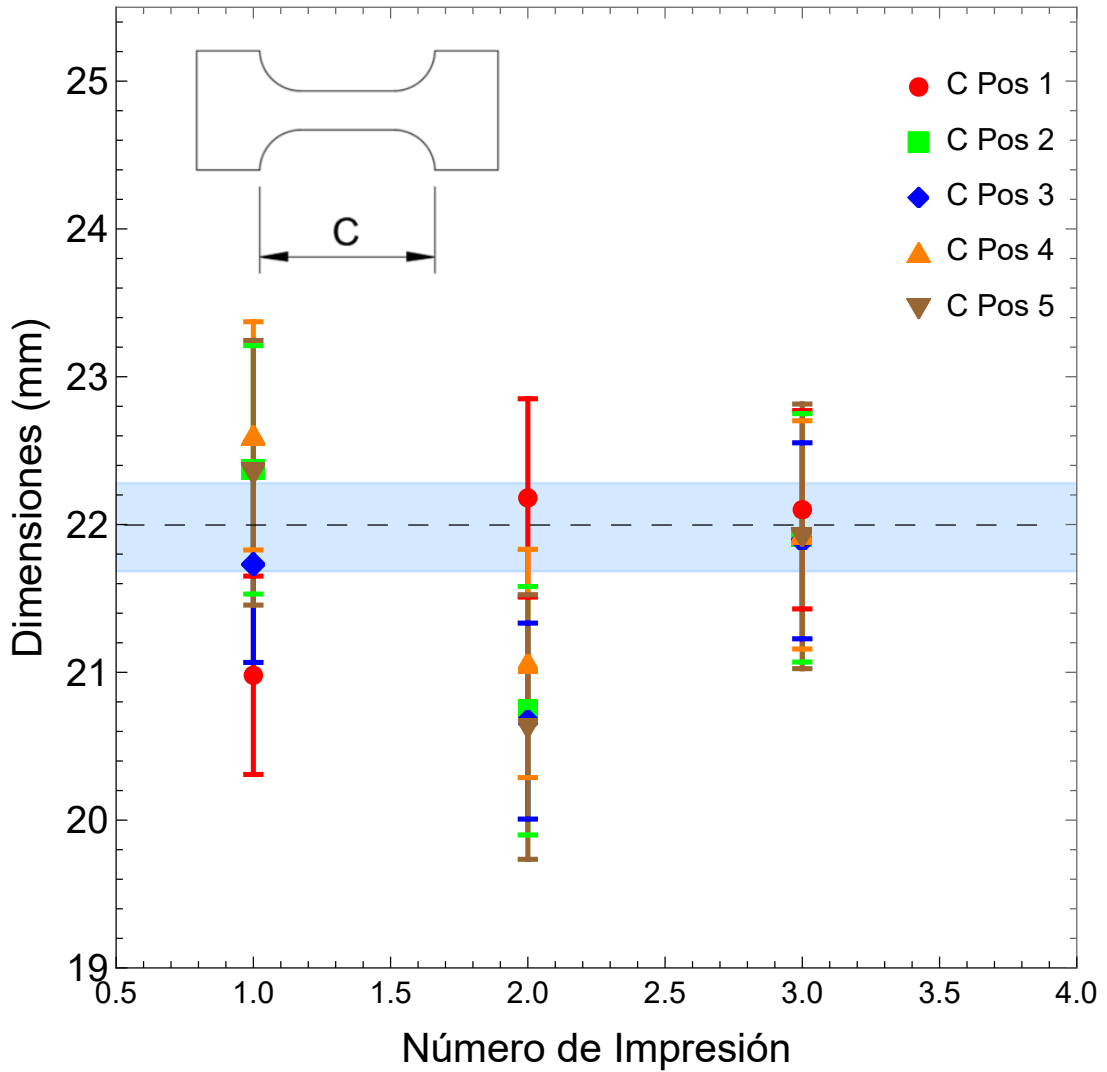
4. RESULTADOS

Figura 4.21: Medidas obtenidas de manera digital sección B'



En la sección C, mostrada en la figura 4.22, observamos que las dimensiones en las impresiones 1 y 2 tienen una gran diferencia con el valor esperado, mientras que en la impresión 3 la desviación estándar es menor.

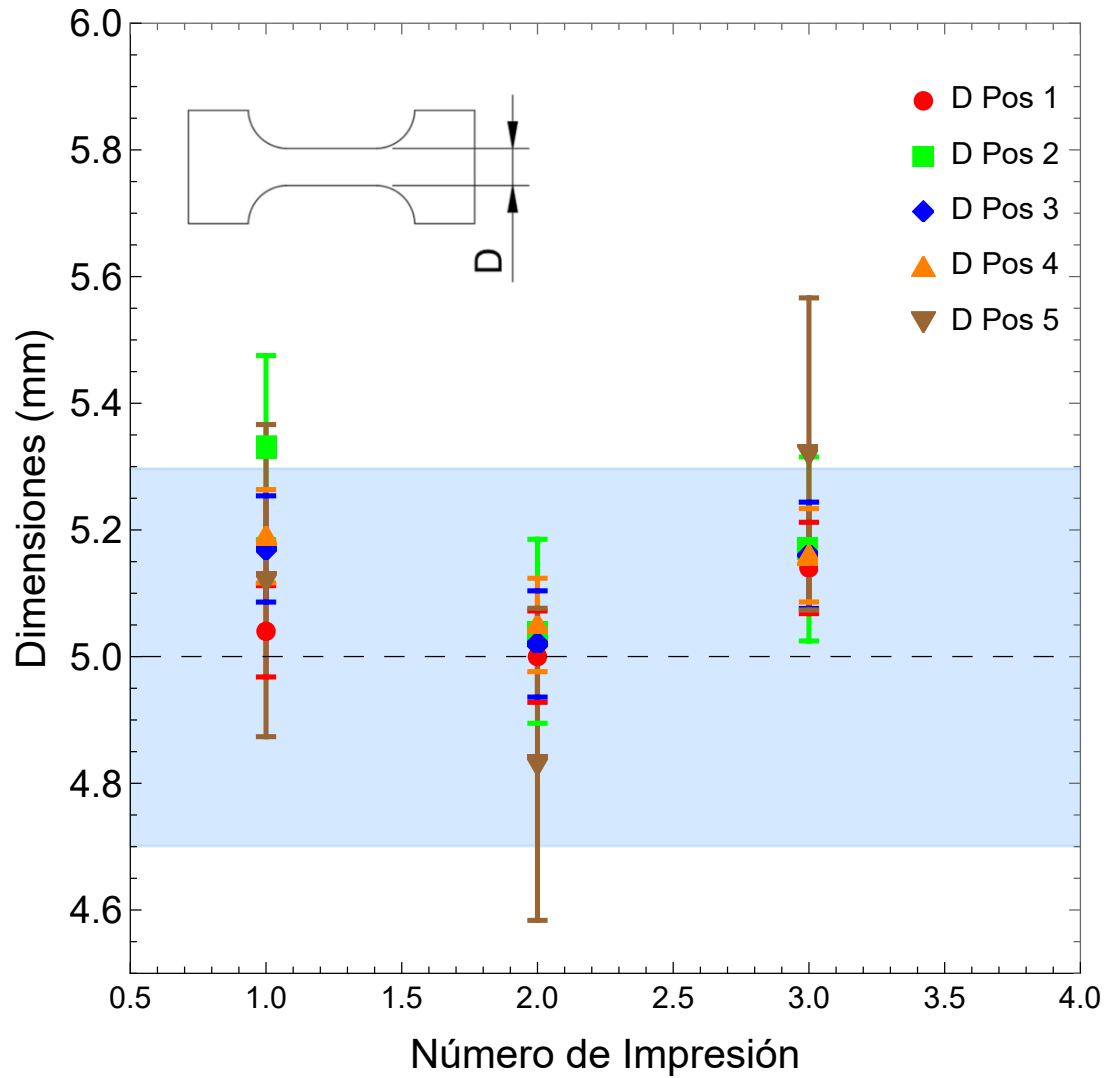
Figura 4.22: Medidas obtenidas de manera digital sección C



Para la sección D, mostrada en la figura 4.23, los datos en la posición 5 de todas las impresiones (1, 2 y 3) están muy alejados del valor esperado; incluso algunos datos salen de la zona de tolerancia.

4. RESULTADOS

Figura 4.23: Medidas obtenidas de manera digital sección D



En el caso de la sección R1 correspondiente al radio 1, mostrado en la figura 4.24, se observa que en la impresión número 1 las posiciones 1 y 3 tuvieron una dimensión anormal, a diferencia de las impresiones restantes (2 y 3) y en los ra-

4.4 Resultados del segundo experimento: el efecto de la cama de impresión

dios 2, 3, y 4, mostrados en las figuras 4.25,4.26,4.27, respectivamente, se observa que la mayoría de los datos están dentro o muy cerca de la zona de tolerancia. Cabe destacar que en la impresión número 3 se realizó la calibración de la cama de impresión de manera diferente a la convencional, ya que para ello se hizo uso de niveles físicos que garantizarán que la base estuviera nivelada en todos los puntos, en promedio esto nos da un arreglo del 0.5% que se traduce a casi 0.15 mm, que tomando en cuenta la tolerancia dimensional de 0.25 mm es un valor que toma relevancia, este proceso aunque es más laborioso vale la pena hacerlo cada cierto número de impresiones.

4. RESULTADOS

Figura 4.24: Medidas obtenidas de manera digital sección R1

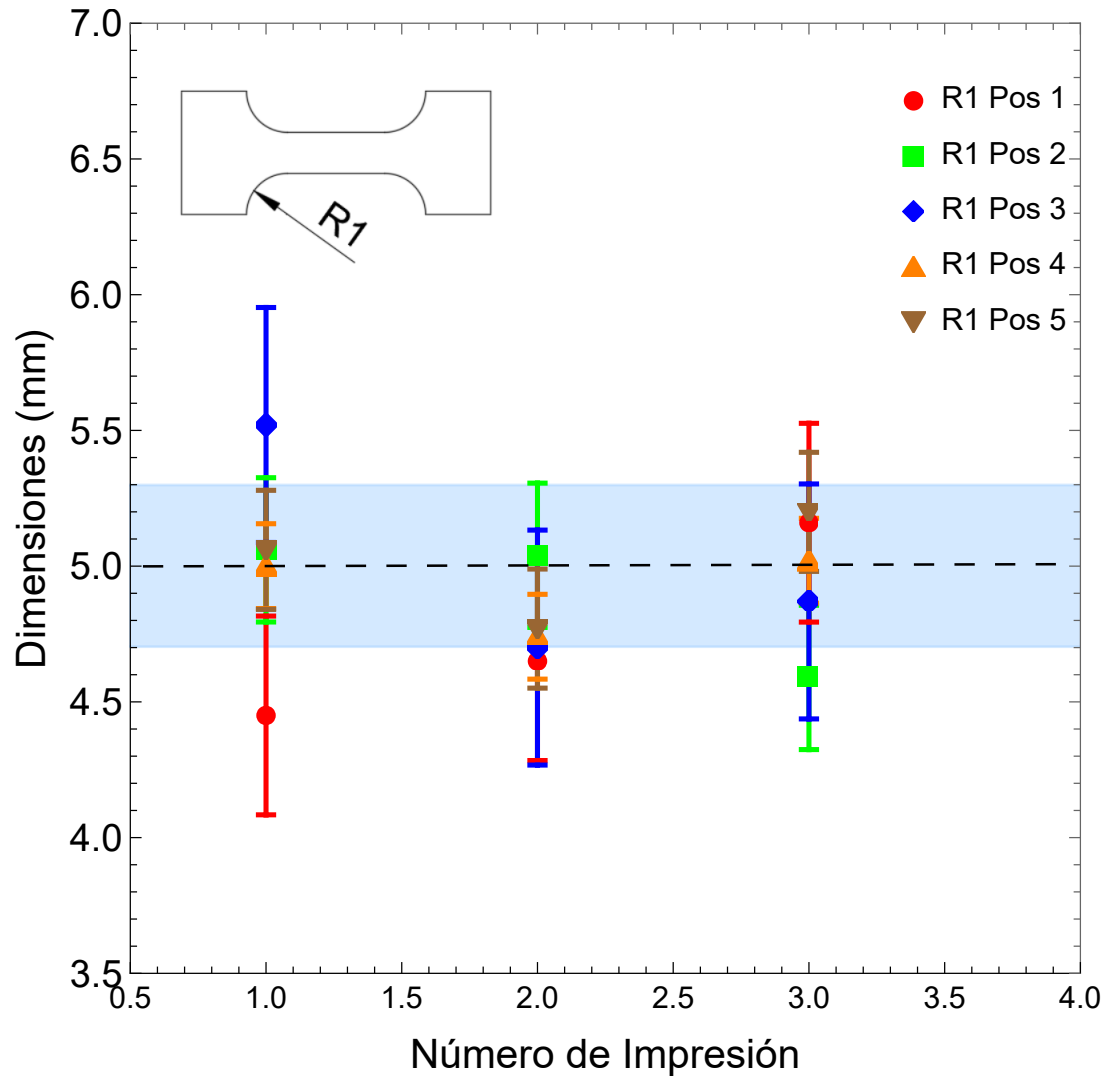
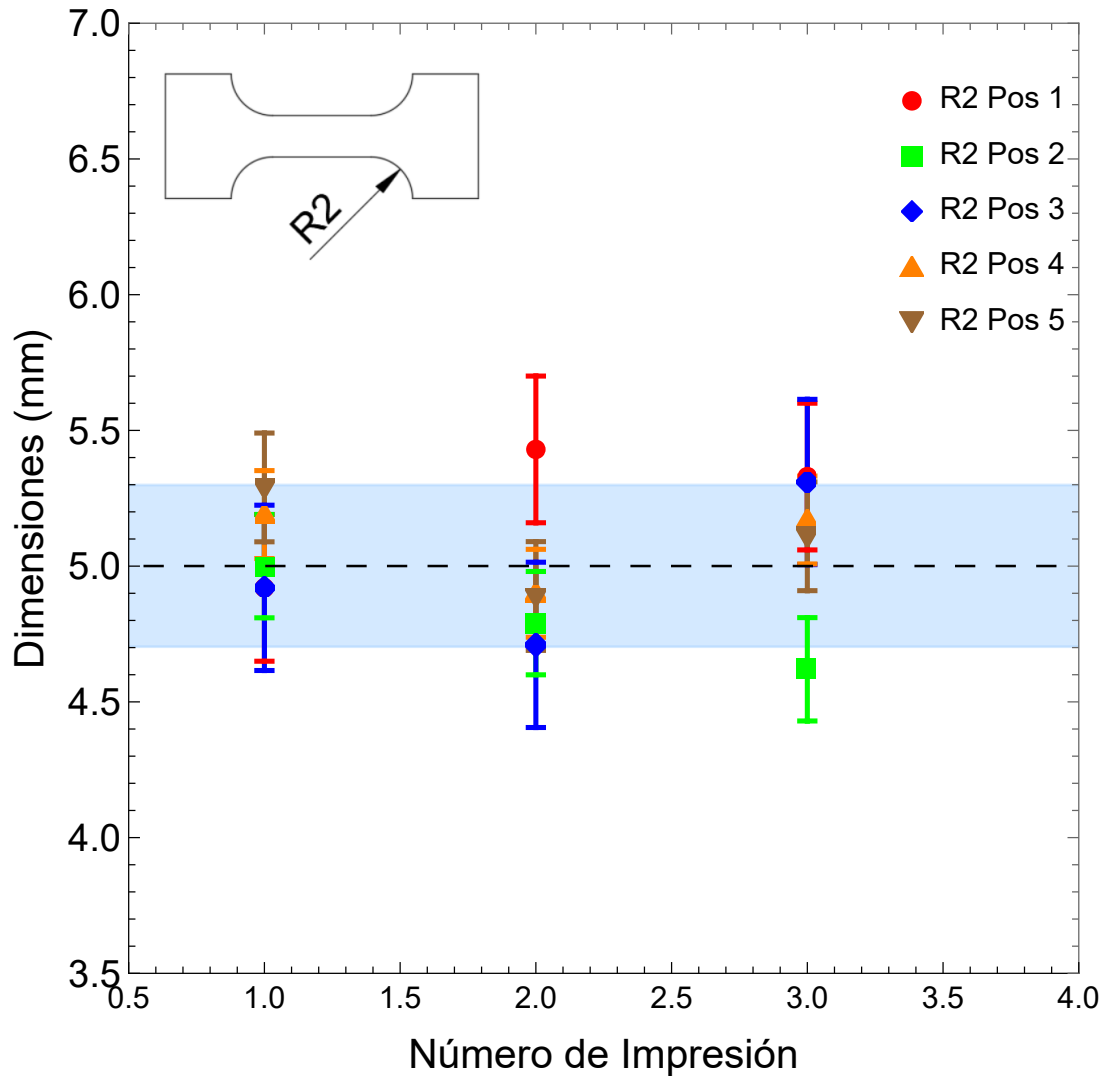


