

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



Protocolo para el desarrollo de ensayos a tensión a probetas
de policarbonato impresas en 3D

Trabajo de graduación presentado por Natalia Lima Ramírez
para optar por el grado académico de Licenciada en
Ingeniería Mecánica.

Guatemala

2020

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



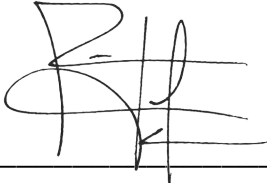
Protocolo para el desarrollo de ensayos a tensión a probetas
de policarbonato impresas en 3D

Trabajo de graduación presentado por Natalia Lima Ramírez
para optar por el grado académico de Licenciada en
Ingeniería Mecánica.

Guatemala

2020

Vo.Bo.:


(f) 

Ing. Rony José Herrarte Estévez

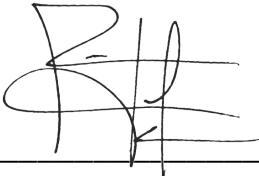
Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Víctor Hugo Ayerdi Bardales

(f) 

Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

(f) 

Ing. Rony José Herrarte Estévez

Fecha de aprobación: Guatemala, 10 de diciembre de 2020

Prefacio

La elaboración del presente trabajo surgió del interés por profundizar en un tema que actualmente está teniendo un gran auge, como lo es la impresión 3D. Esta tecnología tiene un crecimiento exponencial, siendo cada vez más versátil y abriéndose campo en muchas aplicaciones. Este gran crecimiento está permitiendo que existan muchos campos de investigación para tener un mejor conocimiento sobre el alcance que se puede tener al utilizar esa tecnología. El objetivo inicial del trabajo era caracterizar el material, realizando los debidos ensayos a tensión, pero a causa de la crisis sanitaria la ejecución de las pruebas no fue posible. Por esta razón en el presente trabajo se brinda un protocolo para que, en el futuro, las pruebas puedan ser realizadas para obtener las propiedades mecánicas de este material.

Quiero agradecer, en primer lugar, al Ing. Rony José Herrarte, profesor y asesor, por su orientación y apoyo durante todo el desarrollo del siguiente trabajo; a mis padres y hermana por el apoyo incondicional en todo momento; a la Ing. Mayarí Pérez Tay por su aporte con sus conocimientos sobre impresión 3D; a mis amigos y compañeros por el apoyo que me brindaron en los momentos difíciles que se presentaron; a la Lic. Luz María Lima por su apoyo en la redacción del informe.

Por último, agradezco al departamento de Ingeniería Mecánica de la UVG y al director de carrera, Ing. Víctor Hugo Ayerdi, por la motivación y apoyo brindado, al presentar la idea central para el desarrollo del presente proyecto.

Índice

Prefacio	v
Lista de cuadros	viii
Lista de figuras.....	ix
Resumen.....	xi
Abstract	xii
I. Introducción.....	1
II. Antecedentes	2
III. Justificación	5
IV. Objetivos	6
V. Marco teórico.....	7
A. Manufactura aditiva	7
B. Parámetros de impresión.....	7
C. Materiales de impresión 3D.....	8
D. Policarbonato	9
E. Efectos en las propiedades mecánicas del material por la temperatura.	11
F. Estándar para ensayos a tensión.....	11
G. ANSYS	12
H. Anisotropía.....	13
VI. Metodología	14
VII. Resultados	23
VIII. Análisis de resultados.....	25
IX. Conclusiones	27
X. Recomendaciones	28
XI. Bibliografía	29
XII. Anexos	32
A. Probeta.	32

B. Protocolo para impresión de probetas.....	33
C. Protocolo para ensayos a tensión.	41
D. Hoja de cálculo.	46
E. Protocolo para simulación de ensayos a tensión.....	52

Lista de cuadros

Cuadro 1 Propiedades policarbonato	10
Cuadro 2 Parámetros de impresión	23
Cuadro 3 Valores por controlar en ensayos a tensión.....	24
Cuadro 4 Tabla de propiedades en hoja de cálculo.....	24
Cuadro 5 Dimensiones probeta Tipo I.....	32
Cuadro 6 Combinaciones parámetros	34
Cuadro 7 Designación de la velocidad de prueba	43
Cuadro 8 Datos a ingresar Hoja de cálculo.....	47
Cuadro 9 Relación de Poisson para distintas orientaciones de impresión	56
Cuadro 10 Datos que serán analizados para cada sistema	63

Lista de figuras

Figura 1 Geometría con dimensiones de probeta.....	32
Figura 2 Orientación de probetas	33
Figura 3 Ícono para abrir archivos	35
Figura 4 Posición de impresión.....	36
Figura 5 Ubicación de la probeta en la cama	36
Figura 6 Selección de material.....	36
Figura 7 Selección extrusora.....	37
Figura 8 Print Settings	37
Figura 9 Relleno.....	38
Figura 10 Operación Slice.....	38
Figura 11 Almacenar archivo.....	39
Figura 12 Configuración en impresora 3D	39
Figura 13 Remover pieza del vidrio de impresión.....	40
Figura 14 Longitud de prueba de la probeta	42
Figura 15 Pantalla Tracker.....	45
Figura 16 Interpretación código.....	46
Figura 17 Botones Hoja de cálculo	47
Figura 18 Medidas necesarias para cálculos	48
Figura 19 Diagrama Esfuerzo - Deformación (LDPE).....	48
Figura 20 Diagrama Esfuerzo - Deformación (PP).....	49
Figura 21 Demostración para encontrar la resistencia a la fluencia	49
Figura 22 Búsqueda del esfuerzo de fluencia en los datos de las tablas.....	50
Figura 23 Parte de la tabla para almacenar datos de cada ensayo.....	50
Figura 24 Tabla de Strength Ratio	51
Figura 25 Selección de sistema de análisis	53
Figura 26 Enlace de material y geometría entre sistemas.....	53
Figura 27 Opción para crear material	54
Figura 28 Configuración de material en ANSYS	55
Figura 29 Asignación de material a la probeta	57
Figura 30 Tabla de detalle del mallado.....	58
Figura 31 Tabla con detalles sobre el sizing.....	59
Figura 32 Tabla de detalles del método de mallado.....	59
Figura 33 Tabla de detalles Analysis Settings.	60
Figura 34 Geometría en la que se aplicará el soporte y la fuerza	60
Figura 35 Tabla de detalles de la fuerza aplicada	61
Figura 36 Barra de selección.....	61
Figura 37 Selección de nodos en probeta.....	62