Figura 4.25: Medidas obtenidas de manera digital sección R2



4. RESULTADOS

Figura 4.26: Medidas obtenidas de manera digital sección R3

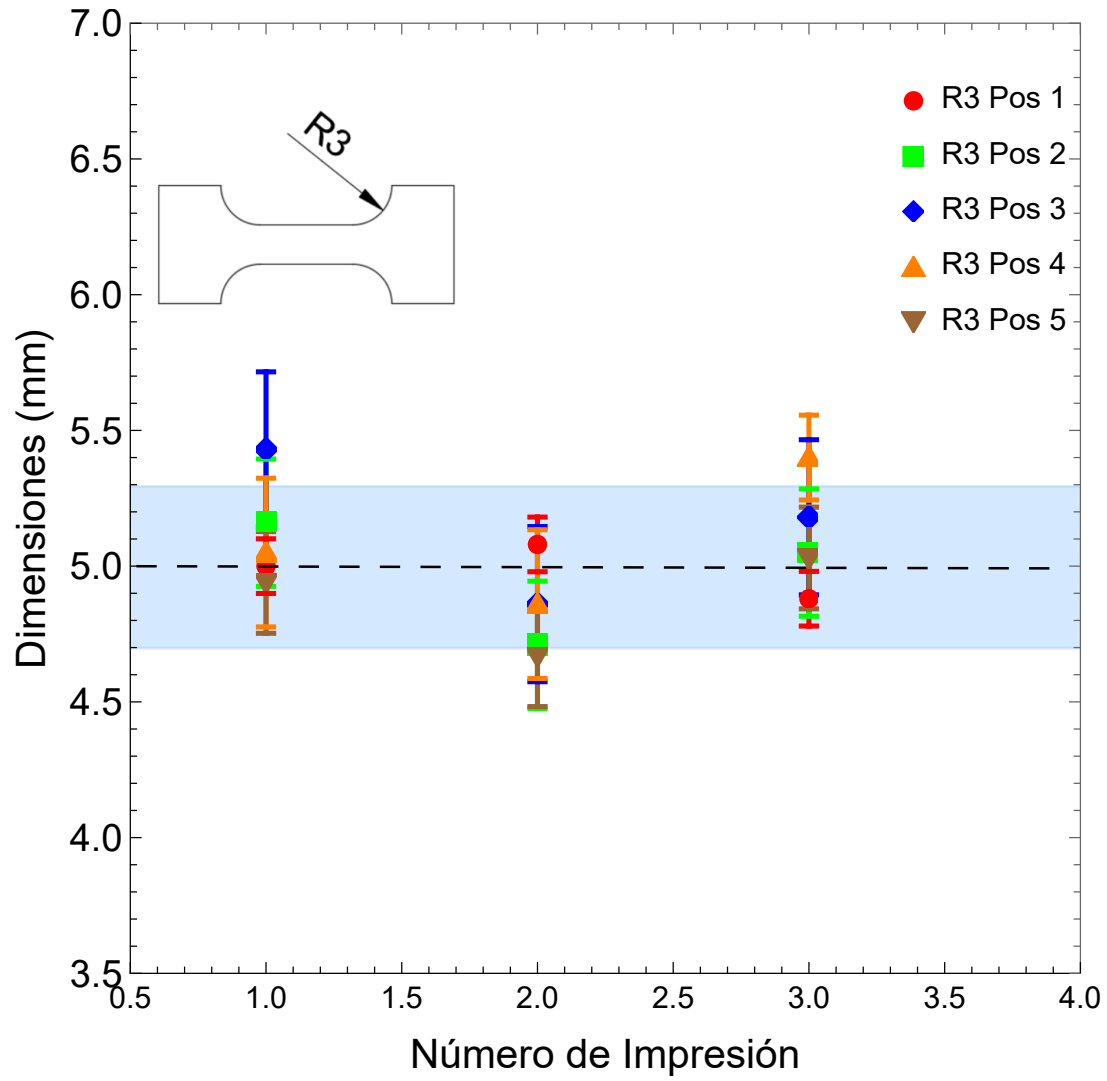
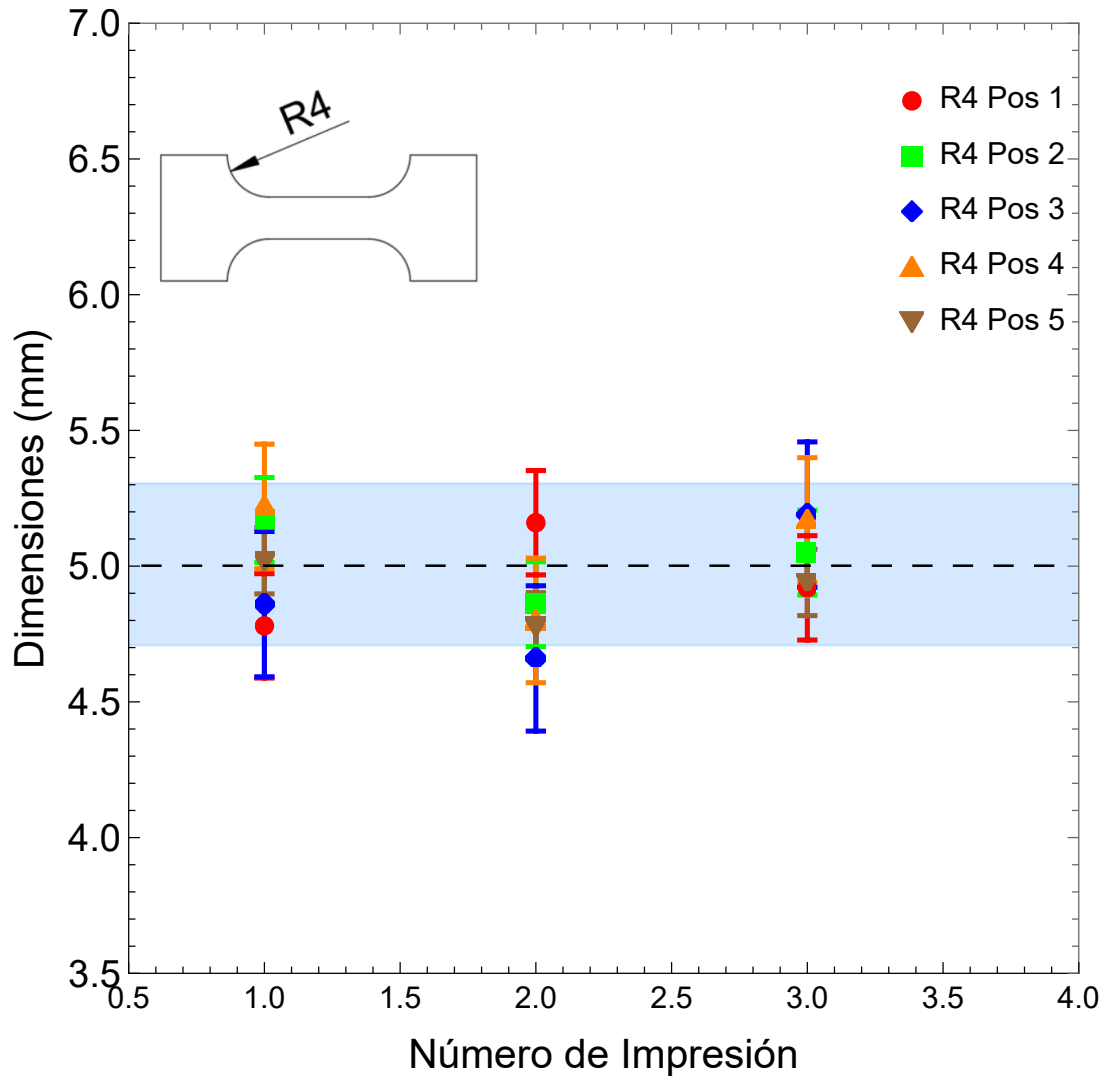


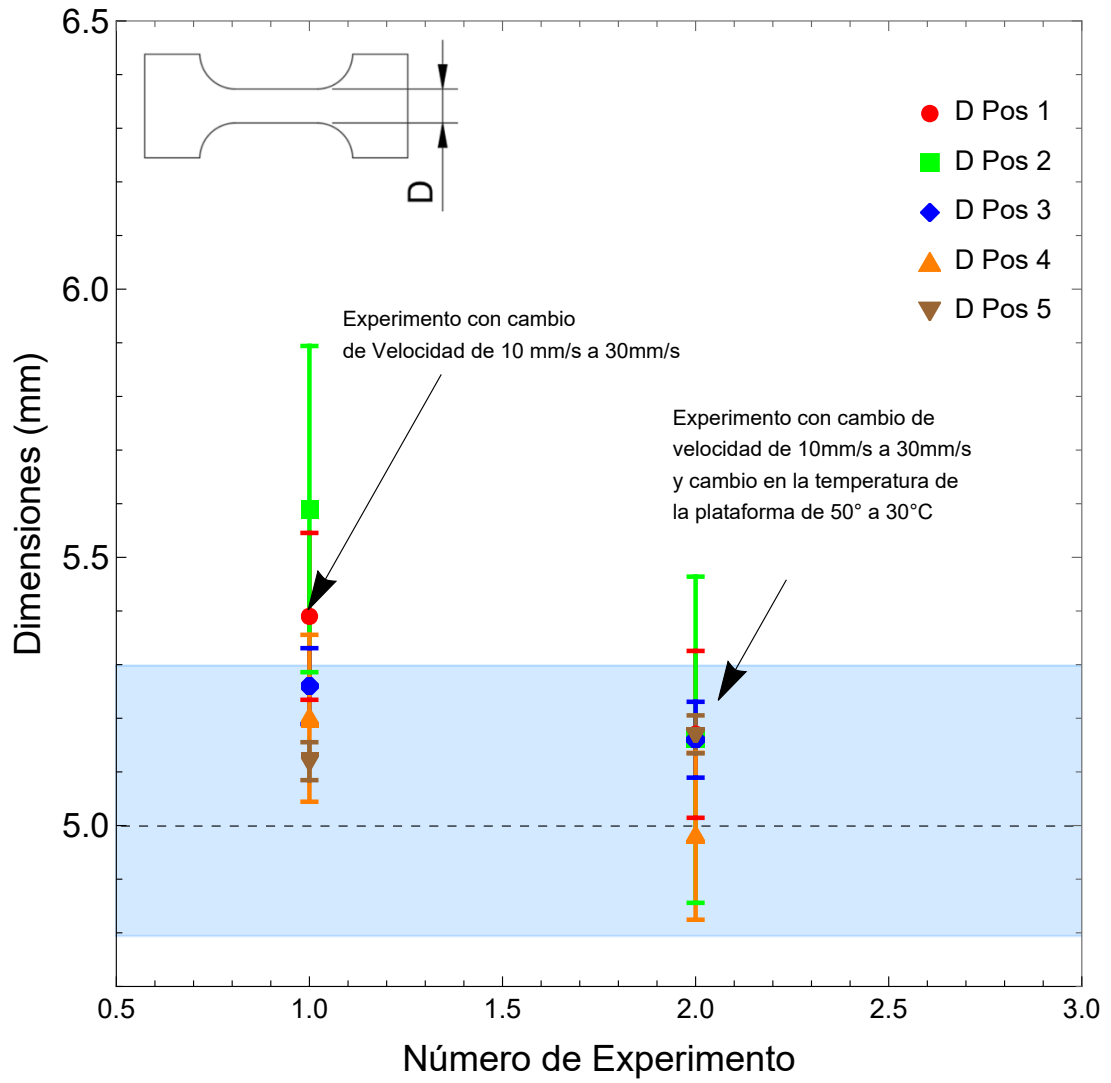
Figura 4.27: Medidas obtenidas de manera digital sección R4



4.5. Resultados del tercer experimento: disminución del efecto pie de elefante

Los primeros cambios de parámetros buscan disminuir el efecto pie de elefante, se muestran en la figura 4.28, aquí se modificó la configuración en el software de Flash Print 5, que genera el código G, para las variables de temperatura y velocidad, tal como se sugiera en la literatura “Cómo diagnosticar y arreglar fallas en la impresión 3D” (Aranda, 2020), donde se muestran diferentes errores en la manufactura aditiva, la variable velocidad y temperatura influyen mucho, en particular en el caso del pie de elefante, así como una calibración con respecto al eje Z. En la figura 4.28 se observa que al cambiar la temperatura de la cama de impresión de 50 ° C a 30 ° C y la velocidad de la primer capa de impresión de 10 mm/s a 30 mm/s los errores dimensionales disminuyeron tal y como se aprecia en la figura 4.28. En dicha figura se aprecia que al cambiar el parámetro de velocidad de 10 a 30 mm/s se disminuyó el error mientras que al cambiar la temperatura de la cama de impresión y la velocidad, todos los valores promedio entraron en la zona de tolerancia.

Figura 4.28: Primer cambio de parámetros de impresión



4.6. Resultados del cuarto experimento: aumento de la velocidad en la primer capa de impresión

En el experimento anterior pudimos darnos cuenta que al hacer cambios en los parámetros de la velocidad de la primer capa de impresión y en la temperatura de la cama de impresión se puede disminuir la diferencia entre la dimensión esperada y la real, sin embargo, al intentar replicar el experimento pasado, se notó, que las probetas no siempre se adherían correctamente a la cama de impresión, esto debido a la baja temperatura de 30 ° C, y se encontró que la temperatura más baja a la que el PLA aún tenía adherencia fueron 45 ° C, por lo que se decidió dejar esa temperatura constante y variar las velocidades de la primer capa impresión.

Para las velocidades de impresión propuestas se tomaron valores cercanos al valor recomendado por el fabricante, que es de 10 mm/s, es por eso, que hicieron los experimentos con 15 mm/s, 20 mm/s y 30 mm/s. En general se obtuvo una mejor respuesta con la configuración de 30 mm/s y 45 ° C, para este experimento se utilizó la impresora Creator Pro de FLash Forge y el material PLA.

4.7. Resultados del quinto experimento: tipo de impresora respecto a la configuración de la cama de impresión

Como quinto experimento se realizó un cambio de impresora. Ahora en este quinto experimento se utiliza la impresora ZMorph Fab. Los parámetros de partida fueron los parámetros que mejores resultados presentaron para la impresora Creator Pro, estos valores son: 30 mm/s y 45 ° C, esto para determinar si los parámetros son generales y se pueden extrapolar a otra impresora o son característicos de cada impresora. Hay que destacar que se utilizó el mismo material

4.7 Resultados del quinto experimento: tipo de impresora respecto a la configuración de la cama de impresión

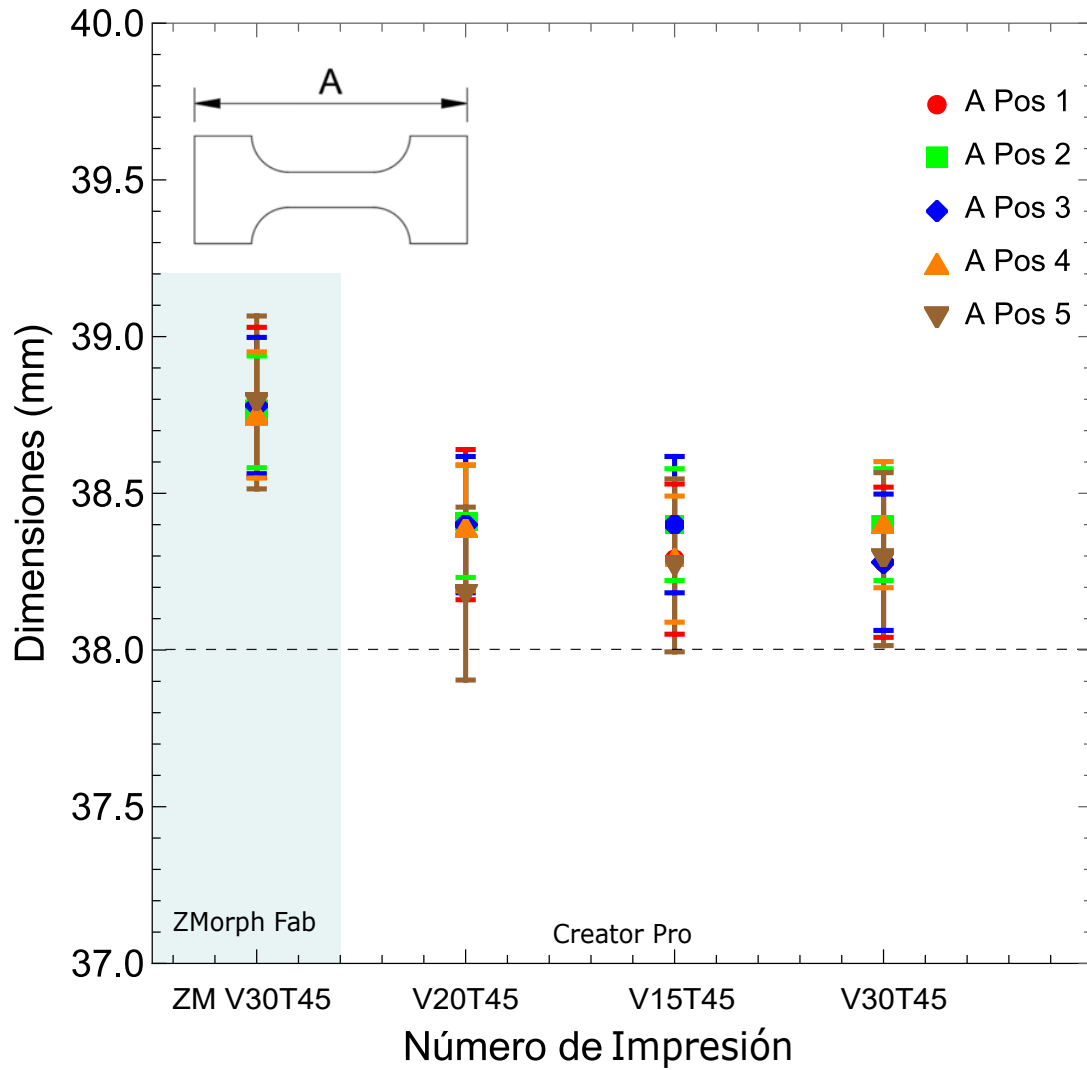
y las mismas configuraciones.

A continuación, se presentan las gráficas correspondientes al cuarto y quinto experimento para comparar el comportamiento de los cambios de velocidad inicial en la impresora Creator pro y el comportamiento de la ZMorph Fab con los parámetros mencionados.

En la sección A, mostrada en la figura [4.29](#), se observa que la impresora ZMorph Fab tiene una mayor precisión, esto lo notamos por lo pequeña que es su desviación estándar y lo cercanos que están los resultados entre si, sin embargo los datos se alejan considerablemente del valor esperado. En cuanto a los resultados obtenidos con la impresora Creator Pro se observa que la mejor configuración es la de 30 mm/s de velocidad y 45° C.

4. RESULTADOS

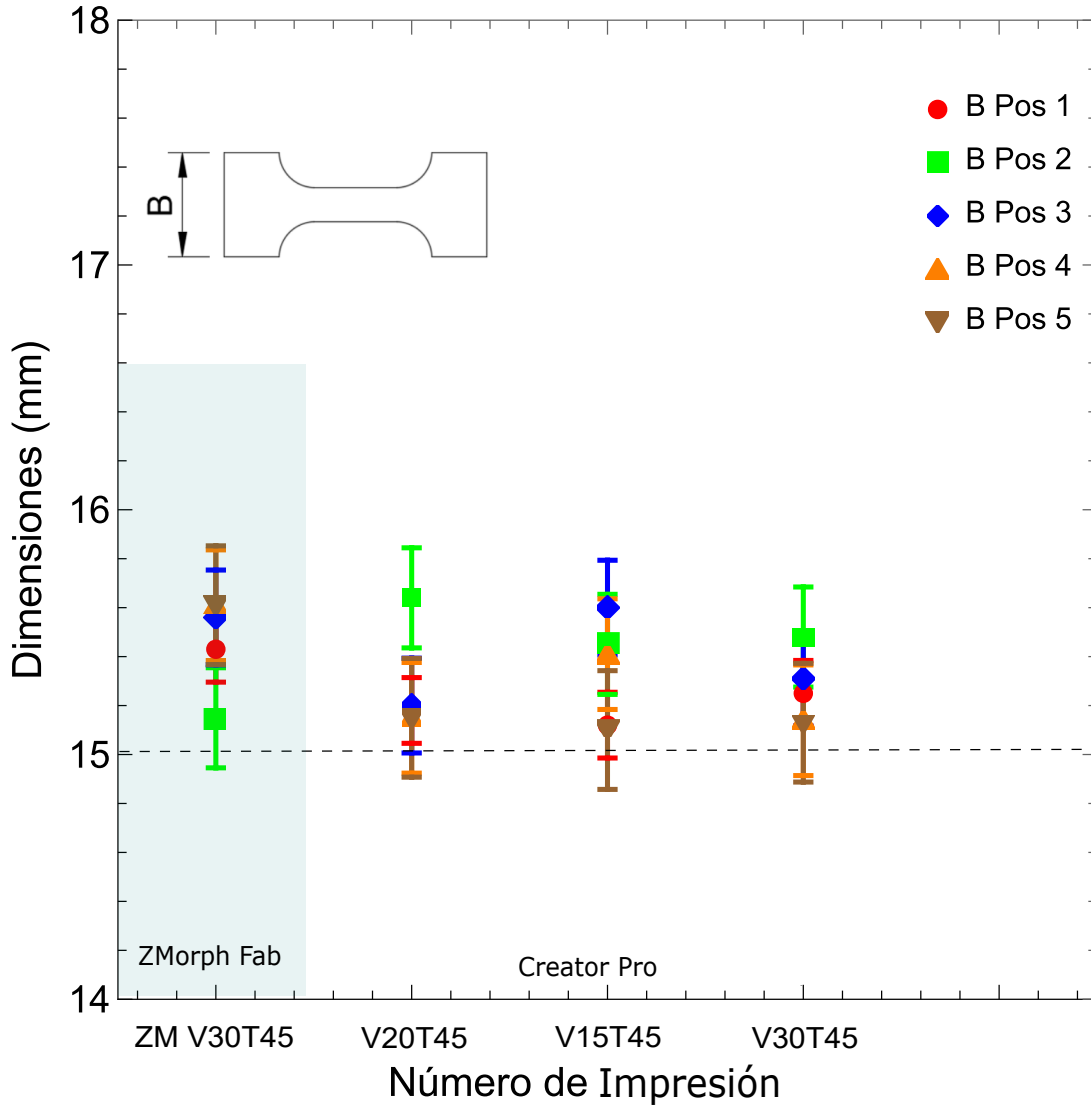
Figura 4.29: Resultados de cambios de parámetros e impresora sección A



Ocurre algo similar en la sección B como se observa en la figura 4.31, donde el comportamiento de los datos mejora con el aumento en la velocidad inicial y los valores de la impresora ZMorph Fab se alejan del valor esperado .