Figura 38 Tabla de detalles de fuerza nodal62
Figura 39 Tabla de detalles de Analysis Settings63

Resumen

La impresión 3D tiene un desarrollo exponencial, dejando atrás la investigación, impidiendo que avancen al mismo paso. Esta tecnología está al alcance de cualquiera, pero usualmente el usuario no tiene la suficiente información sobre lo que se puede lograr con la misma. Dentro de la gama de materiales que se pueden utilizar, se encuentra el policarbonato. Este material sin alteraciones tiene muy buenas propiedades mecánicas. La investigación que se presenta a continuación tiene como objetivo diseñar un protocolo para obtener la resistencia a la tensión de probetas impresas en policarbonato. El protocolo será utilizado para analizar cómo cambia el comportamiento de las probetas con distintas condiciones de impresión. Mediante esta investigación será definida la geometría adecuada de la probeta para los ensayos a tensión, el número de pruebas necesarias para definir una propiedad y los parámetros de impresión que serán analizados. Además de una hoja de cálculo mediante la cual será posible obtener los resultados de los ensayos a tensión, al ingresar los datos obtenidos en las pruebas. Se llevará a cabo también un procedimiento que detalle los pasos a seguir al imprimir las probetas, realizar los ensayos, analizar los resultados y simular mediante ANSYS. Al seguir el protocolo será posible que otro investigador realice los ensayos sin tener que estudiar la configuración adecuada y poder enfocarse en analizar los resultados.

Abstract

3D printing is having an exponential development, leaving behind research, hindering it to advance at the same pace. This technology is available for everyone, but usually the user lacks information to know what it can be done through it. Within the range of materials that can be utilized, polycarbonate is one. This material, without alterations, has good mechanical properties. The purpose of the following research is to design a protocol to obtain resistance of the tension of test-tubes printed in polycarbonate. The protocol will be used to analyze how the test-tube behavior changes with different printing conditions. Through this research, the appropriate geometry will be defined for the test-tube used in the tension test, the number of necessary tests to define a property, and the printing parameters that will be analyzed. In addition to this, the user will be given a spreadsheet where it will be possible to obtain results from the tension tests by entering data obtained in the tests. A procedure will be carried out to detail the steps to follow when printing test-tubes, performing tests, analyzing results, and simulating through ANSYS. When following the protocol, it will be possible for another researcher to perform tests without having to study the adequate setting and be able to focus on analyzing results.

I. Introducción

En este trabajo se propuso un protocolo para el desarrollo de ensayos a tensión a probetas de policarbonato impresas en 3D, como medida para reducir la brecha entre la avanzada tecnología que existe actualmente y la falta información disponible para este método de manufactura.

El protocolo incluye la definición de la probeta que será empleada en las distintas pruebas, los parámetros de impresión que serán estudiados en los ensayos, un protocolo con el procedimiento a seguir, tanto para la impresión de las probetas como para el desarrollo de los ensayos a tensión, una hoja de cálculo con la cual será posible obtener las propiedades con los resultados de los ensayos a tensión y un protocolo para el desarrollo de la simulación de los ensayos a tensión.

Para poder realizar este protocolo, se hizo una investigación preliminar de diferentes estudios con caracterización de materiales de impresión 3D. Con esta información se procedió a definir los factores más importantes para el desarrollo de los ensayos a tensión. El siguiente paso fue el diseño de los protocolos, unificando la información importante para el desarrollo de cada uno de los puntos necesarios para alcanzar la caracterización de los materiales. Por último, se desarrolló la hoja de cálculo mediante el software Excel, en la que se introdujeron los respectivos cálculos para la obtención de las propiedades mecánicas.

Un protocolo para la elaboración de ensayos a tensión fue desarrollado, en el cual se tomaron en consideración las variantes existentes que se tenían al manufacturar las probetas mediante el modelado por deposición fundida. Los distintos protocolos tienen la información más importante para el desarrollo de los ensayos, con todo el procedimiento establecido para facilitar el procedimiento práctico de la investigación.

II. Antecedentes

Actualmente existen varias investigaciones en las cuales se analiza propiedades mecánicas de probetas impresas en 3D con distintos materiales, realizando modificaciones a algunos parámetros de impresión. Una de las investigaciones presenta una comparación en la resistencia a la tensión entre ABS y PLA, los cuales son los materiales de impresión más comunes. En las pruebas se realizan cambios a ciertos parámetros de impresión, los cuales son porcentaje de relleno, altura de capa y orientación de la capa. El equipo de manufactura aditiva utilizado fue una impresora Prusa I3. Para las pruebas a tensión siguieron los estándares ISO y ASTM para polímeros ya que no se cuenta con un estándar para manufactura aditiva que especifique estos detalles y la máquina utilizada fue una HOYTOM HM-D 100kN. Al final de la investigación los resultados demostraron que, de manera general, las piezas de PLA se comportan más rígidas que las de ABS. Las piezas de ABS no mostraron un cambio significativo, en la resistencia a la tensión, al variar la altura de capa y la orientación. Sin embargo, se mostró un aumento de resistencia al aumentar el porcentaje de relleno. Las piezas de PLA se comportaron de manera similar, pero presenta mejores resultados al aumentar la altura de capa. (Alvarez, Lagos, & Aizpun, 2016)

Otra de las investigaciones relacionadas con el tema de interés presenta la metodología y los resultados de la caracterización mecánica de piezas impresas en 3D con ABS y policarbonato, para demostrar la presencia de anisotropía. Se realizaron modificaciones a la trama y orientación, en la impresión de las probetas, para determinar las propiedades direccionales del material. Las probetas se hicieron siguiendo la normativa ASTM. Las probetas fueron realizadas en una impresora Fortus 360mc y una Ultimaker 2, brindando una diferente altura de capa cada una de las impresoras. Las pruebas a las que se sometieron las probetas fueron ensayos a tensión y corte, utilizando una Test Resource 315. Los resultados demostraron que la orientación y la trama no provocaron ningún cambio en el módulo de Young ni en la relación de Poisson en las pruebas a tensión del ABS. Para el policarbonato tanto en los ensayos a tensión con las modificaciones a la orientación de la trama se encontraron variaciones del 20% en los valores obtenidos. Por lo que el policarbonato si demostró un comportamiento anisótropo. (Cantrell, y otros, 2017)

Existe una gran variedad de materiales que se pueden utilizar para impresión 3D, incluyendo modificaciones a un material para reforzarlo o alterar sus propiedades. Un artículo científico presentó un estudio del comportamiento de probetas de ABS y ABS plus con diferentes parámetros de construcción y siguiendo la norma ISO 527. Una de las configuraciones fue la posición de la probeta en la cama de impresión, horizontal vertical y a 45°, con la intención de analizar la anisotropía en las piezas. Además de esto también se hicieron modificaciones a la altura de las capas de impresión. Los resultados obtenidos fueron comparados con la resistencia nominal que presenta el filamento. Se determinó que la dirección de construcción es un parámetro crítico para la obtención de propiedades. La resistencia que presentan las probetas impresas, en ambos materiales, es menor que la nominal del filamento. El ABS se mantuvo más cerca de este valor nominal, mientras que el ABS plus si tuvo una desviación mucho más grande. Por último, el ABS plus tiene 15%

más resistencia que el ABS, según el estudio realizado. (Vidakis, Vairis, Petousis, Savvakis, & Kechagias, 2016)

La tecnología FDM es una herramienta versátil, ya que permite realizar configuraciones a la impresión para obtener diferentes resultados. Al optimizar estos parámetros es posible obtener una pieza que cumpla con los requerimientos que se desean y a la vez tener un menor consumo de material e invertir menor tiempo en la impresión. Un estudio utilizó filamento de acero inoxidable 17-4PH, el cual está formado por múltiples componentes y partículas de relleno para hacer posible el funcionamiento del mismo. Fueron evaluados tres factores; la temperatura de extrusión, el grosor de la capa y el multiplicador de tasa de flujo. Luego de un extenso análisis, pudieron observar que cuando se aumentaban los valores de estos parámetros, la resistencia a la tensión también aumentaba. El que tuvo una mayor influencia en la resistencia fue el multiplicador, ya que al hacer pasar más material a través de la boquilla se obtenían probetas más compactas. Otro punto importante fue la altura de capa, ya que esta unión que existe entre las diferentes capas debilita el material, por lo que entre menos capas existan, mayor altura de capa, la probeta será más resistente. Por último, al tener bajas temperaturas provocaba que se generaran burbujas de aire, ya que el material no se deposita de manera correcta. Por lo que al maximizar las tres propiedades era posible obtener resistencias más altas. (Godec, Cano, Holzer, & Gonzalez-Gutierrez, 2020)

Los materiales que más se utilizan en impresión 3D son PLA y ABS, y es por eso por lo que a estos materiales se les realiza una gran cantidad de análisis. Un artículo científico, presentado en la revista *Materials*, llevó a cabo un estudio para poder analizar la influencia que tiene la altura de capa, el porcentaje de relleno y la orientación de la capa en ABS y PLA. Se hicieron ensayos a tensión, alternando dos alturas de capa, dos porcentajes de relleno y tres orientaciones, para cada uno de los materiales. La influencia de los parámetros fue muy similar en ambos materiales. Las piezas que fueron manufacturadas con PLA mostraron un comportamiento más rígido que ABS, mientras que el ABS mostró un alto nivel de ductilidad. Las probetas impresas en ABS mostraron poca sensibilidad ante la altura de capa, sin embargo, al aumentar el porcentaje de relleno, la resistencia a la tensión aumento también. Para el PLA, al momento en que se incrementó la altura de la capa, la resistencia a la tensión disminuyó y al igual que con ABS incrementar el porcentaje de relleno también incrementa la resistencia a la tensión. Por último, la orientación en la que las capas tienen una dirección paralela al esfuerzo presenta una disminución en la resistencia a la tensión. El factor que presentó una mayor sensibilidad en las propiedades de las probetas fue el porcentaje de relleno. Por lo que pudieron concluir que los parámetros de impresión tienen una alta influencia en los resultados. (Rodríguez-Panes, Claver, & Camacho, The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis, 2018)