4.7 Resultados del quinto experimento: tipo de impresora respecto a la configuración de la cama de impresión

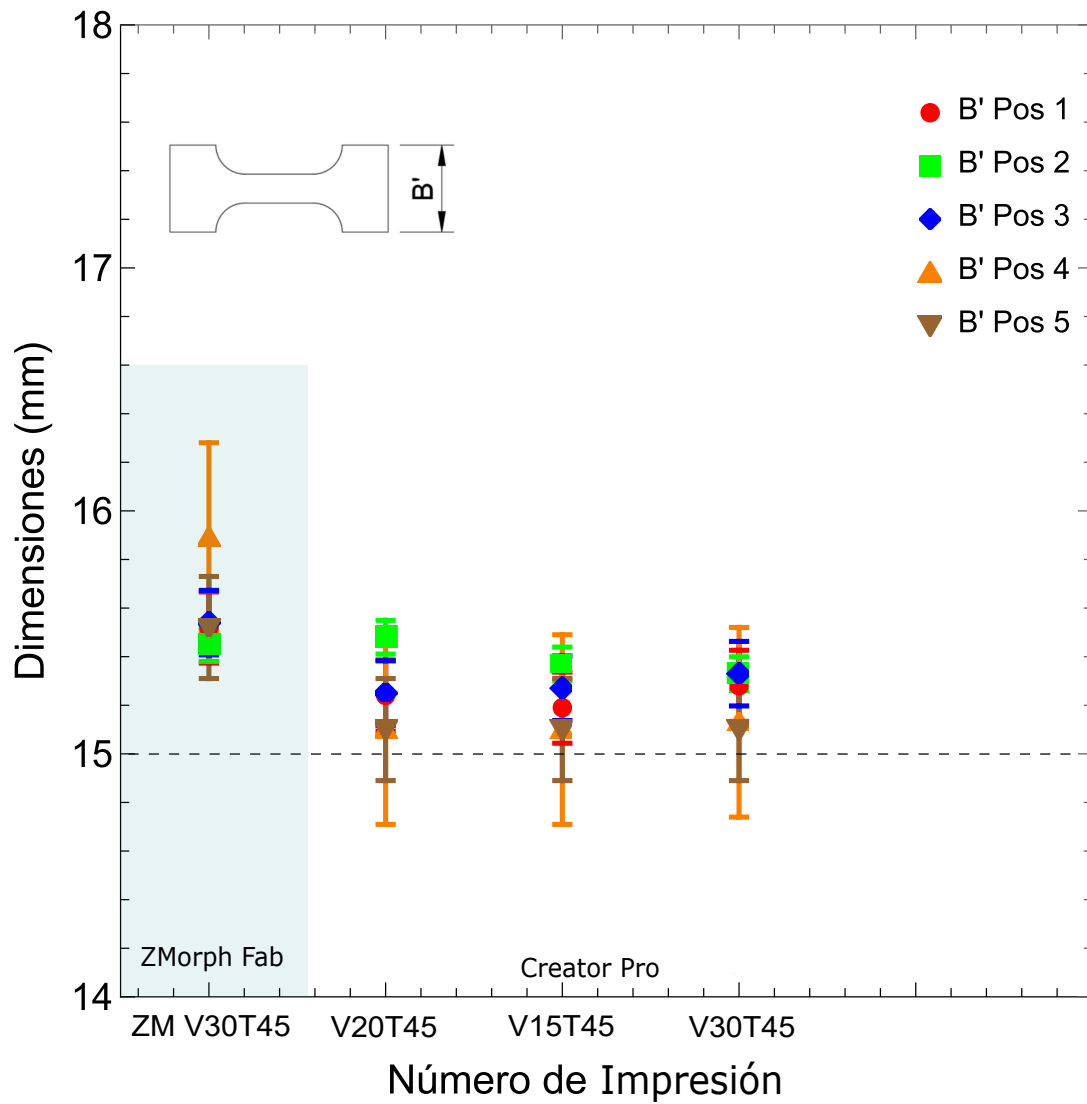
Figura 4.30: Resultados de cambios de parámetros e impresora sección B



Pero esta vez en la sección B', mostrada en la figura 4.31, observamos que con todas las configuraciones tiene un comportamiento muy parecido, salvo en la ZMorph Lab que esta más alejado.

4. RESULTADOS

Figura 4.31: Resultados de cambios de parámetros e impresora sección B'

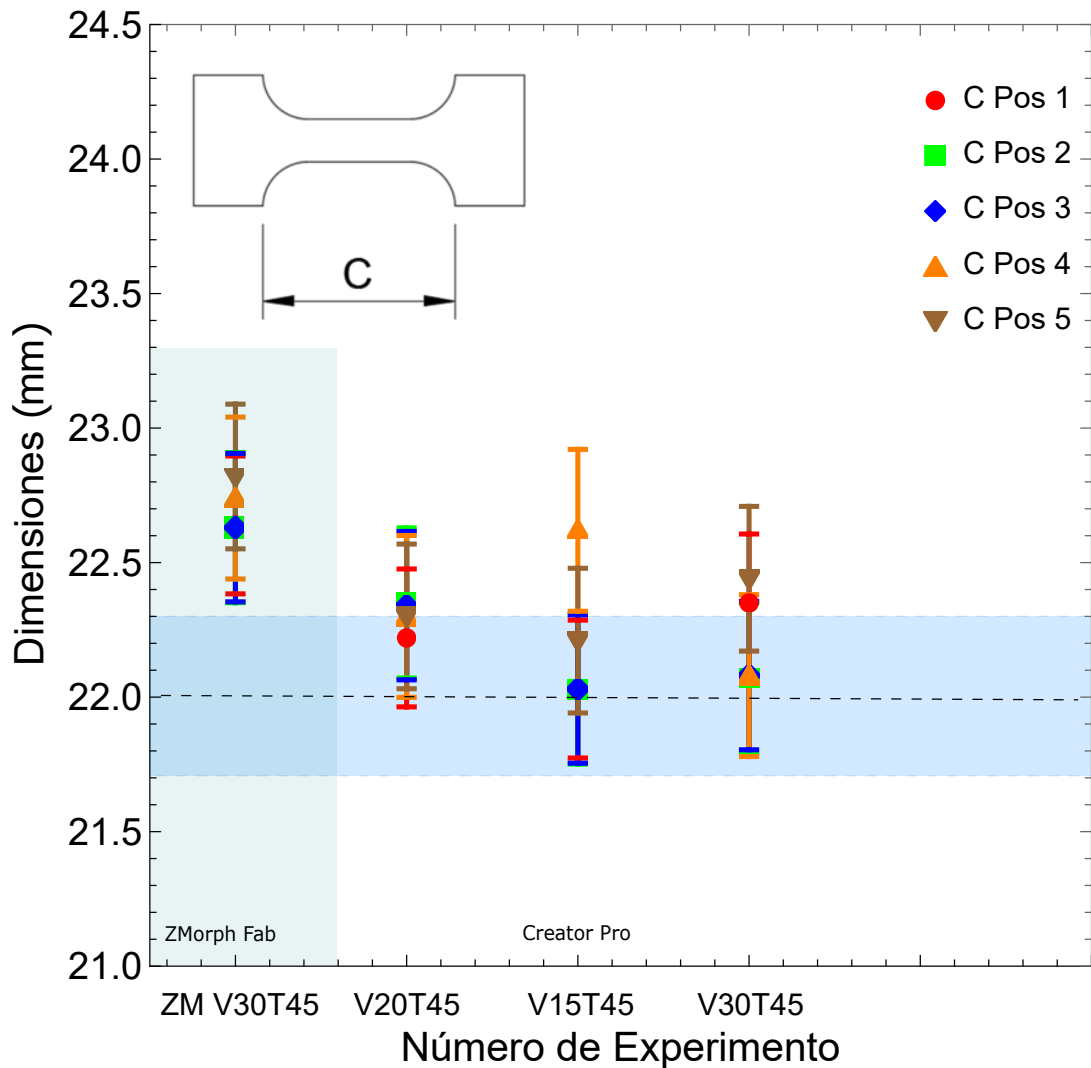


Para la sección C, mostrada en la figura 4.32, nuevamente se aprecia la pre-

4.7 Resultados del quinto experimento: tipo de impresora respecto a la configuración de la cama de impresión

cisión de la ZMorphLab y que con una configuración de 20 mm/s y 30 mm/s se obtuvieron mejores resultados, destacando que no todos los datos están dentro de la zona de tolerancia con ninguna impresión.

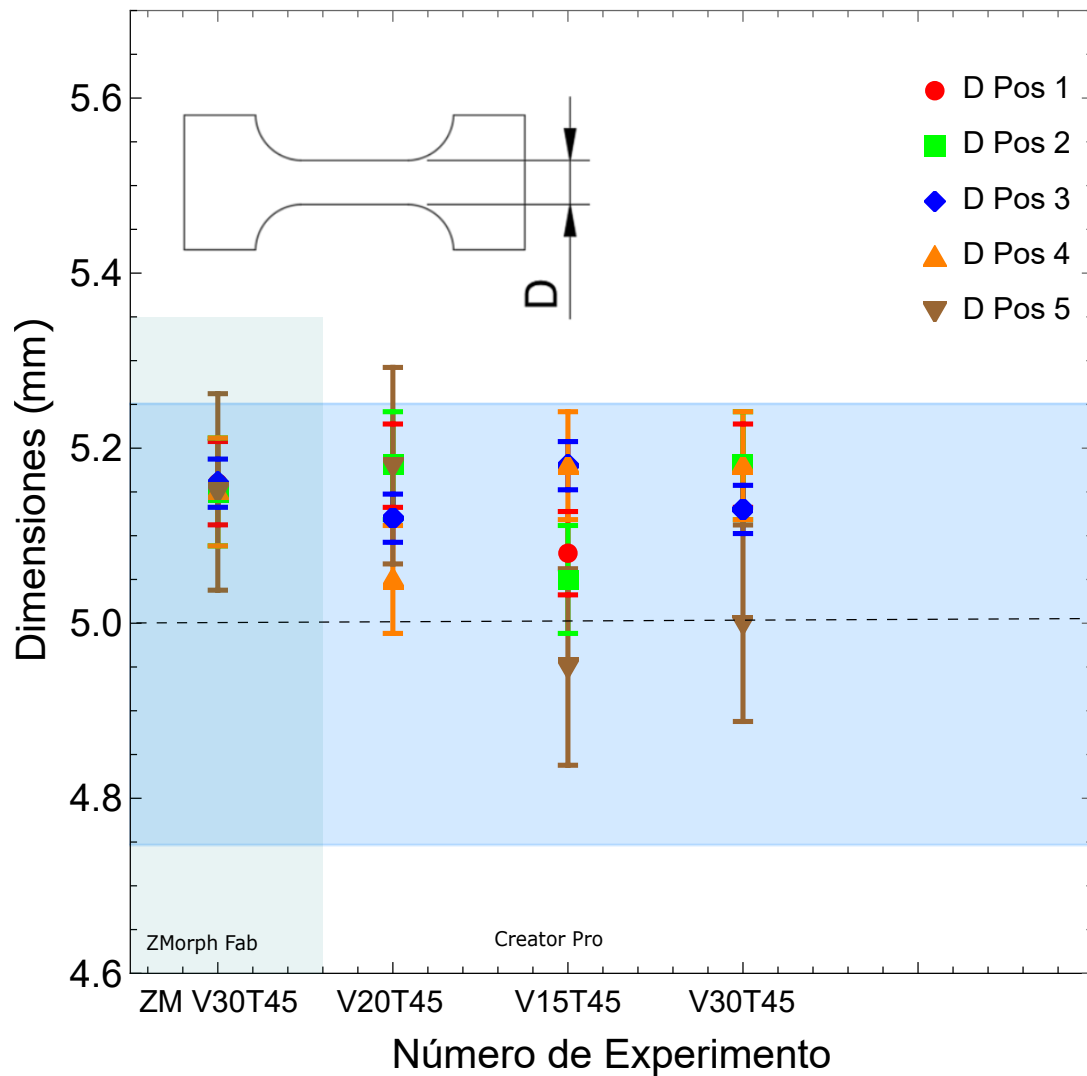
Figura 4.32: Resultados de cambios de parámetros e impresora sección C



4. RESULTADOS

En la sección D, mostrada en la figura 4.33, se aprecia como en los cambios de configuración específicamente con 30 mm/s de velocidad inicial se logra una serie de mediciones dentro del rango de tolerancia.

Figura 4.33: Resultados de cambios de parámetros e impresora sección D



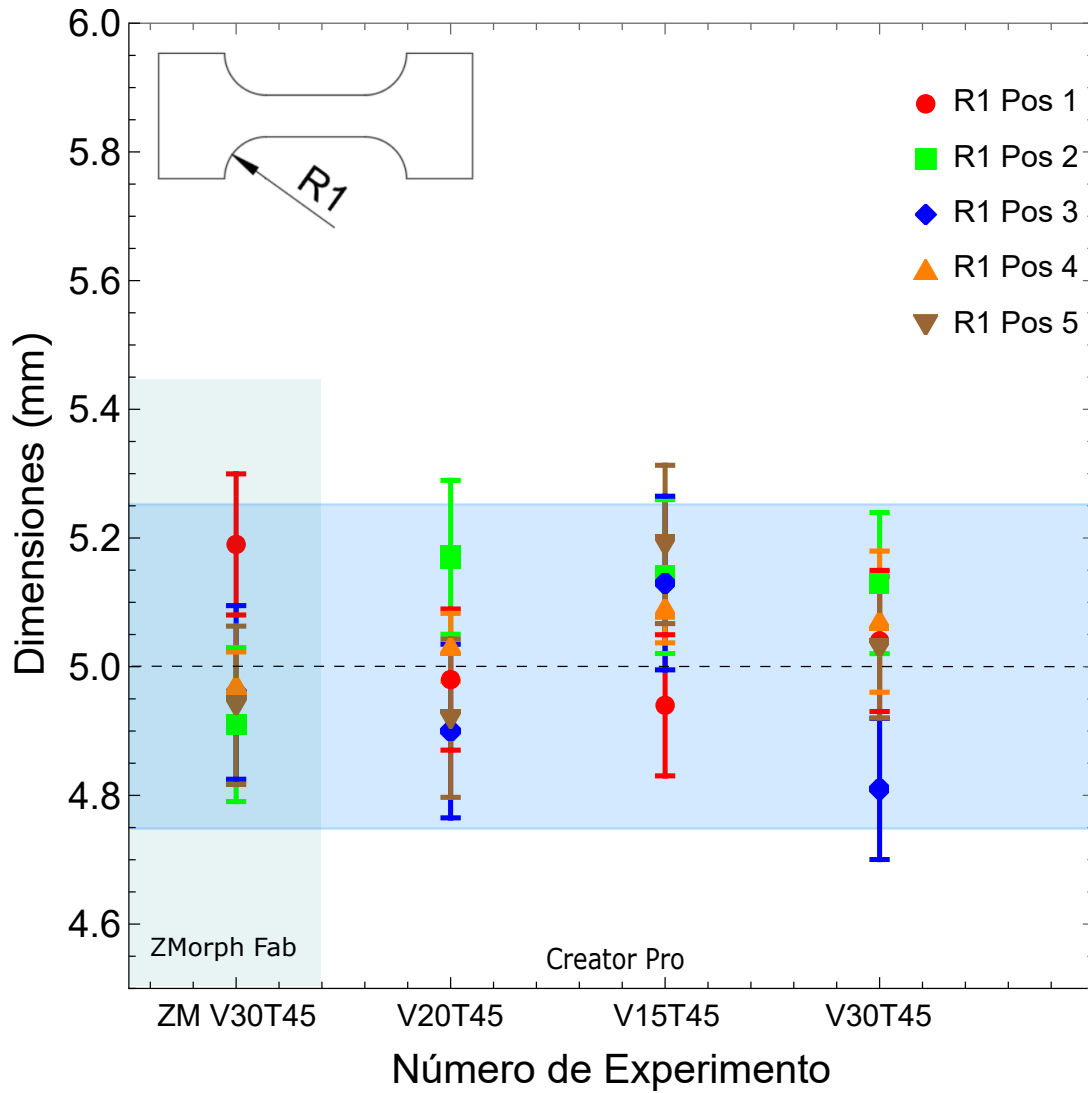
4.7 Resultados del quinto experimento: tipo de impresora respecto a la configuración de la cama de impresión

Los resultados de los radios R1, R2, R3 y R4, se muestran en las figuras [4.34](#), [4.35](#), [4.36](#) y [4.37](#) respectivamente, en estas las observaciones se repiten, la Creator pro con configuración de 30 mm/s es la que mejores resultados muestra y la ZMorph Fab la que tiene los datos más alejados con esta configuración.

Podemos concluir con este experimento que los parámetros óptimos para una impresora no se pueden extrapolar a otras impresoras y cada una de ellas debe seguir a la metodología sugerida para conseguir una disminución en el error dimensional.

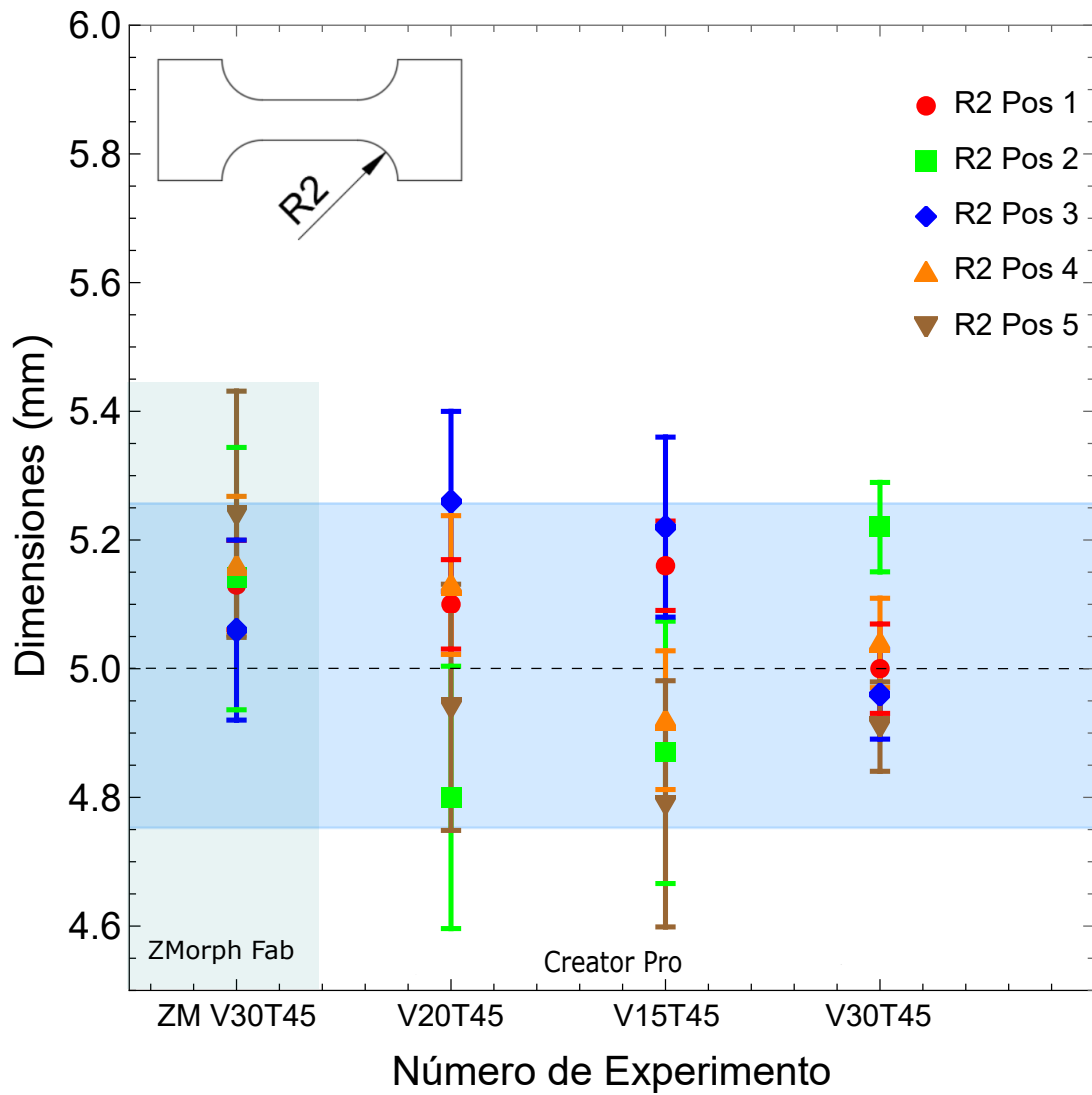
4. RESULTADOS

Figura 4.34: Resultados de cambios de parámetros e impresora sección R1



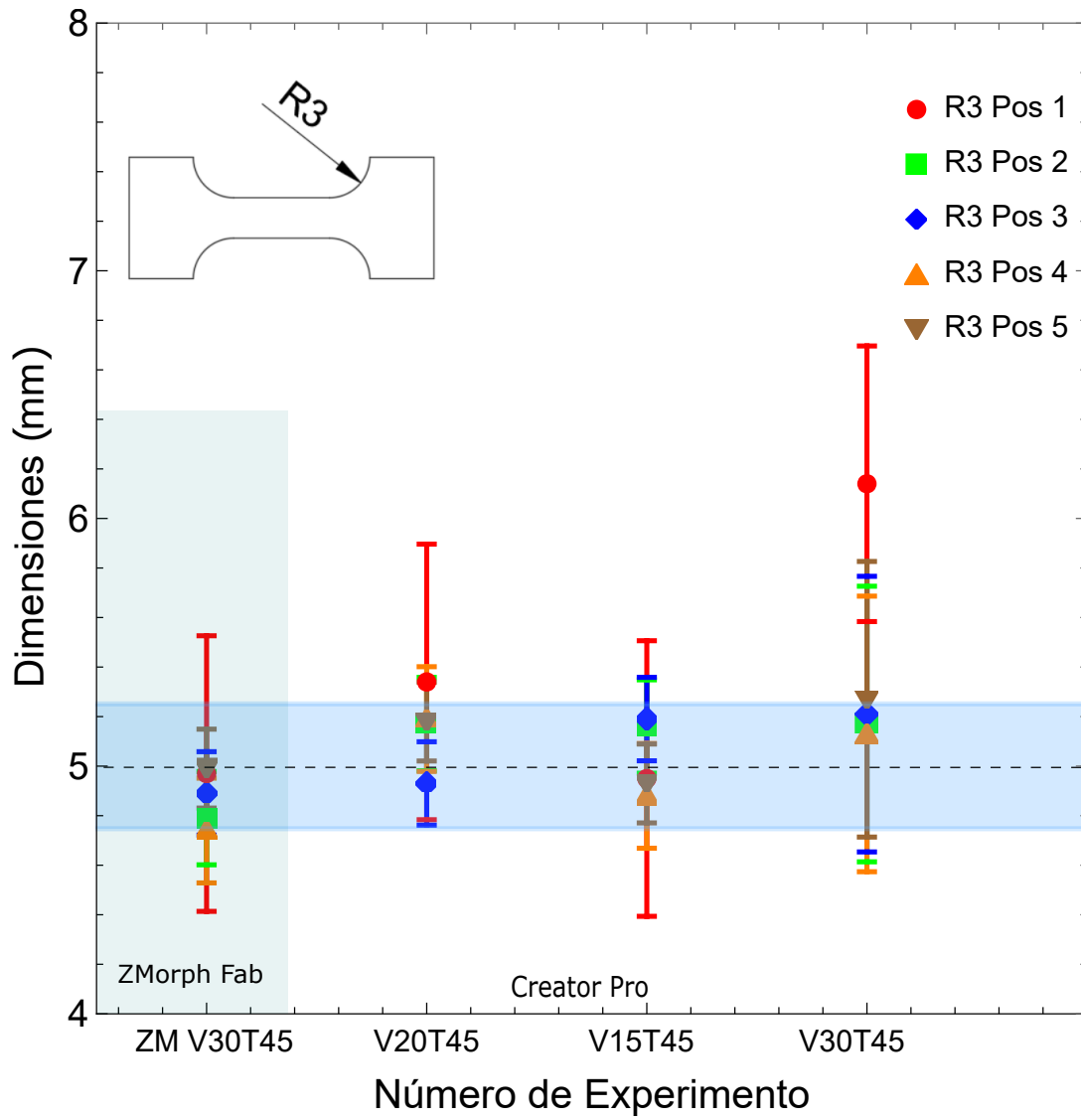
4.7 Resultados del quinto experimento: tipo de impresora respecto a la configuración de la cama de impresión

Figura 4.35: Resultados de cambios de parámetros e impresora sección R2



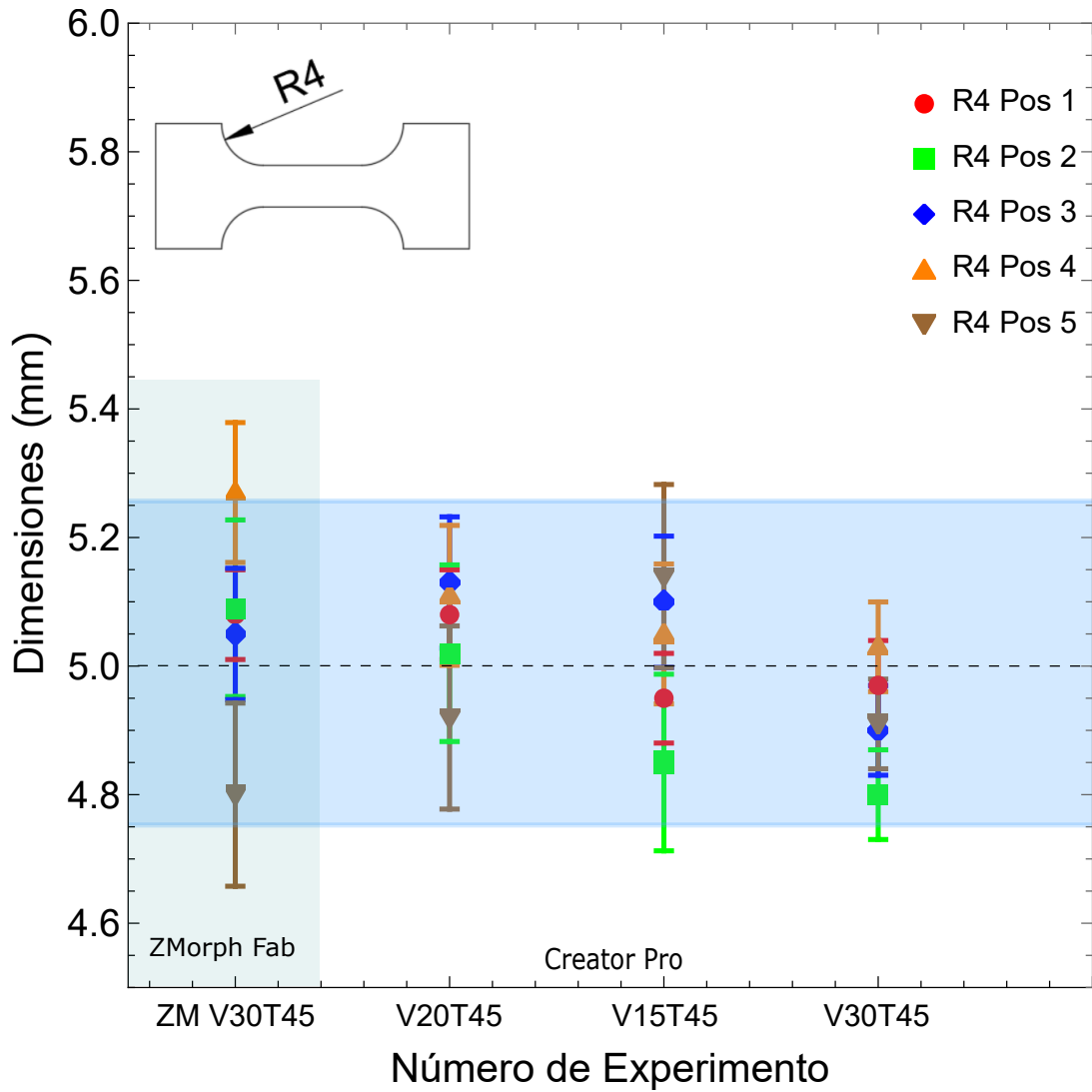
4. RESULTADOS

Figura 4.36: Resultados de cambios de parámetros e impresora sección R3



4.7 Resultados del quinto experimento: tipo de impresora respecto a la configuración de la cama de impresión

Figura 4.37: Resultados de cambios de parámetros e impresora sección R4

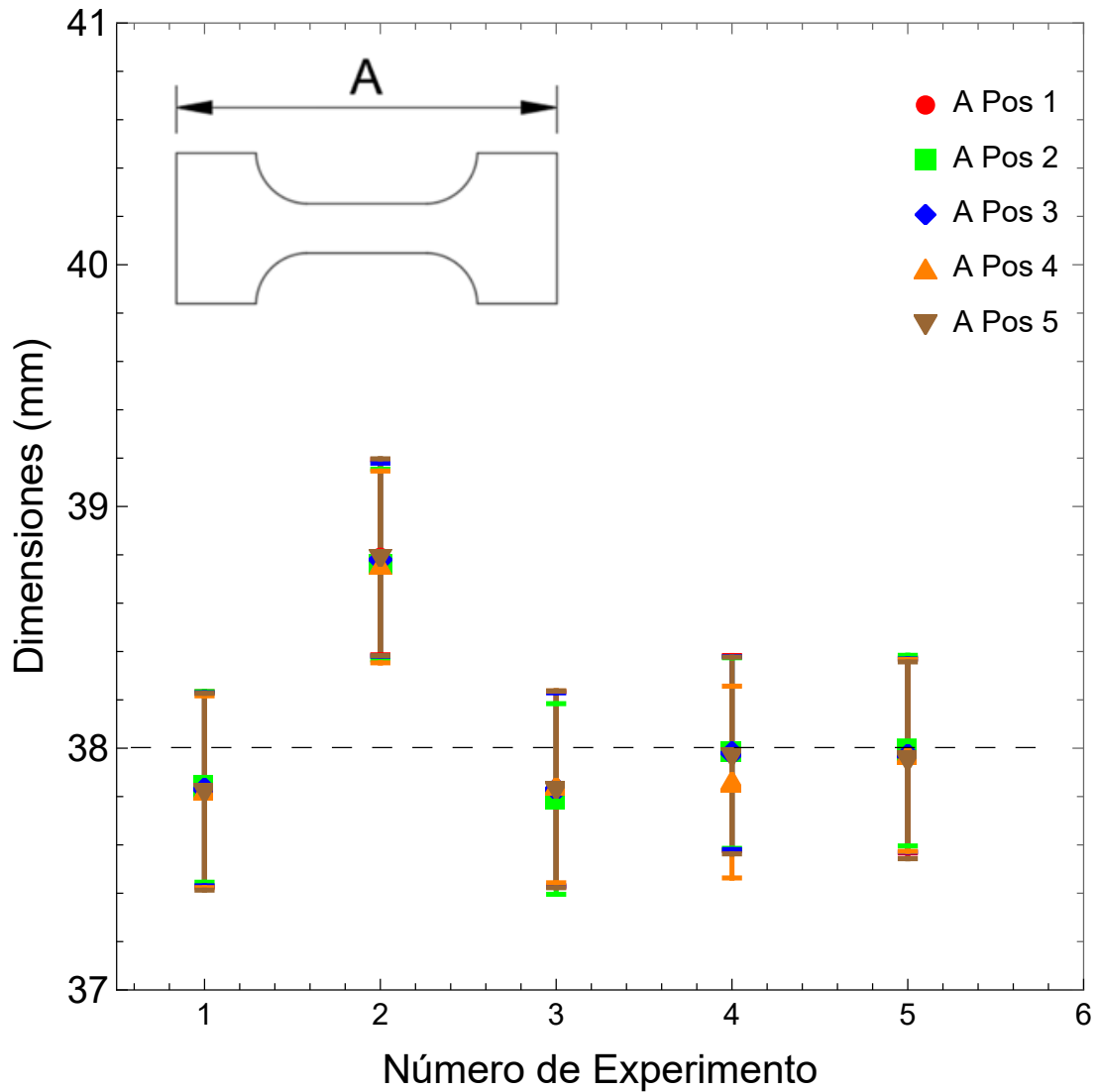


4.8. Resultados Sexto experimento: Ajustes de parámetros en la impresora ZMorph Fab

Como se mencionó anteriormente se realizó la impresión de la probeta con la impresora ZMorph Fab y se compararon con los parámetros iniciales de la impresora que son 18 mm/s y 60° C (impresión 1), los parámetros que mejor comportamiento tuvieron en la impresora Creator Pro que son 30 mm/s y 45 ° (impresión 2) C, a partir de esto y siguiendo la metodología anterior se realizaron cambios en la velocidad inicial y la temperatura como fueron 30 mm/s a 60° C (impresión 3), 34 mm/s a 60° C (impresión 4)y 45 mm/s a 60° C (impresión 5).

En la figura 4.38, se observan los resultados de la impresión en la sección A. Hay que destacar que el experimento 5 se realizó con una mayor velocidad de impresión en la primer capa (45 mm/s); con ello se obtuvo una mayor exactitud con respecto al valor esperado, sin embargo estéticamente el objeto empezó a tener errores, se observa que los parámetros que mejor funcionaron en la Creator pro, en este caso distan mucho de la medida original, sin embargo es importante destacar la precisión de la impresora en los 5 experimentos, de igual manera se observa que al utilizar los parámetros de la Creator Pro los valores difirieron mucho del valor esperado.

Figura 4.38: Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección A



En la figura 4.39 y 4.40, correspondientes a las gráficas de la sección B y B' respectivamente, se observa que ambos casos la impresión inicial sin cambios de parámetros fue la que dio mejores resultados, a excepción de la posición 5 en el

4. RESULTADOS

experimento de la sección B', donde se observa que se alejó mucho del resto de resultados.

Figura 4.39: *Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FABsección B*

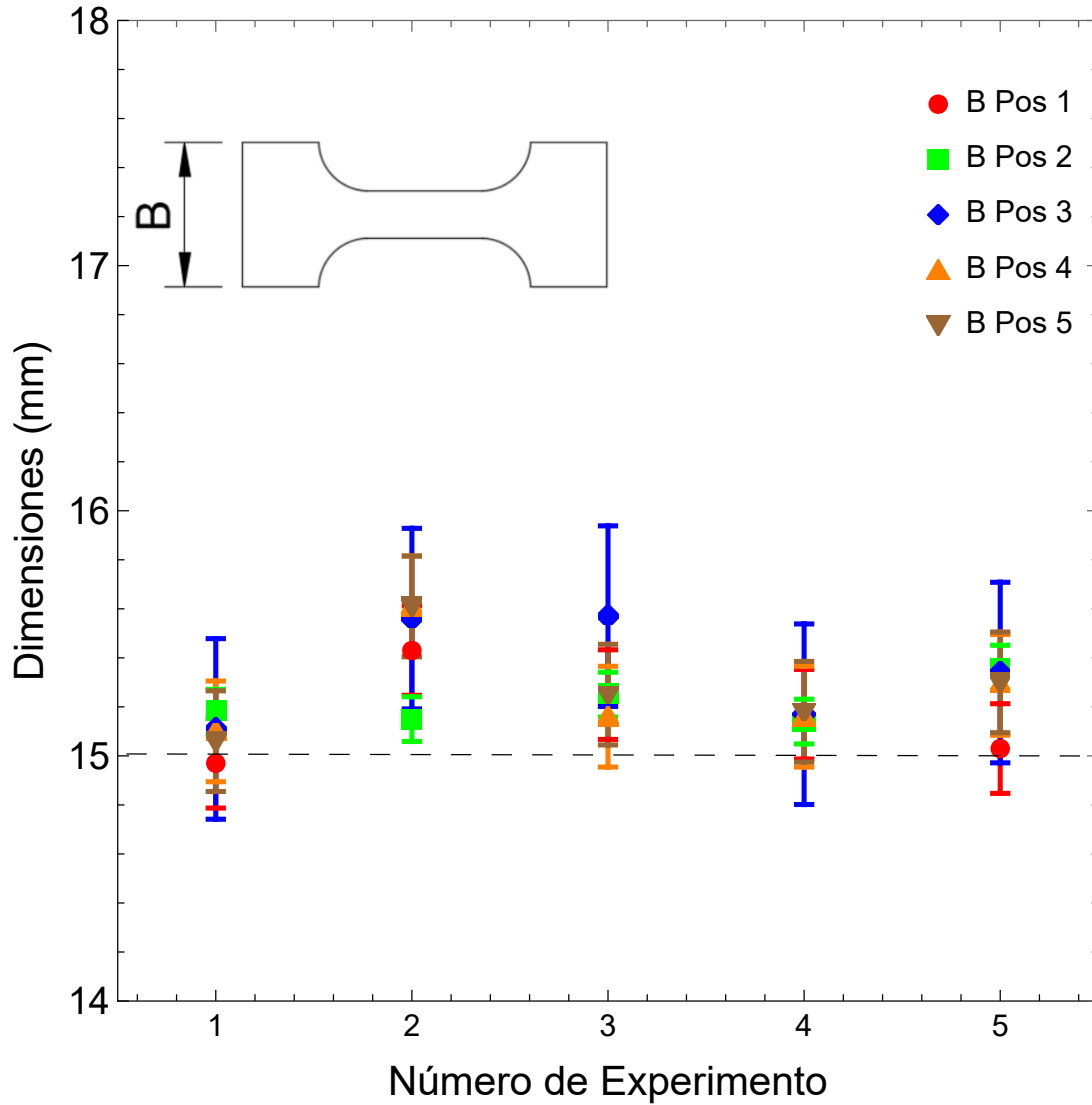
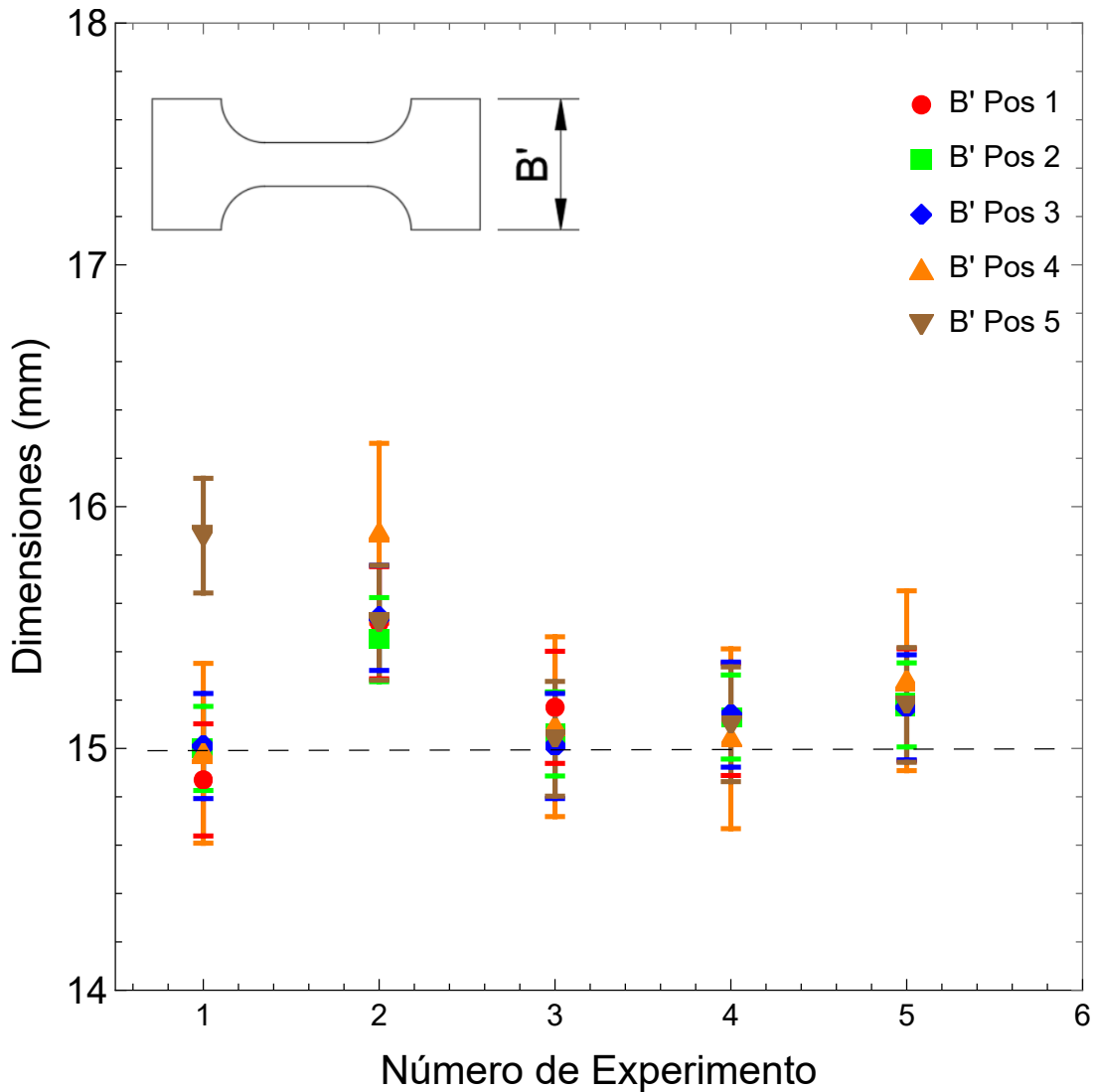