Las simulaciones actualmente permiten replicar un fenómeno físico y lo representan con modelos matemáticos, de esta manera es posible predecir el comportamiento que presentará este fenómeno en un ambiente determinado. Se realizó una investigación, en la cual se compararon los resultados obtenidos mediante una simulación y los resultados

experimentales de un ensayo a tensión. Para la simulación se utilizó el software ANSYS. El análisis se hizo con el sistema *Explicit Dynamics*, en el cual las condiciones iniciales fueron un desplazamiento de uno de los lados de la probeta y soporte en el otro lado de la probeta. Para el mallado se aplicó el método *sweep* y un *sizing* de 1 mm. Las probetas fueron hechas utilizando ABS como material. En la parte elástica del material el comportamiento en la simulación mostro casi las mismas características que en la simulación. En la parte plástica, la desviación estándar máxima, entre los resultados de la simulación y de la experimentación es de 10%. Por lo que en conclusión si existe una correlación entre la simulación y el fenómeno físico. (Schmailzl, Amann, Glockner, & Fadanelli, 2012)

Una simulación de un ensayo a tensión mediante el método de elementos finitos fue realizada en un artículo, con el fin de verificar si existía correlación entre los resultados experimentales y los que brindaba el artículo. Para iniciar se realizaron ensayos a tensión a probetas de acero, utilizando como guía la normativa ASTM. Luego, utilizando como software de simulación ANSYS, se simuló el ensayo a tensión en un sistema *Static Structural*. El análisis se realizó en la zona elástica, por su comportamiento lineal y de esta manera tener una mayor facilidad para comparar ambos métodos. En este estudio no se tuvieron consideraciones con el mallado, por lo que este se simulo con el que el programa brinda por default. Los resultados en la simulación fueron satisfactorios, ya que la diferencia entre los valores experimentales y los de la simulación fue mínima. Al final recomiendan realizar un mallado más fino, para que de esta manera sea posible tener menos error en los resultados. (Baltar & Carvalho, 2016)

Una tesis doctoral realizada en Valencia realizó un estudio del modelado y verificación experimental del comportamiento a tracción de probetas termoplásticas. En la investigación se realiza una simulación de las pruebas a tracción en un software llamado Moldflow y ANSYS. En el análisis en ANSYS utilizan el módulo de *Explicit dynamics* ya que en esta simulación es posible analizar la rotura de la probeta. Ya que anteriormente se realizaron pruebas en las probetas, la información obtenida en estas pruebas es ingresada en la información del material que solicita el programa. Para la configuración de la geometría, la probeta es insertada en ANSYS como un sólido y no se considera el patrón de relleno de la misma, en esta parte es necesario asignarle el material a la probeta. En el mallado simplemente se generó la malla ya que el diseño de la pieza es simple y se verifico mediante el método “*skewness*” que el valor máximo estuviera por debajo de 0.95. Para las condiciones del entorno, ya que uno de los lados de la probeta no tiene movimiento se le asignó un soporte fijo. Para el otro lado de la probeta se le asignó una carga que fuera aumentando, ha este aumento se le asignó cierta velocidad. Antes de iniciar la simulación, se agregaron los resultados que se necesitaban de la prueba, los cuales fueron tensión normal, deformación unitaria y deformación en el eje x. Por último se le dio inicio a la simulación y el programa brindó los resultados obtenidos. Al final se concluyó que existía concordancia entre la probeta analizada experimentalmente y analizada mediante ANSYS. (Martínez, 2015)

III. Justificación

Dada la naturaleza emergente de algunas de las tecnologías de la manufactura aditiva y su rápido desarrollo, la literatura disponible en esta área no es muy extensa (Alvarez, Lagos, & Aizpun, 2016). Actualmente la impresión 3D está teniendo un crecimiento exponencial pero la investigación está yendo a un paso más lento. La información técnica que se encuentra sobre todo lo relacionado con impresión 3D no es suficiente para la innovación que hay día con día.

Actualmente, por la falta de información, muchas veces no está claro el alcance que tiene esta tecnología. Los usuarios tienen la posibilidad de seguir creando piezas impresas en 3D, sin conocer la capacidad mecánica que tienen. Además, no es posible realizar simulaciones en las piezas por la falta de propiedades, como lo son el esfuerzo permisible y módulo de Young. Con este proyecto se tendrá la posibilidad de obtener las propiedades mecánicas del policarbonato impreso. Aportando información que sea útil para todos los usuarios que están trabajando con este tema y de ese modo tratar de disminuir la brecha que existe entre el avance tecnológico y la investigación.

Al finalizar la investigación se obtendrá un compendio con toda la información que se requiera para realizar los ensayos a tensión. Esta información contendrá un protocolo con el procedimiento completo a seguir, empezando por la impresión de las probetas hasta el análisis de los resultados. También se presentará una hoja de cálculo para la obtención de las propiedades que asegurará que durante los ensayos se registren los valores necesarios para obtener la resistencia a la tensión del policarbonato impreso.

IV. Objetivos

A. Objetivo general

Elaborar un protocolo para establecer la resistencia a la tensión de una probeta de policarbonato impresa en 3D con diferentes condiciones de impresión.

B. Objetivos específicos

- Determinar la geometría y las dimensiones de la probeta impresa en 3D para ensayos a tensión.
- Especificar los parámetros de impresión para pruebas a diferentes condiciones de impresión.
- Determinar el número de pruebas necesarias para caracterizar la resistencia a la tensión de las probetas.
- Desarrollar un protocolo para el procedimiento de impresión de probetas y de ensayos a tensión.
- Diseñar una hoja de cálculo para la obtención de las propiedades mecánicas de los ensayos a tensión.
- Desarrollar un instructivo para la utilización de la hoja de cálculo.
- Realizar un protocolo para llevar a cabo la simulación de los ensayos a tensión mediante ANSYS.