Figura 4.40: Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección B'

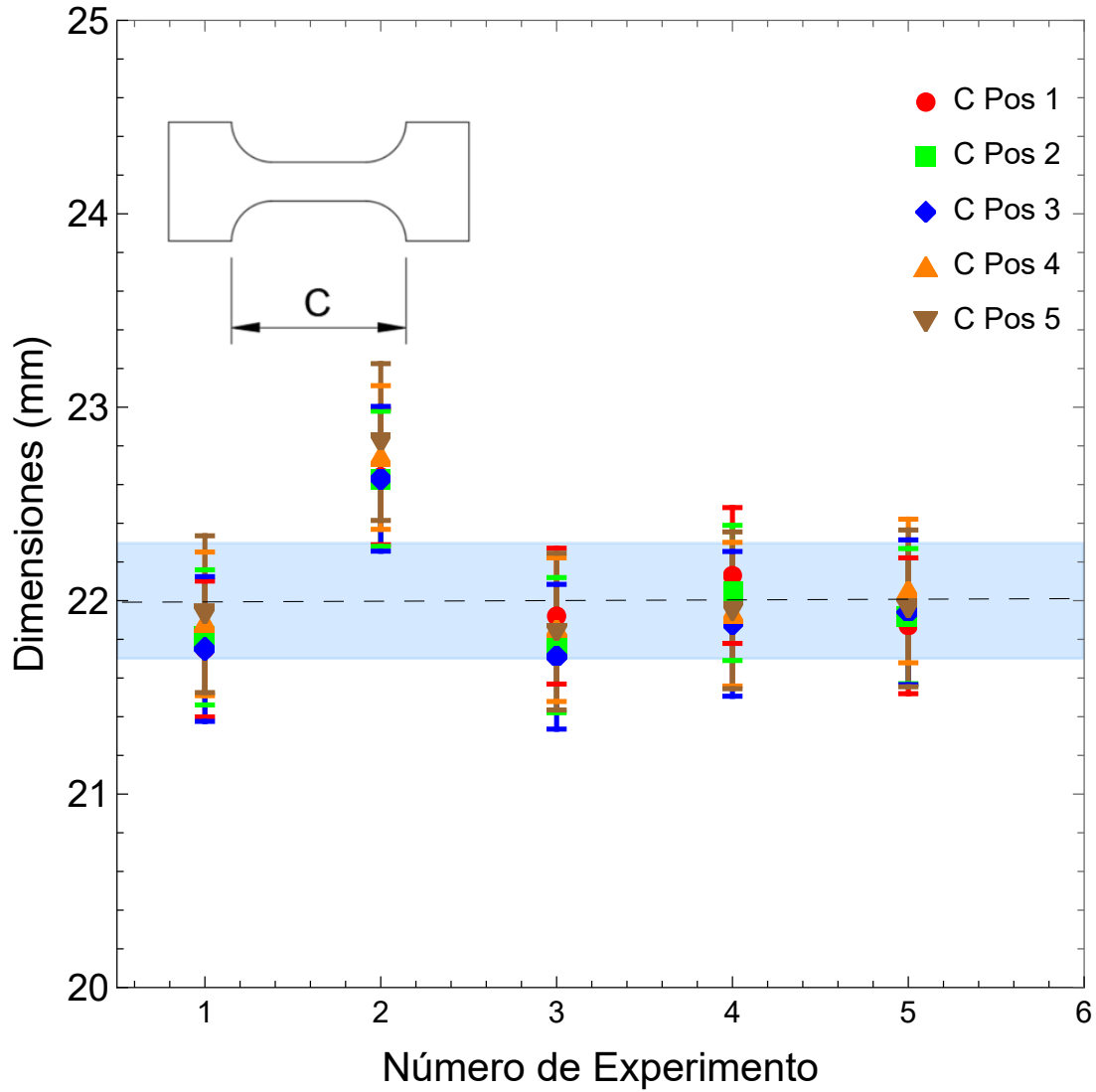


En la figura 4.41 se observan las medidas en la sección C, en este caso los parámetros de la Creator Pro utilizados en la ZMorph Fab, son los que peor resultado dieron, y los valores de la impresión 5, son los que mejores resultados

4. RESULTADOS

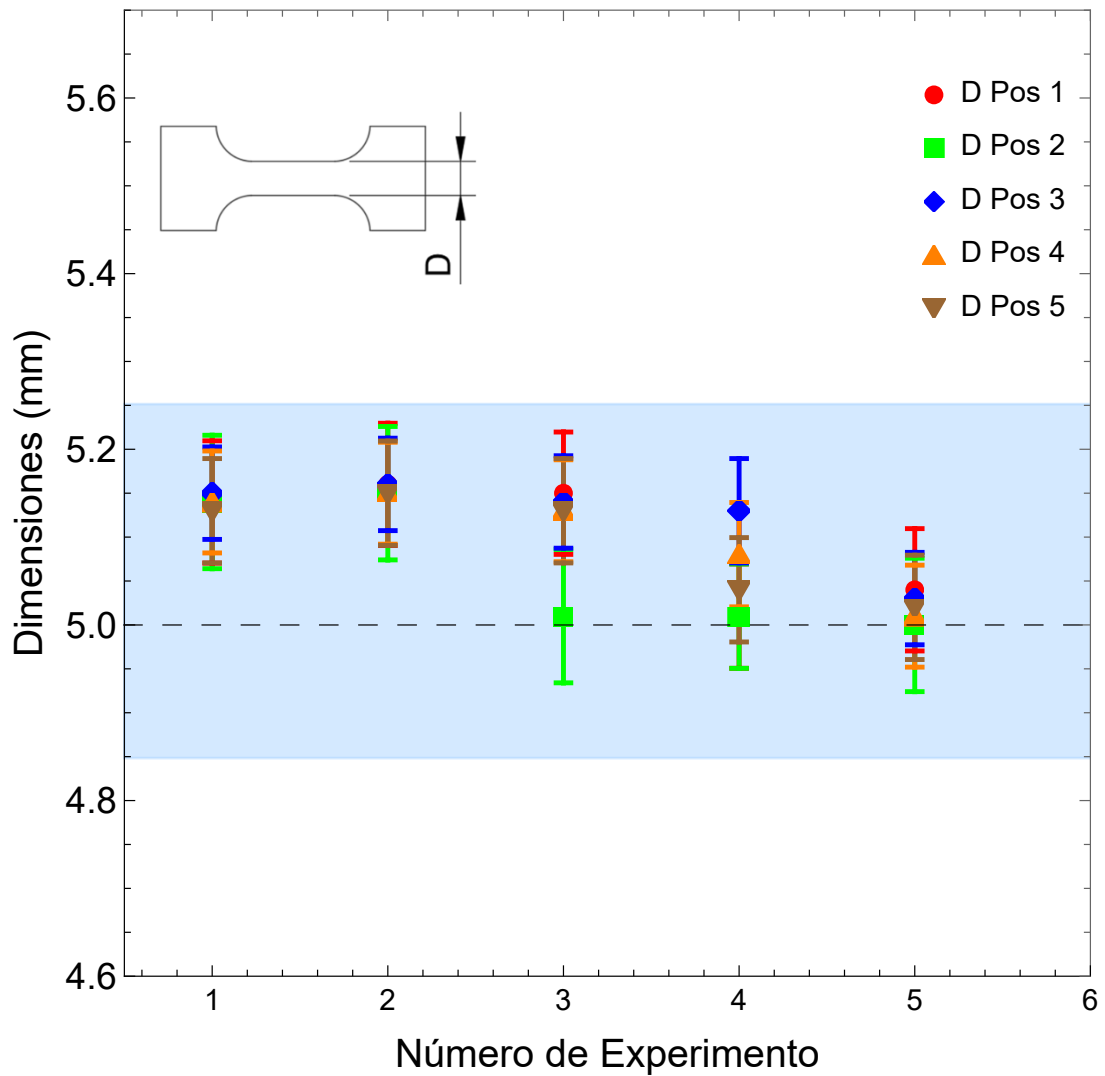
nos dieron, estando todos dentro de la tolerancia dimensional marcada por la norma.

Figura 4.41: *Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección C*



En la sección D, mostrada en la figura 4.42, podemos observar que la mayoría de los valores están dentro de la zona de tolerancia y es importante destacar que la que mejor resultados tiene es la impresión 5.

Figura 4.42: Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección D



4. RESULTADOS

Los radios, mostrados en las figuras 4.48, 4.44, 4.45 y 4.46 siendo R1, R2, R3 y R4 respectivamente, tienen un comportamiento similar destacando que el último experimento es el que más aproxima los datos medidos con los valores reales.

Figura 4.43: Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección R1

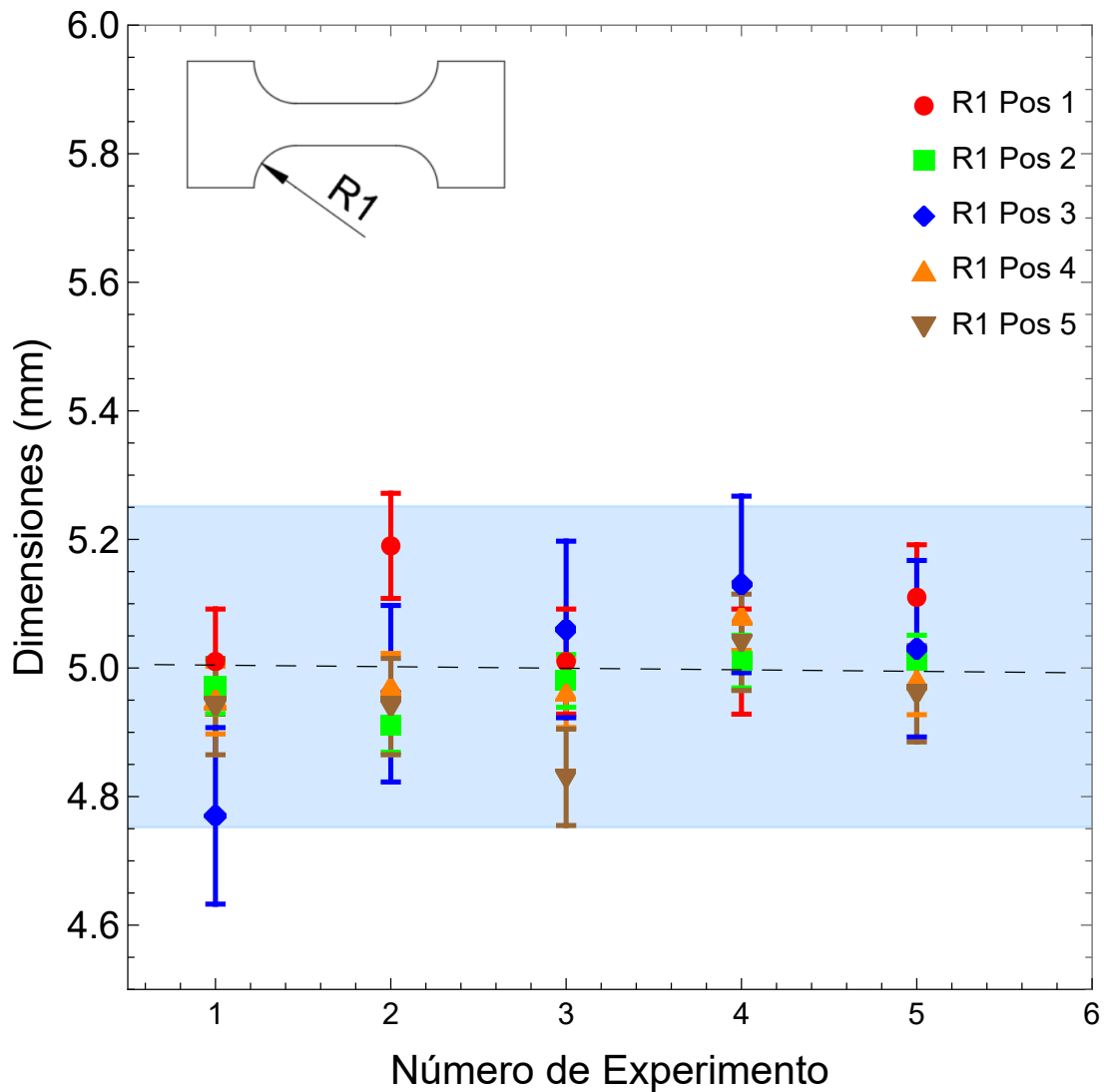
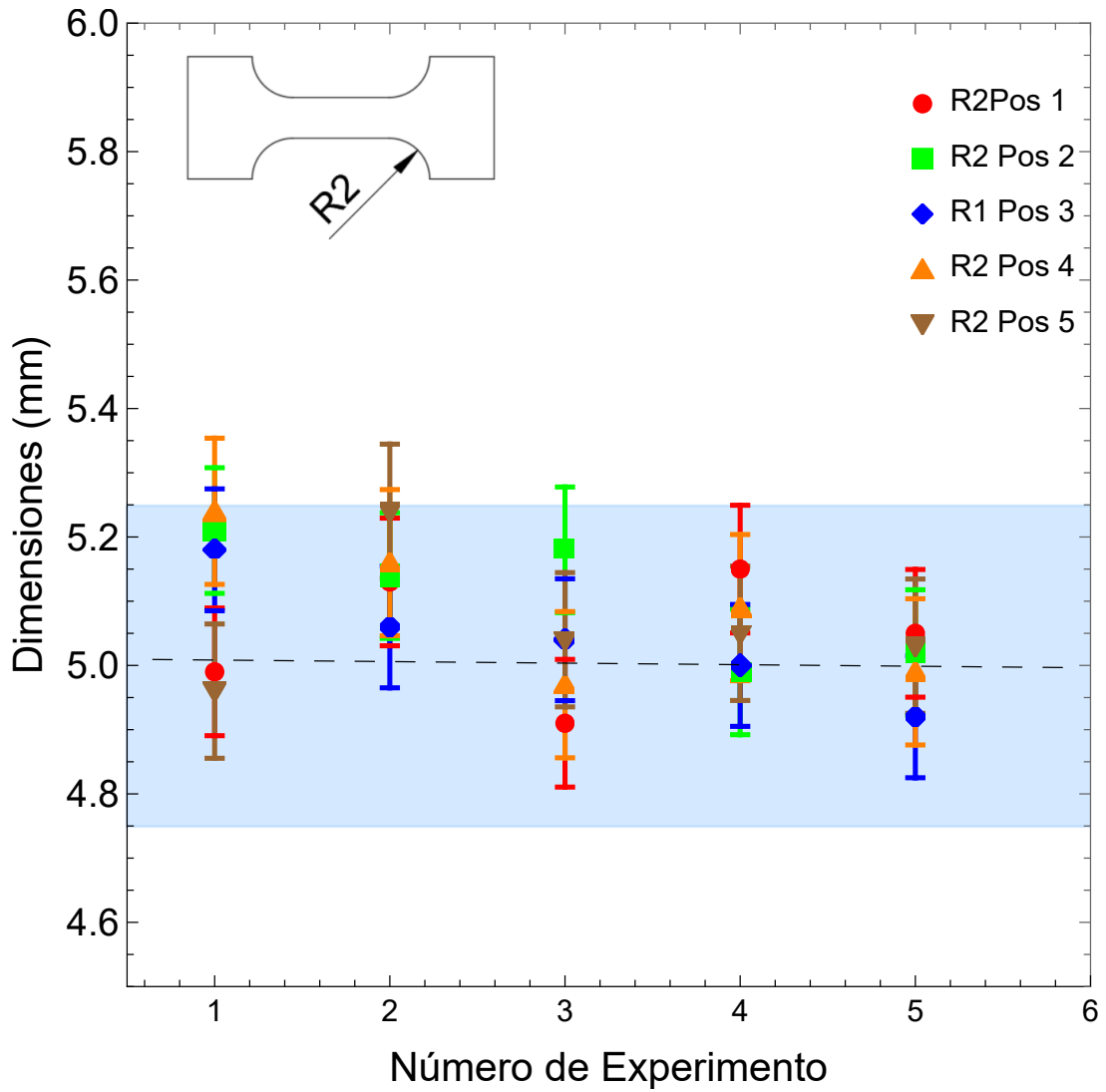


Figura 4.44: Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección R2



4. RESULTADOS

Figura 4.45: Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección R3

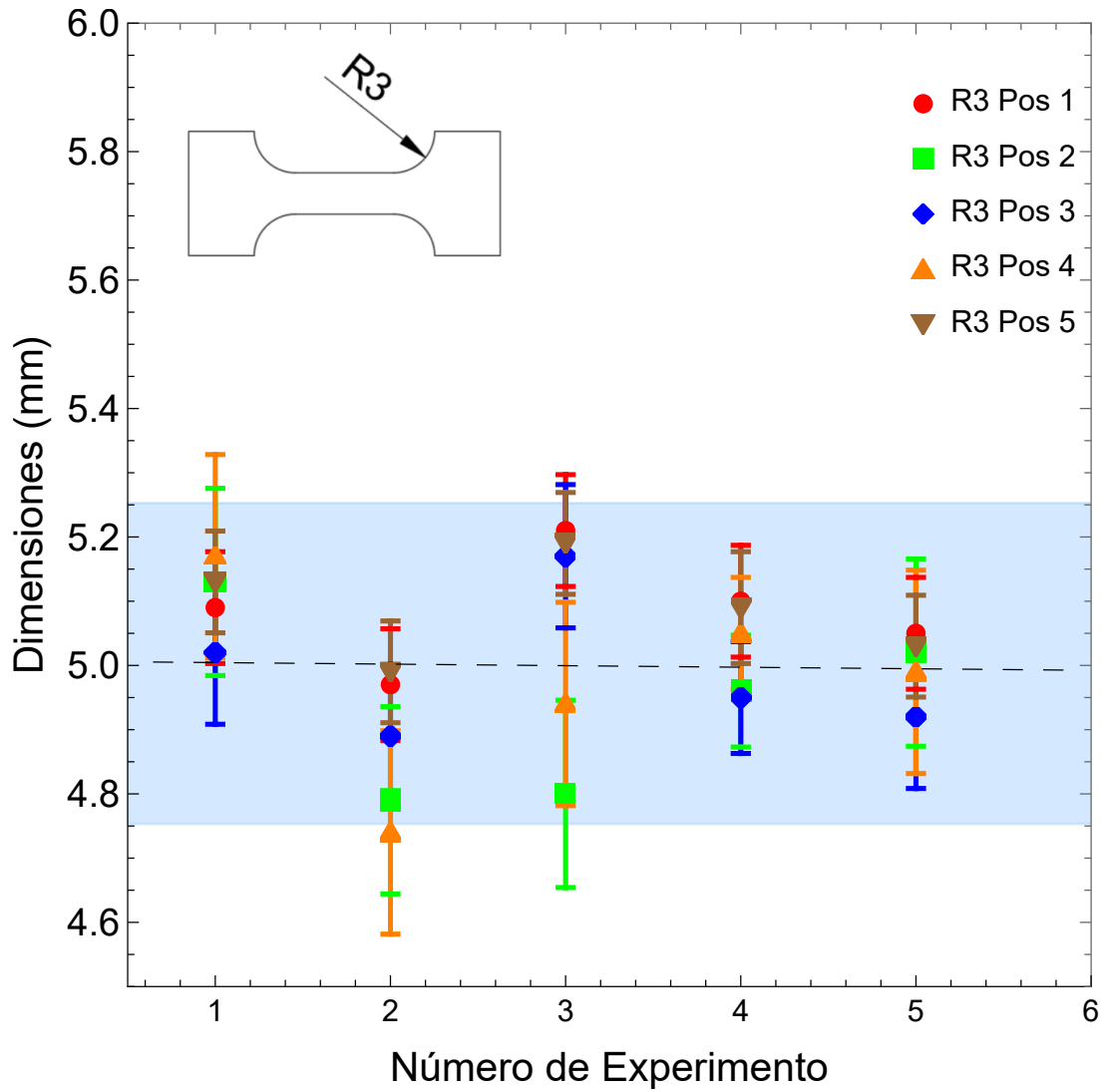
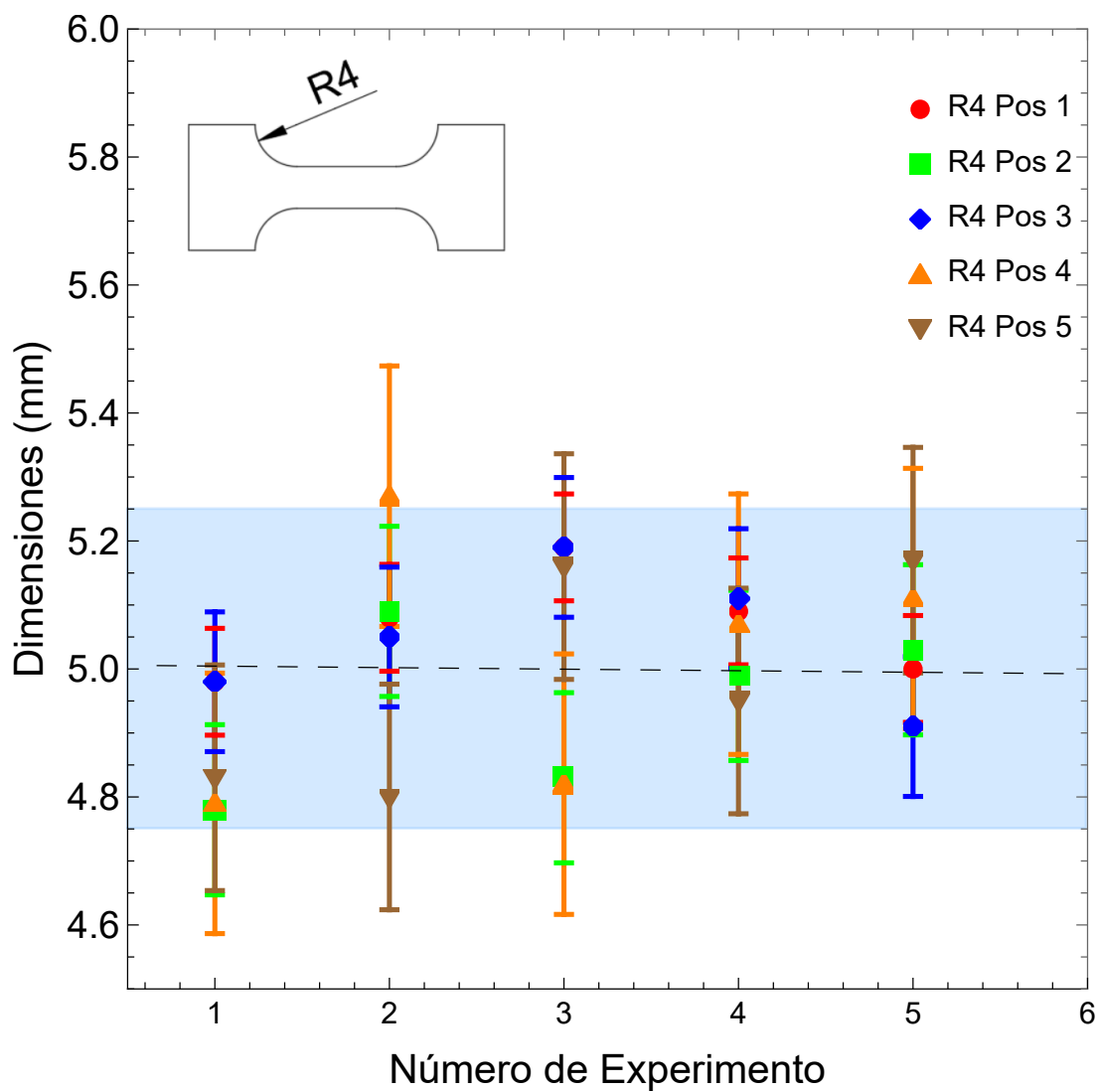


Figura 4.46: Resultados de cambios de parámetros en ZMORPH FAB sección R4



4.9. Análisis de Resultados

Con respecto a la geometría se destaca que las tolerancias y la forma en general nos permite explorar los datos dimensionales.

4.9.1. Primer experimento: El efecto de los parámetros iniciales

Se observó que el lugar o la posición de impresión sí influye cuando la cama de impresión esta desnivelada, es decir en el punto cardinal donde exista una desnivelación es más probable tener un error dimensional. Existe una gran diferencia entre las dimensiones físicas y las dimensiones del valor esperado por lo que era necesario realizar cambios para tener un mejor control de datos, de igual manera el uso de un vernier físico para hacer la medición de manera manual influyó mucho en los resultados, como se observó en algunas gráficas, donde todos los valores estaban dentro de un rango excepto uno y esta anomalía es debida al error humano al momento de realizar las mediciones correspondientes.

4.9.2. Segundo experimento: El efecto de la cama de impresión

En el segundo experimento donde se corrigió la nivelación de la cama de impresión, se observa claramente que el hecho de hacer una corrección de nivelación en la cama de impresión es de gran importancia, ya que esto disminuye considerablemente el error dimensional en un 60%, así mismo, el uso del software tipo vernier digital para obtener las medidas dimensionales y la cámara como herramienta de medición nos ayudó a ahorrar tiempo y obtener de manera más precisa los datos y así disminuir el error humano.

4.9.3. Tercer experimento: Disminución del efecto de pie de elefante

En el tercer experimento donde se cambiaron los parámetros de impresión en la Creator Pro de temperatura en la cama de impresión y de velocidad en impresión de la primer capa, con estos cambios los errores dimensionales disminuyen siendo el parámetro de la velocidad inicial de la primer capa el que más influye en esto.

4.9.4. Cuarto experimento: Aumento de velocidad en la primer capa de impresión

En el cuarto experimento donde se realizaron los cambios de parámetros en la velocidad de impresión de la primer capa de impresión, se llegó a una velocidad en donde los errores dimensionales son reducidos y en la mayoría de los casos logra que cumplan las dimensiones establecidas por la norma tomando en cuenta las tolerancias dimensionales.

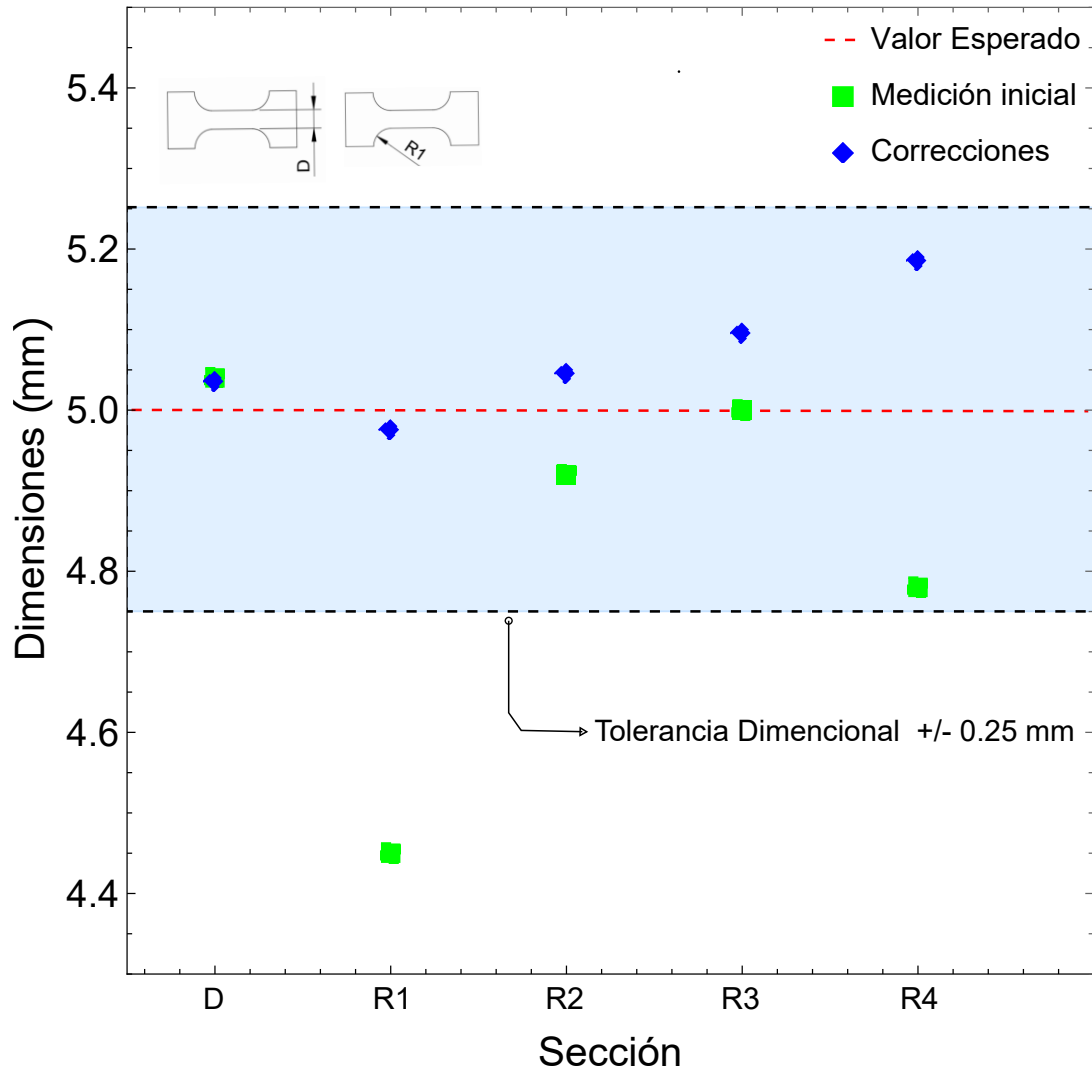
4.9.5. Quinto experimento: Tipo de impresora con respecto a la cama de impresión

En el quinto experimento, donde se cambió de impresora pero se utilizaron los datos óptimos de la impresora usada anteriormente, se observó que los parámetros son característicos de cada impresora y los parámetros que funcionan bien en una, no necesariamente lo harán en la otra ya que la ZMorph a pesar de tener mejores características, es la que mayor error dimensional muestra utilizando los parámetros de la Creator Pro debido a que los parámetros de impresión no son extrapolables.

4.9.6. Sexto experimento: Ajustes de parámetros en la impresora ZMorph Fab

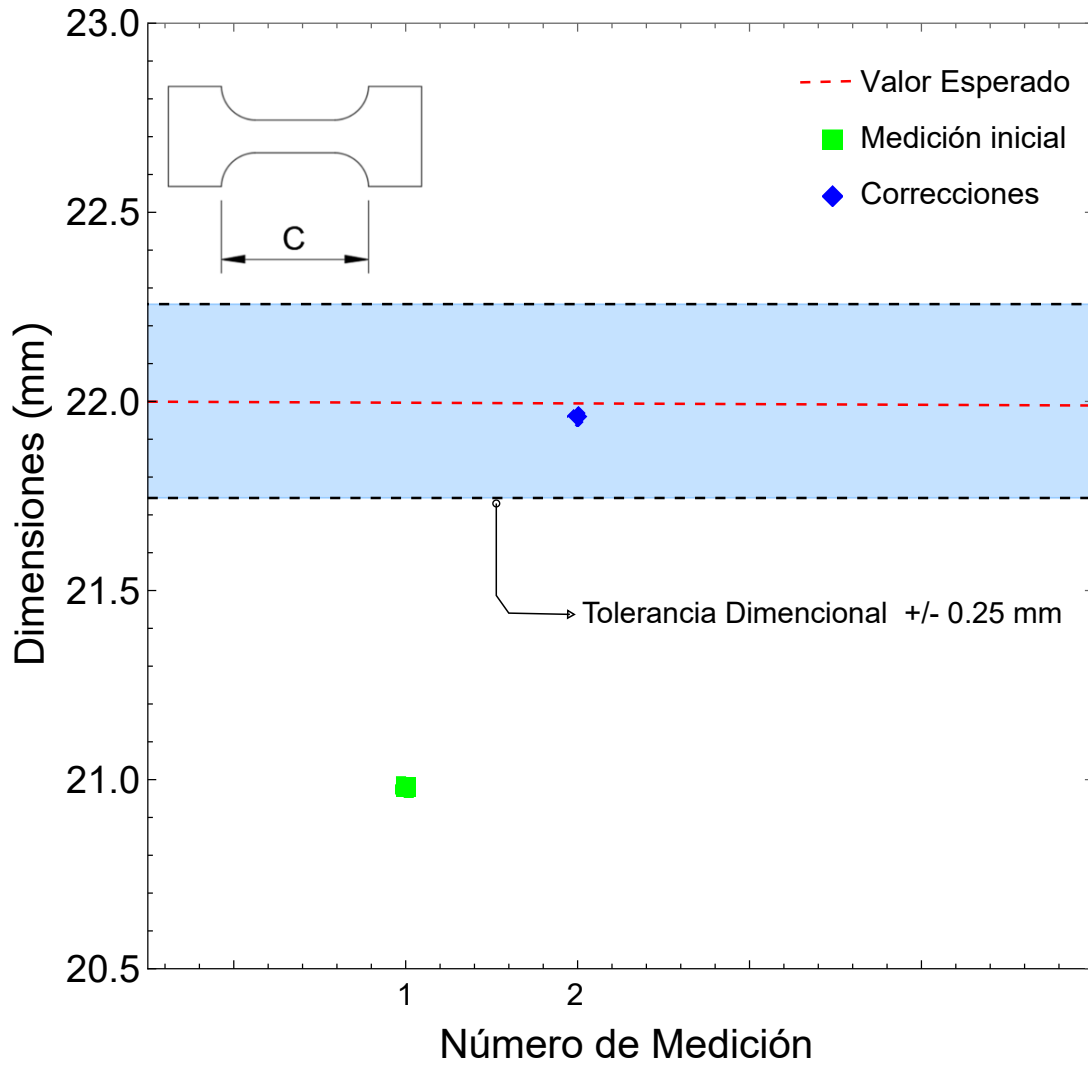
En el sexto experimento, donde se realizó una caracterización de la impresora ZMorph Fab, podemos confirmar que los valores de una impresora no se pueden extrapolar a la otra y por lo tanto son característicos de cada máquina, pero modificar parámetros como la temperatura de la cama de impresión y la velocidad de la primer capa de impresión nos ayudan a mejorar la exactitud dimensional, sin embargo es importante destacar que los parámetros que nos dio la mejor relación dimensional también fue el que presento pequeños defectos estéticos, de igual manera se observa que al ser una impresora con la cama fija la precisión y exactitud de las impresiones es mayor logrando que la gran mayoría de los datos estén dentro de la zona de tolerancia dimensional. A continuación en las figuras x se muestra una comparación gráfica de las medidas iniciales con la Creator Pro y las últimas realizando correcciones y cambio de impresora a la ZMorph Fab .

Figura 4.47: Comparación datos iniciales y datos corregidos en las secciones D, R1, R2, R3 y R4 con medida de 5 mm.



4. RESULTADOS

Figura 4.48: Comparación datos iniciales y datos corregidos en la sección C



A continuación se presenta el error relativo de las últimas mediciones presentadas en las gráficas anteriores.

Sección D, R1, R2, R3, y R4

Dimensión promedio de la medición inicial:

$$Mi_1 = (5.04 + 4.45 + 4.92 + 5 + 4.78)/5 = 4.83$$

Error Relativo inicial:

$$ER_{i1} = \frac{|5 - 4.83|}{5} * 100\% = 3.4\%$$

Dimensión promedio de la medición corregida:

$$Mc_1 = (5.02 + 4.96 + 5.03 + 5.08 + 5.17)/5 = 5.052$$

Error Relativo corregido:

$$ER_{c1} = \frac{|5 - 5.052|}{5} * 100\% = 1.04\%$$

Sección C

Error Relativo inicial:

$$ER_{i2} = \frac{|22 - 20.98|}{22} * 100\% = 4.63\%$$

Error Relativo corregido:

$$ER_{c2} = \frac{|22 - 21.96|}{22} * 100\% = 0.18\%$$

Error promedio relativo después de la corrección

$$\frac{1.04 + 0.18}{2} = 0.61\%$$

Capítulo 5

Conclusiones

5. CONCLUSIONES

Gracias al uso de Software de Visual Assist de National Instruments y la cámara utilizada CCD1240C y un lente C VIS-NIR , fue posible obtener medidas de forma digital con mayor precisión. Se logró disminuir el error de medición por el factor humano hasta en un 60 %, esto es muy importante dado que la mayoría de errores son causados por el humano. Se identificó el porcentaje de error dimensional con respecto al modelo digital (CAD, que ofrece los valores dimensionales teóricos) y el valor dimensional obtenido de la pieza real. Con los datos obtenidos fue posible realizar análisis estadísticos que ayudaron a la toma de decisiones en la manipulación de parámetros de impresión.