V. Marco teórico

A. Manufactura aditiva

En cada una de las investigaciones presentadas anteriormente se utilizó como técnica de manufactura modelado por deposición fundida, será también utilizada para la presente investigación. Esta tecnología fue desarrollada por Stratasys. Y para su funcionamiento se requieren tres elementos principales; una placa de impresión la cual es la base para la pieza, una bobina de filamento el cual es el material de impresión y una cabeza de extrusión. La técnica se basa en que el extrusor se mantiene a una temperatura controlada, la cual es la suficiente para fundir el filamento que está siendo succionado, y depositar sobre la base el material en capas formando el diseño ingresado a la máquina. (Materialise, 2017)

Una de las ventajas que brinda esta técnica de manufactura aditiva es facilidad de uso, la limpieza en el área de trabajo y que puede ser utilizada en cualquier área de trabajo. Los termoplásticos que pueden ser utilizados son estables mecánicamente. Las geometrías complicadas que podrían brindar problemas en otras técnicas son realizadas fácilmente. Los materiales, estandarizados, brindan propiedades mecánicas estables y duraderas a lo largo del tiempo. Además, es una técnica muy versátil, ya que con solo cambiar la boquilla de la cabeza extrusora es posible obtener mejores resoluciones. Pero todas estas ventajas están relacionadas con el tipo de impresora que se utilice para aplicar la técnica, por lo que seleccionar la maquinaria es un punto importante. (Stratasys, 2018)

B. Parámetros de impresión

Los parámetros de impresión son modificaciones que se le realizan a los diseños para poder tener mejores resultados en las piezas impresas, además tienen una relación directa con el tiempo de impresión. La mayoría de los modelos impresos por medio de la técnica FDM no son sólidos. Cuando se desea que sean sólido por lo general se necesitan grandes cantidades de material lo que provoca altos costos. Para poder optimizar el proceso de impresión por lo general los modelos son impresos con revestimientos sólidos y el interior es llenado con patrones de relleno. Estos dos parámetros presentan un papel importante en la impresión 3D, pero existen muchos más que se adecuan según la necesidad de cada uno de los diseños y que permiten que los resultados obtenidos al final sean los esperados. (Cain, 2016)

Un parámetro que influye en el resultado de la pieza es el porcentaje de relleno, el cual será analizado en esta investigación. El relleno de la pieza es la estructura interna de la pieza impresa. Al tener mayor relleno en la pieza se necesitará mayor tiempo de impresión y se tendrá un mayor costo por el material utilizado. La resistencia del diseño está relacionada directamente con el porcentaje de relleno, lo cual es muy importante para la investigación. En la mayoría de aplicaciones se utiliza 20% de relleno, ya que por lo general son prototipos, así de esta manera es posible ahorrar dinero y tiempo. En esta investigación

se realizarán pruebas con 20%, 50% y 100% para poder establecer si al aumentar el porcentaje de relleno se tendrán mayores beneficios. (Cain, 2016)

Otro de los parámetros de impresión que tiene un efecto directo en la estructura de la pieza es el patrón de relleno. El patrón de relleno sustituye el relleno sólido de las partes, por geometrías que permiten mayor eficiencia con respecto al material. Estos patrones son generados por un algoritmo, el cual es utilizado para generar el código que se ingresa a la impresora. En la actualidad se han implementado una gran cantidad de patrones de relleno que brindan distintas estructuras a las piezas. Los patrones de relleno más comunes son rectangular, triangular, honeycomb y wiggle. El patrón rectangular es estándar para impresiones con FDM, tiene resistencia en todas direcciones y la impresión es relativamente rápida. El patrón triangular es utilizado cuando se desea resistencia en la dirección de las paredes. Honeycomb brinda fuerza a las piezas, resistencia en todas las direcciones y es muy fuerte. (Cain, 2016)

En la universidad de California, Berkeley se analizó el comportamiento de probetas impresas en 3D mediante ensayos a tensión. A estas probetas se le realizaron modificaciones con respecto al porcentaje de relleno y al patrón de relleno. En total hicieron 13 pruebas con las modificaciones mencionadas anteriormente. Los patrones de relleno analizados está el rectangular, hexagonal y sólido. Luego de realizar las pruebas se encontró que el patrón hexagonal brinda un esfuerzo último de tensión mayor que el rectangular. Además, el patrón hexagonal mostró mayor fuerza y más rigidez. Las pruebas realizadas en este análisis fueron utilizando PLA como material, por lo que observar el comportamiento del patrón hexagonal en policarbonato es de alto interés. (Farbman & McCoy, 2016)

Recientemente CURA incluyó el patrón Gyroid, el cual brinda un relleno más resistente por un menor peso. Este patrón está dentro de la clasificación para modelos 3D funcionales. Este patrón brinda la impresión de ondas en la estructura del modelo. Al seleccionarlo es posible generarle esfuerzos a la pieza, sin que esta se vea afectada. Se consideró este patrón dentro de la investigación por haber sido integrado recientemente, lo que provoca que no la información presente sea mínima. Además, tiene una estructura que podría brindarle altos beneficios a la pieza. (Goldschmidt, 2020)

C. Materiales de impresión 3D

Otro factor que es posible alterar al realizar impresiones en 3D es el material con el que se van a realizar. En la actualidad hay una amplia variedad de materiales para los filamentos. Para tener un mejor resultado en las impresiones y optimizar el proceso de impresión es importante utilizar el material de la misma marca que la impresora. Para esta investigación, ya que las impresoras utilizadas son Ultimaker, el material utilizado será de la misma casa. Ultimaker con la selección más amplia del mercado. Los materiales que se pueden adquirir son PLA, nylon, PVA, poliéster, ABS, fibra de carbón, polipropileno, PVDF, elastómero, policarbonato, entre otros. Además, brinda estos materiales con ciertas

alteraciones físicas para brindarle otras características o para mejorar sus propiedades. (Ultimaker, 2020)