Se obtuvieron gráficas comparativas de las dimensiones en cada sección de interés en la geometría analizada para cada experimento realizado. Con los resultados observados en dichas gráficas, se logró optimizar los parámetros de impresión tales como velocidad inicial de la primer capa de impresión, temperatura de la cama de impresión y tipo/configuración de la impresora.

Se obtuvieron gráficas comparativas donde fácilmente se puede observar la desviación estándar de los resultados y cómo estos se relacionan con las tolerancias dimensionales marcadas por la norma, así como también las características físicas y los parámetros de impresión que influyen en los valores dimensionales del producto final.

Dentro de los análisis se observó que los valores de temperatura en la cama de impresión y velocidad de la primer capa de impresión son variables que al ajustarlas se puede obtener un mejor resultado de impresión; es decir, estos parámetros son críticos y al manipularlos correctamente permiten disminuir el error dimensional de los productos finales.

Se observó que los parámetros críticos de impresión son característicos para cada impresora y para cada material utilizado, incluso de la misma marca. Lo anterior no significa que esta metodología no pueda ser empleada para otro modelo de impresora u otro tipo de filamento de impresión; lo relevante es que al aplicar la presente metodología se logrará la disminución de los errores de impresión independientemente del tipo de impresora y material de impresión. Por lo tanto, cabe resaltar que los parámetros críticos de impresión no son extrapolables de

impresora a impresora ni de material a material.

Finalmente esta investigación dió como resultado un manual que tomando en cuenta parámetros y elementos claves en la impresión 3D. Aquí se muestra una metodología que puede ayudar a un usuario final a disminuir los errores dimensionales de la manufactura aditiva y facilitarle el proceso de aprendizaje en este nuevo tipo de tecnología que cada vez esta más presente en el mundo del diseño industrial. Enfocado en los errores dimensionales, proporcionando una guía con los pasos seguidos en esta tesis que como se observa en las gráficas se logró disminuir el error dimensional.

Observaciones

La primer capa de impresión es la más importante para garantizar una fidelidad dimensional ya que si esta falla o tiene errores el resto de la impresión los maximizará. También es importante mencionar que no todo el proceso de conseguir una impresión de calidad depende únicamente del proceso de manufactura; sino que también es importante el proceso de diseño digital y la obtención de código G para su manufactura. Al no diseñar pensando en el proceso de la manufactura aditiva difícilmente se obtendrán resultados de calidad, es por eso que se debe de tener en cuenta desde la concepción del producto.

Dentro del diseño industrial esta herramienta tipo manual ayudara a mejorar los procesos de realizar un prototipo.

Limitaciones

El proceso para disminuir los errores podría fallar si no se tiene un registro y el cuidado necesario al realizar la nivelación de la cama o cualquiera de los otros puntos mencionados. El proceso de calibración/nivelación para optimizar los parámetros de impresión es un proceso que lleva tiempo y puede resultar tedioso para el usuario final; sin embargo es necesario.

Mejoras a Futuro

Este estudio se realizó con las impresoras disponibles en los laboratorio del IIM de la UNAM, es por eso, que se propone probar con otro tipo de impresoras y no solo de deposición fundida, si no que también realizar pruebas en impresoras de metal, vidrio, cemento, biomateriales, etc.

El manual será puesto a disposición de los usuarios propuestos y se debe tomar en cuenta su experiencia para realizar modificaciones que faciliten su uso y promuevan la mejora continua de este documento.

Bibliografía

- Altintas, Y. y Ber, A. (2001). Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and cnc design. *Appl. Mech. Rev.*, 54(5):B84–B84.
- Aranda, S. (2020). *3D Printing Failures: How to Diagnose and Repair ALL Desktop 3D Printing Issues*. Edición de kindle. ediciaranda2020
- Avelar, P. V. e. a. (2020). The environmental impact of 3d printing. *Nature Sustainability*, 3:122–129.
- Bauer, I. J. M. y Cuello, T. F. (2022). Desde automatización de FDM 3D hacia Autonomación Dinámica (Jidoka): Detección temprana de errores utilizando una webcam y convolutional neural networks para el procesamiento de imágenes. En *2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, pp. 1–6.
- Bowyer, A. y Moore, T. (2011). *Build Your Own 3D Printer*. No Starch Press, San Francisco, CA.
- Campbell, T. A. y Williams, C. B. (2011). Additive manufacturing—the journey so far and the road ahead. *Rapid Prototyping Journal*, 17(2):85–92.
- Charalampous, P., Kostavelis, I., Kontodina, T., y Tzovaras, D. (2021). Learning-based error modeling in FDM 3D printing process. *Rapid Prototyping Journal*, 27(3):507–517.
- Crosby, P. B. (1979). *Quality Is Free: The Art of Making Quality Certain*. McGraw-Hill.
- Esquivel, A. E. (2015). *Metrología: y sus aplicaciones*. Grupo Editorial Patria.

BIBLIOGRAFÍA

- Eswaran, P., Sivakumar, K., y Subramaniyan, M. (2018). Minimizing error on circularity of FDM manufactured part. *Materials Today: Proceedings*, 5(2):6675–6683. Publisher: Elsevier.
- Flashforge (2022). *Creator Pro user manual*.
- Goel, K. (2018). The impact of 3d printing errors on the medical industry. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 5(4):235–245.
- Imai, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill.
- Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C., y Bowyer, A. (2011). RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica*, 29(1):177–191. Publicador: Cambridge University Press.
- Kenney, J. F. y Keeping, E. S. (1962). *The Standard Deviation and Calculation of the Standard Deviation*. Van Nostrand, Princeton, NJ, 3rd edicikenney1962
- McDonough, W. y Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. North Point Press, New York, NY.
- Mesa, L. M. y Trujillo, J. H. S. (2016). El impacto de la impresión 3d en la joyería. *Lámpsakos*, núm. 16:89–97.
- Murphy, S. V. y Atala, A. (2014). 3d bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*, 32(8):773–785.
- Narotzky, V. (2010). Los límites de lo perfecto: nuevos paradigmas del diseño y la cultura material. En *Diseño e historia: tiempo, lugar y discurso*, pp. 127–136. Designo.
- Oliva, M. P. (2022). La impresión 3d de órganos, el futuro de la medicina.
- Pande, P. S., Neuman, R. P., y Cavanagh, R. R. (2000). *The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies Are Honing Their Performance*. McGraw-Hill.
- Perry, Y. (2015). Espacio nasa construye motor de cohete impreso en 3d.
- Reason, J. (1990). *Human Error*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- Schulte, D. (2023). El proyecto azul digital explora la unión de tradición e innovación en la cerámica.
- Smith, J. (2015). The post-patent era: How the expiration of the fdm patent transformed the 3d printing industry. *Journal of Additive Manufacturing*, 8(2):78–92.
- Song, R. y Telenko, C. (2017). Material and energy loss due to human and machine error in commercial FDM printers. *Journal of Cleaner Production*, 148:895–904.
- Tapia, D. M. L. (2017). Estudio preliminar de las armas de fuego cortas, fabricadas por impresoras 3d por el método de deposición de fundido. *Revista Skopein*, (18).

Apéndice A

Manual

A.1. Justificación

Se desarrolla un manual tipo instructivo de los pasos que se deben seguir para conseguir una mayor calidad en el proceso de impresión 3D. Existen varias razones por las que sería justificable desarrollar un manual de usuario para impresión 3D, aquí se presentan algunas:

1. Instrucciones claras: Un manual de usuario bien desarrollado proporciona instrucciones claras y precisas sobre cómo usar una impresora 3D. Esto es especialmente importante para usuarios principiantes o aquellos que no tienen experiencia previa en impresión 3D, ya que pueden necesitar una guía detallada para operar la impresora de manera efectiva.
2. Reducción de errores: Un manual de usuario también puede ayudar a reducir errores al imprimir en 3D. Al proporcionar instrucciones precisas sobre cómo operar la impresora, el usuario puede evitar errores que pueden resultar en desperdicio de material y tiempo.
3. Maximización de la eficiencia: Un manual de usuario puede ayudar a los usuarios a maximizar la eficiencia de la impresión 3D. El manual puede proporcionar información sobre cómo optimizar los parámetros de impresión y los ajustes de configuración para obtener los mejores resultados de impresión en el menor tiempo posible.
4. Seguridad: Un manual de usuario puede incluir información sobre cómo utilizar la impresora de manera segura y responsable. Esto es especialmente importante en un entorno educativo o en un entorno donde múltiples usuarios pueden utilizar la misma impresora.
5. Estándar de calidad: Un manual de usuario también puede ayudar a garantizar un estándar de calidad consistente en la impresión 3D. Si todos los usuarios siguen las mismas instrucciones y ajustes de configuración, se puede garantizar que las impresiones sean consistentes y de alta calidad.

En resumen, el desarrollo de un manual de usuario para impresión 3D puede mejorar la eficiencia, reducir errores, mejorar la seguridad y garantizar un

estándar de calidad consistente. Por lo tanto, es una inversión valiosa para cualquier persona o empresa que utilice una impresora 3D

A.2. Diseño Orientado al Usuario

Este manual va dirigido a un público en particular, el usuario principiante que se esta adentrando en la impresión 3D, se espera que este usuario tenga conocimientos básicos de modelado 3D y haya realizado un par de pruebas antes de consultar este manual, que aunque es introductorio a los errores, no lo es al uso de impresoras.

Nuestro usuario es de cualquier genero, en una edad de entre 20 y 50 años, que tenga acceso a la tecnología y una afición por ella, abarcando estudiantes universitarios y profesores encargados de laboratorios digitales.

Dado que no va dirigido a un publico especializado en esta materia se debe tratar de usar palabras y conceptos fáciles de comprender, así como ilustraciones que ejemplifiquen lo descrito. Este manual debe ser capaz de adaptarse a las necesidades para poder lograr una mejora continua.

A.3. Desarrollo

El manual se realizara en forma de infografía para que sea fácil de leer y de comprender con el siguiente contenido:

La impresión 3D se ha popularizado en los últimos años, sin embargo, los errores dimensionales generados por estas máquinas provocan que su uso se limite a manufacturas específicas.

Aunque es verdad que los errores pueden ser originados por fallas mecánicas, la realidad es que en su gran mayoría se deben a un error humano. Es por eso que el objetivo de este manual es ayudarte a seguir una serie de pasos que te

ayudarán a disminuir los errores en la impresión 3D.

I- Componentes mecánicos

1. Verifica que los ejes y rodamientos del mecanismo de impresión se encuentran engrasados y debidamente atornillados.
2. La nivelación de la cama de impresión juega un rol de gran importancia es por eso que una correcta y constante nivelación es necesario, existen impresoras que tienen la cama de impresión en voladizo y otras que la tienen fija, en el caso de ser una cama fija la nivelación es mas sencilla y conseguirás mejores resultados; en el caso de ser una cama voladiza es necesario no solo realizar el ajuste con los tornillos de nivelación, si no también utilizar un nivel para obtener mejores resultados.
3. Mantener la cama de impresión limpia, se deberá limpiar con alcohol isopropilico antes y después de cada impresión, ya que al momento de quitar una pieza con las manos es posible que dejemos un poco de grasa natural y esta con el tiempo evite que las próximas impresiones se peguen correctamente a la cama de impresión, maximizando el porcentaje de riesgo.

II. Uso de Software.

1. Usa el software de la compañía de tu impresora, para conseguir mejores resultados se recomienda utilizar el software desarrollado por la misma compañía que tu impresora esto garantizara que los parámetros iniciales puedan ser de gran ayuda y cercanos a los que necesitaras para una gran impresión.
2. Utiliza los parámetros de temperatura de extracción y temperatura de la base marcados por la marca del material que utilizaras, regularmente estos datos vienen en una etiqueta sobre la bobina del filamento.
3. Mueve los rangos de velocidad, generalmente con una menor velocidad podrías conseguir una impresión de mejor calidad, cambiar estos rangos te ayudará a disminuir el error.
4. Disminuye el uso de soportes, recuerda que la manufactura aditiva es la colocación de material capa por capa, diseñar tendiendo en cuenta esto te

ayudara a reducir errores de geometrías difíciles de conseguir y usar el mínimo número de soportes te ayudará a tener una impresión con mejor calidad.

Por último como recomendación general la limpieza y mantenimiento constante de tu impresora te ayudará a alargar su vida útil y conseguir prototipos de gran calidad.



Manual para disminuir los errores en la impresión 3D

“Manual para disminuir los errores en la impresión 3D”

Este manual es parte y resultado de la tesis “Errores dimensionales en la manufactura aditiva del modelado por deposición fundida”, para la maestría en diseño industrial en la Universidad Nacional Autónoma de México.

Autor: Ing. Atemoc Centli de la Hoz Carranza

Director de Tesis: Dr. Francisco Manuel Sánchez Arévalo

Cuerpo Sinodal:

Dr. Vicente Borja Ramírez
MDI. Antonio Solórzano Cisneros
MDI. Erick Iroel Heredia Carrillo
Mtra. Vanessa Sattelle Gunther

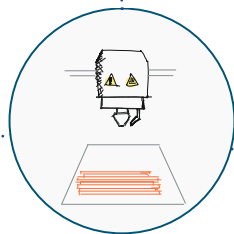
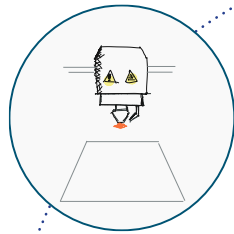
Ciudad de México, 2023.

Este manual está dirigido a usuarios principiantes en la impresión 3D, con el objetivo de mejorar la eficiencia, reducir errores, minimizar desechos, mejorar la seguridad y garantizar un estándar de calidad consistente.

Principales Errores en la Impresión 3D

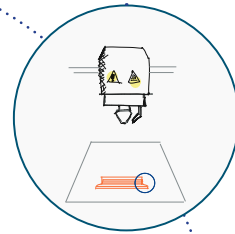
Exceso de material en la boquilla.

Cuando existe un exceso de material, es necesario precalentar y retirar la boquilla, luego, con un cilindro, empujar el exceso



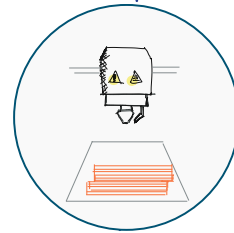
Impresión temblorosa

La impresión tiene tantas imperfecciones que da el efecto visual de estar temblando. Esto se debe a una distancia incorrecta entre el eje Z y la cama de impresión. Para solucionarlo, es necesario nivelar la cama de impresión.



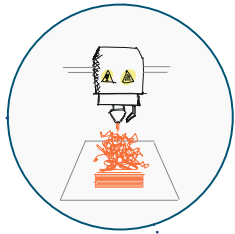
Pie de elefante

La impresión tiene una mayor cantidad de material en la parte inferior. Para solucionarlo, es necesario disminuir la temperatura de la cama de impresión.



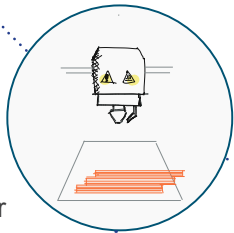
Desplazamiento de una capa

Esto se debe generalmente a que un motor no está funcionando correctamente. Se recomienda reiniciar la impresora, aceitar el eje del motor y, en caso de ser necesario, reemplazarlo.



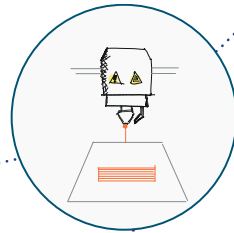
Mounstro de Spaguetti

Este error da la apariencia de un "monstruo de spaghetti". Para solucionarlo, es necesario nivelar la cama de impresión y aceitar los engranes.



Desplazamiento de múltiples capas

Se debe hacer lo mismo que en el desplazamiento de una capa, además de una nueva nivelación de la cama de impresión y cambio de extrusor.



Impresión fantasma.

Cuando la impresora hace los movimientos de los 3 ejes pero no extruye, esto generalmente se debe al motor de extrusión. Se recomienda reiniciar la impresora o cambiar el motor mencionado anteriormente.

Error Humano
Error Dimensional

Error / Solución

Retirar la boquilla

Nivelar cama de impresión

Disminuir la temperatura de la cama de impresión

Aceitar mecanismos de la impresora

Cambio de motor

Exceso de material en la boquilla

X

Impresión temblorosa

X

Pie de elefante

X

X

Desplazamiento de una capa

X

X

Desplazamiento de múltiples capas

X

X

X

X

Impresión fantasma

X

Monstro de Spaguetti

X

X

Dimensional

X

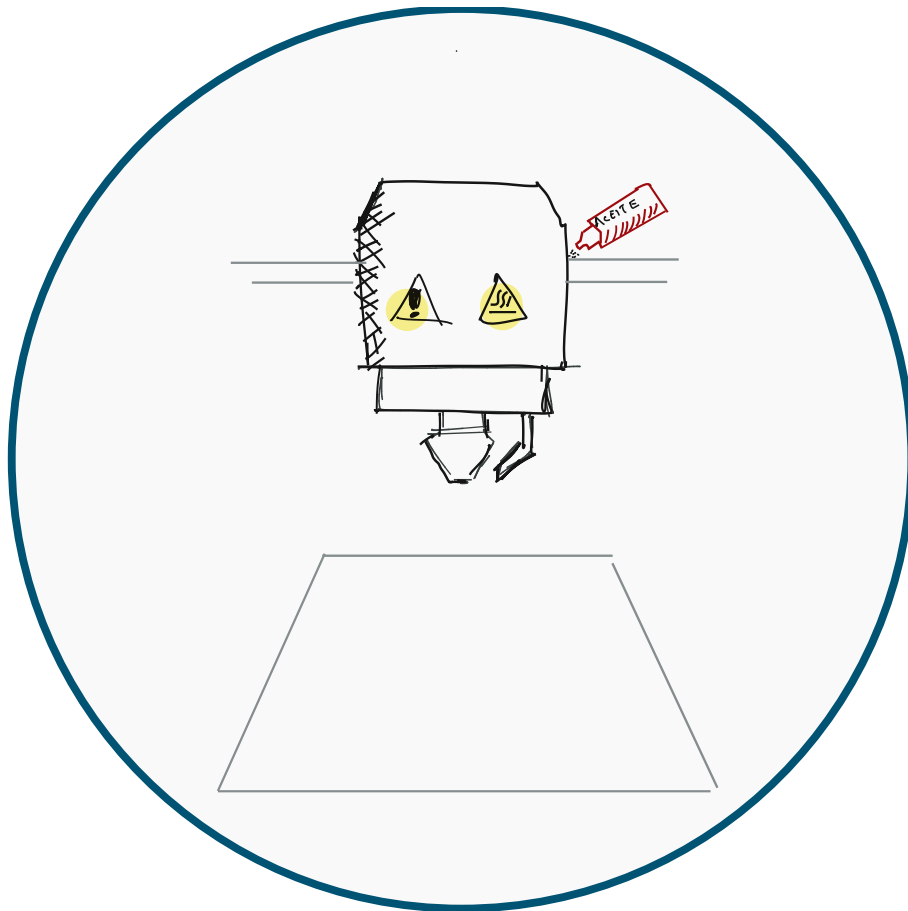
X

X

La impresión 3D se ha popularizado en los últimos años; sin embargo, los errores dimensionales generados por estas máquinas provocan que su uso se limite a manufacturas específicas.