Una investigación sobre el esfuerzo a tensión de probetas impresas en 3D, fue realizado por la Universidad Tecnológica de Michigan. En esta se analizaba el comportamiento de las probetas al utilizar diferentes materiales para filamentos comerciales. Los ensayos fueron realizados siguiendo el estándar ASTM D638. Se realizaron pruebas a ABS, policarbonato, nylon, T-Glase, poliestireno y materiales con propiedades para una mejor flexibilidad. En el estudio se demostró que el esfuerzo a tensión tiene una fuerte dependencia en la masa de la probeta, sin importar el material. El material que brindó una mayor resistencia a la tensión fue el policarbonato con un esfuerzo máximo promedio de 49 MPa. Por lo que el policarbonato se puede considerar como uno de los materiales que soporta esfuerzos a tensión mayores. (Tanikella, Wittbrodt & Pearce, 2017)

D. Policarbonato

El policarbonato es un termoplástico transparente, con alta resistencia al impacto y fuerte. La dureza de este material, junto con la claridad óptica permite que este material pueda ser utilizado en múltiples aplicaciones. En la actualidad el policarbonato se utiliza para protección de seguridad en máquinas, señalización interior y exterior, cristales arquitectónicos, máscaras de protección, tragaluces y mostradores de productos en los supermercados. Por la facilidad que brindan las placas y barras de policarbonato para ser maquinadas, también se utiliza en aplicaciones eléctricas, partes semiconductoras de máquinas, colectores de gases de escape y lentes de protección. (Laminatede Plastics, 2017)

Las características que lo definen son la claridad óptica, fuerza, rigidez, alta resistencia, fabricación sencilla, los solventes se adhieren con facilidad, cierto grado de resistencia UV, puede reemplazar el acrílico en aplicaciones de alto impacto y tienen resistencia a la abrasión. Según pruebas realizadas por Laminated Plastics con el estándar D-638, tiene una resistencia a la tensión de 10000 psi. Además de tener un porcentaje de elongación del 60%. Estos datos brindados junto con otra información técnica se encuentran en la siguiente tabla. (Laminated Plastics, 2017)

Cuadro 1 Propiedades policarbonato

Prueba ASTM o UL	Propiedad	Parámetro
Físicas		
D792	Densidad (lb/in ³)	0.043
	Densidad (g/cm ³)	1.2
D570	Absorción de agua, 24 hrs (%)	0.12
Mecánicas		
D638	Resistencia a la tensión (psi)	9,500
D638	Módulo de tracción (psi)	320,000
D638	Alargamiento a la rotura por tracción (%)	60
D790	Resistencia a la flexión (psi)	15,000
D790	Módulo de flexión (psi)	375,000
D695	Resistencia a la compresión (psi)	12,000
D785	Dureza, Rockwell	M70/R118
D256	Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (ft·lb/in)	13
Térmicas		
D696	Coefficiente de expansión térmica lineal (x 10 ⁻⁵ in./in./°F)	3.9
D648	Temperatura de deflexión por calor (°F/°C) a 264 psi.	270/132
D3418	Temperatura de transición vítrea (°F/°C)	293/145
-	Temperatura máxima de operación (°F/°C)	250/121
C177	Conductividad térmica (Btu-in/ft ² -hr-°F)	1.3
	(x 10 ⁴ cal/cm-sec-°C)	69
UL94	Índice de inflamabilidad con un grosor menor a 11.5 mm	H-B
Eléctricas		
D149	Resistencia dieléctrica (V/mil), grosor 1/8"	390
D150	Constante dieléctrica a 60 Hz	3.17
D150	Factor de disipación a 60 Hz	0.0009
D257	Resistividad de volumen(ohm-cm) a 50% RH	10 ¹⁶

Fuente: Laminated Plastics, 2017, Technical Data Sheet Polycarbonate (PC)

El comportamiento del filamento del policarbonato cambia de cierta manera ya que este pasa por un procedimiento distinto, como lo es la impresión 3D. El policarbonato que ofrece Ultimaker brinda propiedades de resistencia, solidez y mantiene su forma en entornos de alta temperatura (110°C). Con estas propiedades la impresión 3D con policarbonato puede ser utilizados en aplicaciones como prototipos funcionales, fabricación de herramientas, moldes, moldeado industrial y piezas de uso final. Ultimaker ha realizado pruebas a probetas impresas en 3D siguiendo el método de ensayo ISO 527. Dentro de los parámetros encontrados está el módulo de elasticidad a la tracción con un valor de 2134 MPa, un esfuerzo de tracción a la rotura de 76.4 MPa y alargamiento a la rotura de 6.4%. (Ultimaker, 2020)

E. Efectos en las propiedades mecánicas del material por la temperatura.

Para que las impresoras puedan imprimir el material seleccionado y lograr el modelo deseado es necesario calentar el material en una boquilla hasta que este llegue a su punto de función y de esta manera realizar la nueva estructura. Un estudio realizado en la Universidad Islámica Azad analizó los efectos que provoca, en las propiedades físicas y mecánicas del PLA, la alta temperatura de la boquilla. Para ello se imprimieron probetas siguiendo el estándar ISO 527 y luego realizaron pruebas a tensión para verificar la diferencia entre probetas impresas e inyectadas. En las pruebas se varió la temperatura de las boquillas, entre 180°C y 240°C. Cada vez que se aumentaba la temperatura la resistencia a la rotura aumentaba, pero ni con 240°C alcanzó la resistencia de probetas de policarbonato inyectado. La conclusión a la que llegaron fue que las propiedades del modelo final impreso en 3D, tienen una alta dependencia de la temperatura de la boquilla de impresión, pero no puede alcanzar las propiedades de ejemplares inyectados. (Behzadnasab & Yousefi, 2016)