Aunque es verdad que los errores pueden ser originados por fallas mecánicas, la realidad es que en su gran mayoría se deben a un error humano. Es por eso que el objetivo de este manual es ayudarte a seguir una serie de pasos que te ayudarán a disminuir los errores en la impresión 3D.

I- Componentes mecánicos.

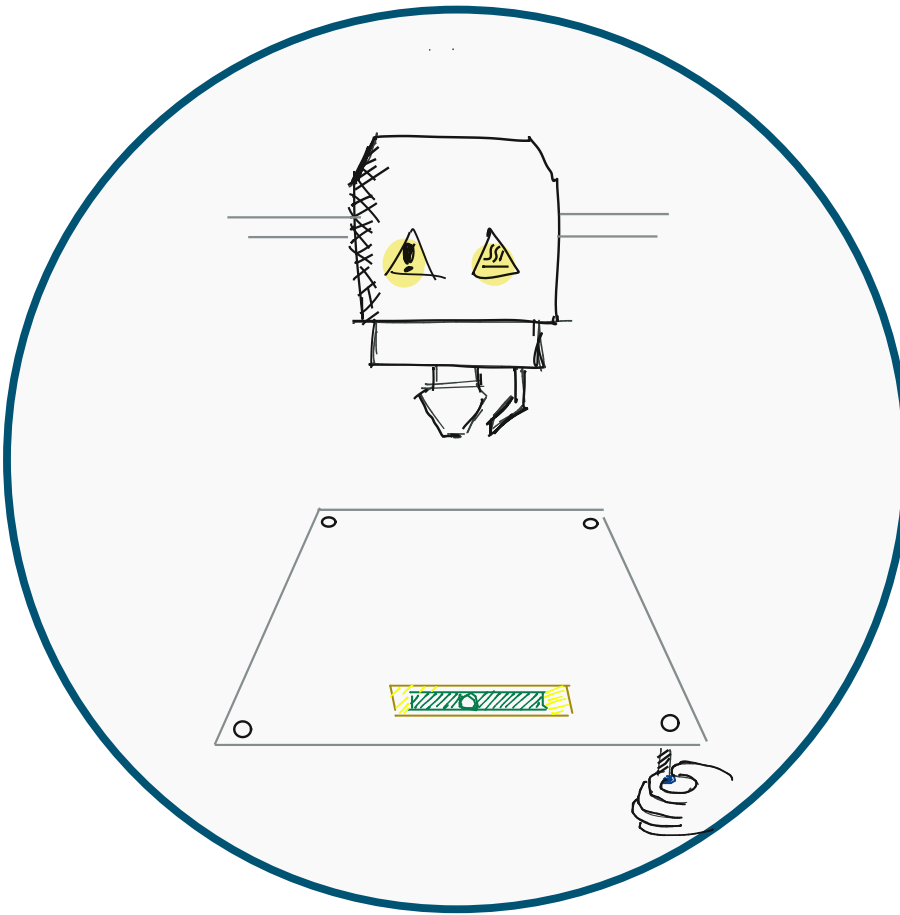


Piezas mecánicas.

Verifica que los ejes y rodamientos del mecanismo de impresión se encuentran engrasados y debidamente atornillados.

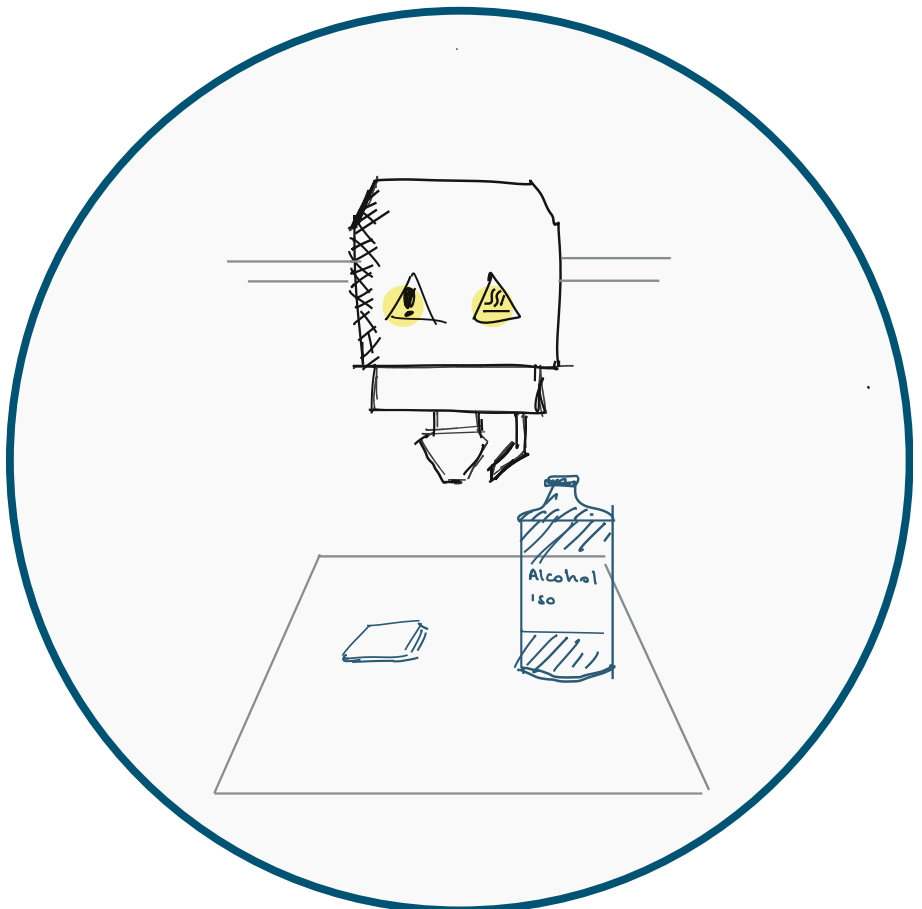
Nivelación de la cama.

La nivelación de la cama de impresión juega un papel de gran importancia, por eso, una correcta y constante nivelación es necesaria. Existen impresoras que tienen la cama de impresión en voladizo y otras que la tienen fija. En el caso de ser una cama fija, la nivelación es más sencilla y conseguirás mejores resultados. En el caso de ser una cama voladiza, es necesario no solo realizar el ajuste con los tornillos de nivelación, sino también utilizar un nivel para obtener mejores resultados.

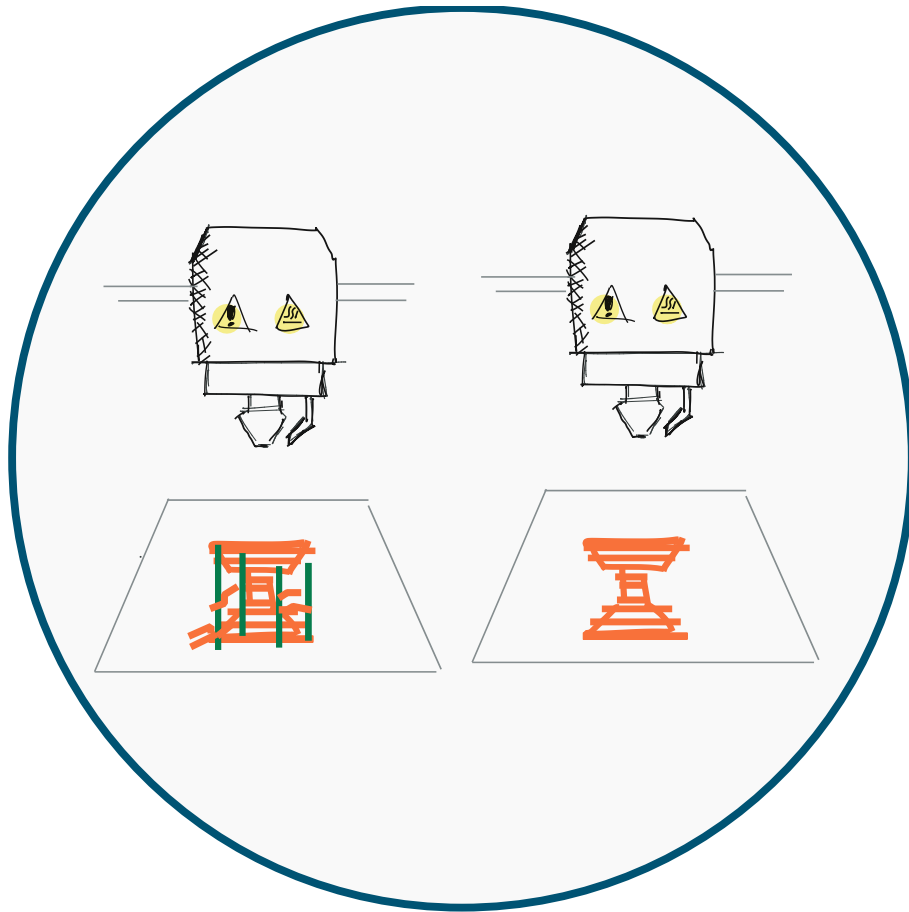


Limpieza de la cama de impresión.

Mantener la cama de impresión limpia. Se deberá limpiar con alcohol isopropílico antes y después de cada impresión, ya que al momento de quitar una pieza con las manos es posible que dejemos un poco de grasa natural y esta, con el tiempo, evite que las próximas impresiones se adhieran correctamente a la cama de impresión, maximizando el porcentaje de éxito.

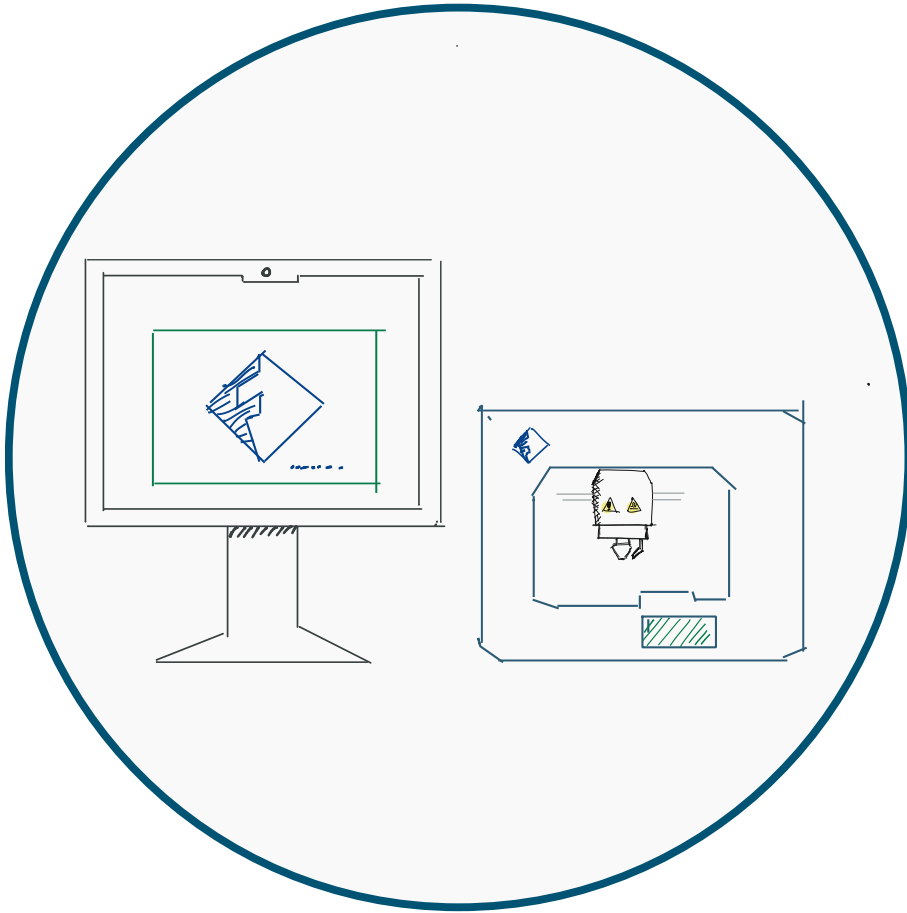


II. Uso de Software.



Uso de soportes.

Disminuye el uso de soportes. Recuerda que la manufactura aditiva es la colocación de material capa por capa. Diseñar teniendo en cuenta esto te ayudará a reducir errores de geometría difíciles de conseguir, y usar el mínimo número de soportes te ayudará a tener una impresión con mejor calidad.

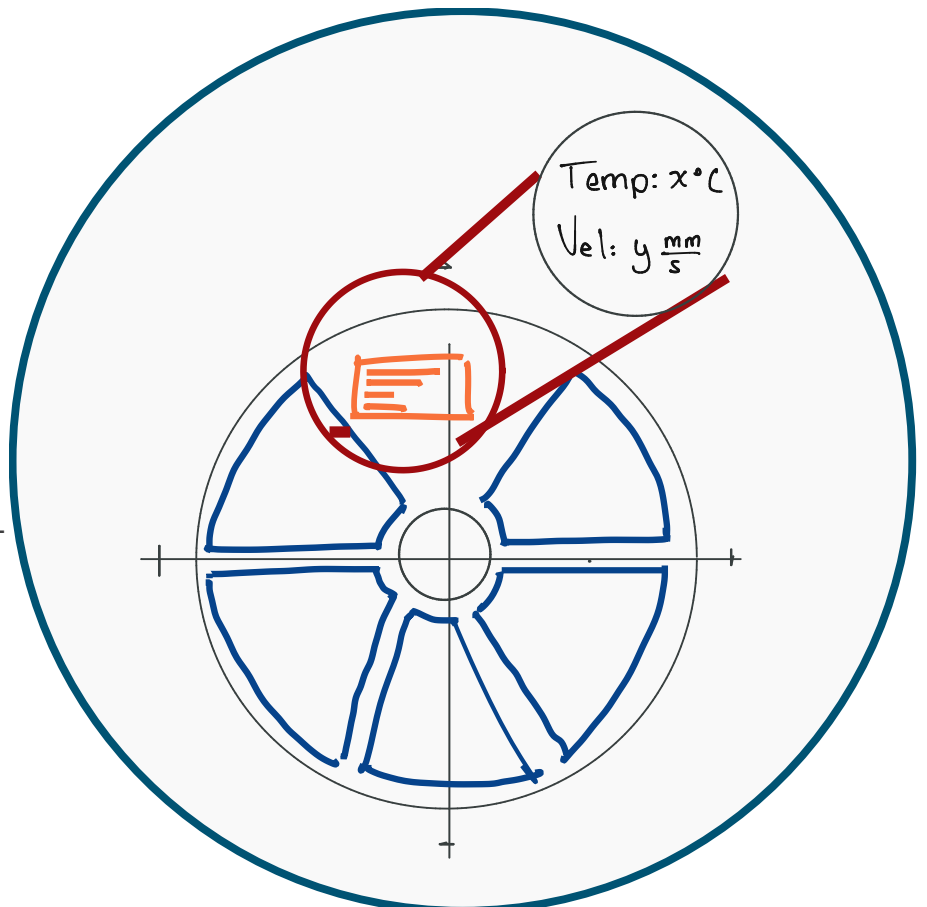


Software de impresión.

Usa el software de la compañía de tu impresora. Para conseguir mejores resultados, se recomienda utilizar el software desarrollado por la misma compañía que tu impresora. Esto garantizará que los parámetros iniciales puedan ser de gran ayuda y cercanos a los que necesitarás para una gran impresión.

Parámetros iniciales de impresión.

Utiliza los parámetros de temperatura de extrucción y temperatura de la base marcados por la marca del material que utilizarás. Regularmente, estos datos vienen en una etiqueta sobre la bobina del filamento.



Configuración de parámetros.

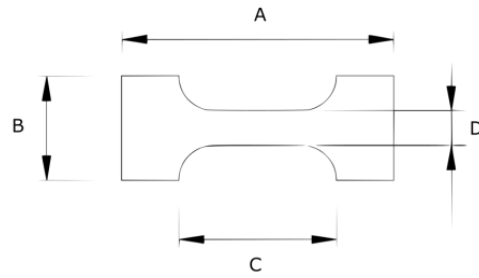
Mueve los rangos de velocidad. Generalmente, con una menor velocidad podrías conseguir una impresión de mejor calidad estética. Cambiar estos rangos te ayudará a disminuir el error. Si, en cambio, deseas disminuir el error dimensional, aumenta la velocidad en la primera capa de impresión y disminuye la temperatura de la cama de impresión.

Por último, como recomendación general, la limpieza y el mantenimiento constante de tu impresora te ayudarán a alargar su vida útil y conseguir prototipos de gran calidad.

Apéndice B

Anexos

EXPERIMENTOS 1.0



PROBETA 1

DESIGNACIÓN	MEDIDA REAL EN MM	MEIDA LADO α MM	MEDIDA LADO β MM	ERROR EN LADO α	ERRORE EN LADO β
A	38.00	38.08	38.43	0.00	0.01
B	15.00+- 0.25	15.09	15.30	0.00	0.00
C	22.00+- 0.25	21.75	21.25	-0.02	0.02
D	5.00	5.14	5.69	0.03	0.14
GROSOR	2.00	1.57	1.57	0.22	0.22

PROBETA 2

DESIGNACIÓN	MEDIDA REAL EN MM	MEIDA LADO α MM	MEDIDA LADO β MM	ERROR EN LADO α	ERRORE EN LADO β
A	38.00	38.03	38.46	0.00	0.01
B	15.00+- 0.25	15.12	15.54	0.00	0.02
C	22.00+- 0.25	21.93	21.01	0.01	0.03
D	5.00	5.05	5.59	0.01	0.12
GROSOR	2.00	1.51	1.51	0.25	0.25

PROBETA 3

DESIGNACIÓN	MEDIDA REAL EN MM	MEIDA LADO α MM	MEDIDA LADO β MM	ERROR EN LADO α	ERRORE EN LADO β
A	38.00	38.06	38.52	0.00	0.01
B	15.00+- 0.25	15.04	15.60	0.00	0.02
C	22.00+- 0.25	21.75	21.45	0.00	0.01
D	5.00	5.10	5.84	0.02	0.17
GROSOR	2.00	1.44	1.44	0.28	0.28

DESIGNACIÓN

A

Lado α	lado β
38.08	38.38
38.11	38.27
38.19	38.58
38.11	38.59
38.11	38.59

PROBETA 4

DESIGNACIÓN	MEDIDA REAL EN MM	MEIDA LADO à MM	MEDIDA LADO ß MM	ERROR EN LADO à	ERRORE EN LADO ß
A	38.00	38.07	38.70	0.00	0.02
B	15.00+- 0.25	15.17	15.53	0.00	-0.01
C	22.00+- 0.25	21.52	21.18	0.00	0.03
D	5.00	5.14	5.90	0.03	0.18
GROSOR	2.00	1.40	1.40	0.30	0.30

PROBETA 5

DESIGNACIÓN	MEDIDA REAL EN MM	MEIDA LADO à MM	MEDIDA LADO ß MM	ERROR EN LADO à	ERRORE EN LADO ß
A	38.00	38.06	38.87	0.00	0.02
B	15.00+- 0.25	15.38	15.87	0.00	0.04
C	22.00+- 0.25	21.82	21.26	0.00	0.00
D	5.00	5.10	5.95	0.02	0.19
GROSOR	2.00	1.54	1.54	0.23	0.23

PROBETA
PROM

DESIGNACIÓN	MEDIDA REAL EN MM	MEIDA LADO à MM	MEDIDA LADO ß MM	ERROR EN LADO à	ERRORE EN LADO ß
A	38.00	38.06	38.60	0.00	0.02
B	15.00+- 0.25	15.16	15.57	0.00	0.01
C	22.00+- 0.25	21.75	21.23	0.00	0.02
D	5.00	5.11	5.79	0.02	0.16
GROSOR	2.00	1.49	1.49	0.25	0.25