Una universidad del estado de Nueva York realizó una investigación sobre el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas del polipropileno. En esta investigación se imprimieron probetas en una Ultimaker. Para las impresiones la temperatura de la boquilla se varió entre 215 °C, 230 °C y 240 °C. A las probetas se les realizaron análisis dinámicos, espectroscopia Raman para analizar frecuencias, análisis térmicos, análisis microscópico y un análisis reológico. Las probetas se diseñaron siguiendo el estándar ASTM D630. En esta investigación presentan una ecuación que relaciona la velocidad de difusión con la temperatura del husillo, en la que al tener una temperatura alta se obtendría una velocidad de difusión mayor y así poder mejorar las propiedades mecánicas. El estudio sugiere que las propiedades mecánicas del polipropileno mejoran cuando la temperatura del husillo es mayor. (Vo, Ajibade, Rosengren, Pena, & Moran, 2019)

F. Estándar para ensayos a tensión

Para la manufactura aditiva existe una gran cantidad de procesos, materiales y productos. Actualmente la ASTM (American Society for testing and Materials) está trabajando en la formulación de un estándar y por el momento solo se tiene la definición de la gama de procesos de fabricación aditiva en 7 categorías (ASTM F42). Otros de los estándares existentes son ISO 17296 en el cual se incluyen términos y definiciones, visión general de categorías de procesos y de materias primas y características principales y métodos de ensayo correspondientes. Y para el futuro ya se tienen programados una gran cantidad de estándares. (ASTM, 2017)

La UNED (Universidad Nacional de Educación a Distancia) realizó un estudio sobre el análisis normativo y evaluación geométrica de probetas para la caracterización mecánica de piezas obtenidas por fabricación aditiva mediante FDM. En esta investigación mencionan que la literatura disponible en este campo no es muy extensa ya que es una tecnología que tiene un rápido desarrollo y naciente. Por esta razón la normativa existente

actualmente remite a estándares sobre ensayos de materiales de plástico, los cuales no consideran las características de la fabricación aditiva. En la norma ISO 16296-3 para ensayos a tracción remite a la UNE ISO 527-2 en la que se establecen las condiciones para la determinación de las propiedades plásticas. La norma ASTM-D638 define varios tipos de probetas de ensayo para plásticos rígidos y semirrígidos para distintos espesores. Al final de la investigación se llega a la conclusión que la falta de normativas es un problema en la actualidad ya que es difícil establecer comparaciones válidas para la predicción de las propiedades mecánicas de piezas. Y establece que es posible utilizar la norma ASTM D638 en probetas con un espesor menor a 14 mm (Rodríguez-Panes, Claver, Camacho, & Sebastián, Análisis normativo y evaluación geométrica de probetas para la caracterización mecánica de piezas obtenidas por fabricación aditiva mediante FDM, 2018)

Luego de evaluar la información de la investigación anterior y por la información de otras investigaciones en las que se hacen pruebas de tensión a probetas impresas en 3D, se decidió utilizar el estándar ASTM D638. Esta norma cubre la determinación de las propiedades de tensión para plástico reforzado y no reforzado. Estas pruebas es posible aplicar a cualquier material con un espesor máximo de 14 mm. En la norma hay información sobre la máquina a utilizar para las pruebas, sobre las probetas adecuadas, el número de pruebas para cada caso, la velocidad de la prueba, las condiciones de la prueba, el procedimiento y los cálculos para encontrar las propiedades necesarias, tomando en cuenta la estadística que se requiera. (ASTM, 2014)

G. ANSYS

ANSYS es un software que tiene como objetivo la simulación con altas tecnologías. Este software incluye toda la física para permitir acceso a cualquier tipo de simulación que se lleve a cabo en la realidad. ANSYS incluye opciones de modelado magnético, dinámica explícita, interacción de los fluidos con las estructuras, gemelos digitales y cualquier tipo de modelado que este dentro de estas áreas. En la simulación se incluyen las partes de preparación de mallado, ejecución y post proceso. ANSYS involucra varios métodos de análisis de elementos finitos, brindando así distintas maneras de representar las simulaciones. Una de las opciones de ANSYS es el análisis estructural y mediante este análisis es posible simular una prueba a tensión. La geometría deberá tener el mismo diseño que las probetas impresas, para que la simulación sea lo más parecida a la realidad. (ANSYS, 2020)

En el sistema *Explicit Dynamics* de ANSYS hay ciertos parámetros que deben ser configurados. A continuación, se presenta una descripción de lo que representa cada uno de esos parámetros. El parámetro *End Time* es el único que la simulación solicita al usuario, los demás se pueden modificar opcionalmente, y representa la escala de tiempo a la que se desea que corra la simulación. Al ingresar este valor es necesario considerar que el valor que se ingrese sea lógico, ya que entre menor sea la escala mayor tiempo tomará realizar la simulación e incluso puede no llegar a resolverse. Otro de los parámetros que pueden

modificarse es *Maximum Number of Cycles* e indica la máxima cantidad de ciclos o incrementos de tiempo que la simulación recorrerá antes de terminar, es necesario que se ingrese un valor alto, para asegurar que la simulación llegue al *End Time*. (ANSYS, 2009)

Existen otros parámetros que controlan los escalones de tiempo. Estos valores son *Initial Time Step*, *Minimum Time Step*, *Maximum Time Step* y *Time Step Safety Factor*. Todos estos parámetros tienen la opción de ser controlados por el programa. El valor asignado por el programa para *Initial Time Step* es un medio escalón de estabilidad del elemento inicial. *Minimum Time Step* es el que da el valor hasta el cual el tiempo puede caer, ya que si se alcanza este valor la simulación termina, el default es un décimo del *Initial Time Step*. Por último, el *Time Step Safety Factor* tiene un valor de 0.9, al ser controlado por el programa y aporta estabilidad al escalón de tiempo, con este valor la mayoría de simulaciones pueden ser realizadas. En todos los valores antes mencionados, se recomienda utilizar el valor generado por el programa. (ANSYS, 2009)

H. Anisotropía

El modelado por deposición fundida (FDM) construye piezas al depositar material fundido, siguiendo ciertos comandos, capa por capa. Cada capa depositada se funde con la capa anterior y así es como se forma la pieza. La fuerza de adhesión entre las capas se da como resultado de la fundición entre ambas capas por la alta temperatura y presión que ambas tienen. Esta fuerza de fundición no es muy grande, además que es imperfecta ya que muchas veces se forman burbujas de aire, provocando que esto sea una parte débil en la pieza. Por esta razón es que las piezas presentan un comportamiento anisotrópico, ya que la resistencia que existe en el eje Z, en donde se adhieren las capas, es menor que la resistencia que presenta la probeta en el plano XY. Al momento de configurar la impresión de las probetas es necesario considerar esto, según la aplicación que se le dé a la pieza será necesario considerar la mejor posición de impresión. (Impresoras 3D, 2019)

VI. Metodología

A. Elección del material del filamento que se utilizará en las pruebas

El material que se utilizará para el diseño de las probetas es policarbonato. Este material tiene excelentes propiedades mecánicas, como alta resistencia al impacto y fuerza. Es caracterizado, por su color transparente, permitiendo que se le den distintos usos. Como un material de impresión 3D, se destaca por tener una alta resistencia, solidez y la capacidad de mantener su forma hasta temperaturas de 110 °C. En la actualidad la literatura disponible sobre la caracterización mecánica de este material, para el modelado por deposición fundida, es escasa por lo que con esta investigación se podrá disminuir esa brecha existente entre la literatura y la capacidad que tiene actualmente la impresión 3D

B. Definición de probeta para ensayos a tensión

La probeta es una de las partes más fundamentales del ensayo a tensión, ya que es el elemento de análisis en cada una de las pruebas que se realicen. La geometría fue definida siguiendo la norma ASTM D638, utilizada para realizar pruebas a tensión a plásticos. Esta probeta tiene una forma particular, en los extremos presenta mayor anchura, mientras que en el centro el área se reduce. La norma brinda distintas dimensiones para las probetas y están clasificadas según el grosor al cual serán realizadas, siendo el máximo 14 mm. Para el método de manufactura que se utilizará, el grosor de la probeta no es un problema, ya que se tiene la capacidad de darle el grosor que se desee por la versatilidad de la impresión 3D. Para reducir la cantidad de material utilizado, las probetas deberán ser realizadas con un grosor de 6mm. Las probetas, tipo I y tipo II, son utilizadas para grosores por debajo de 7 mm. En uno de los estudios realizados por la UNED, se realizaron pruebas con las distintas probetas que podían utilizarse, manufacturándolas mediante modelado por deposición fundida. Al finalizar el estudio se encontró que la única probeta que se fracturaba, en el área de análisis, era la tipo I. Además, esta probeta es la que ha sido utilizada en la mayoría de las literaturas científicas. Por lo que las dimensiones presentes en este trabajo se refieren a la probeta tipo I, definida por la ASTM.

C. Selección de parámetros de impresión que se modificarán

Con este estudio se pretende que, en un futuro, sea posible realizar pruebas que permitan caracterizar el material y poder conocer un poco más sobre el efecto que tiene sobre las propiedades mecánicas de la pieza, modificar ciertos parámetros de impresión. Las configuraciones por analizar serán tres. La primera será el patrón de relleno, esta propiedad es la que rellena el interior de la probeta y permite al usuario elegir la geometría que desee utilizar. Estas estructuras internas son llamadas patrones de rellenos y cada uno de estos patrones brinda una estructura diferente provocando cambios en el interior de la pieza. Uno de los patrones que se analizará es *Triangles*,

este patrón de relleno está en la clasificación de rellenos 2D. Se incluyó en esta investigación ya que este es uno de los más comunes, además que es de los patrones que CURA brinda por default en las impresiones. El otro patrón que se analizará es *Gyroid*, este patrón es uno de los patrones más nuevos presentados por CURA. Este patrón brinda una mayor resistencia a un menor peso, teniendo una estructura compleja formada por superficies. El motivo de elegir estos dos parámetros es comparar que tanta diferencia se obtendría en los resultados al utilizar una geometría simple, como lo es *Triangles* y una geometría compleja como presenta *Gyroid*. De esta manera, con los resultados, se podrá tomar la decisión de utilizar un patrón más complejo para obtener mejores resultados.

Otro de los parámetros que serán analizados es el porcentaje de relleno, el cual representa la cantidad de material que llenará la pieza que se desea manufacturar. Este varía entre 0%, siendo una pieza vacía, y 100%, siendo una pieza completamente sólida. Los valores bajos representan una menor cantidad de material, pero una menor resistencia, mientras que los valores altos representan lo contrario. El porcentaje de relleno que se utiliza usualmente y que es colocado por default en CURA, es 20%, este es uno de los valores que será analizado en estos ensayos. Otro de los valores que será analizado es el 100%, ya que con él se obtiene una pieza completamente sólida y se espera una mayor resistencia. Por último, para tener un punto de comparación intermedio, se evaluará también un porcentaje de relleno del 50%. Cuando se obtengan los resultados, será posible conocer si un mayor gasto de material brinda mejores propiedades mecánicas o si el cambio es mínimo.

Por último, se consideró modificar la orientación en la que se imprimirán las probetas. La probeta está representada por tres planos diferentes y la impresión 3D permite realizar la deposición de material en cualquiera de estos planos. En estas pruebas se realizarán los ensayos modificando la orientación en los tres planos definidos. La razón por la que se incluyó esto en el análisis es por la anisotropía generada por la impresión 3D. Al depositar el material, capa por capa, la adición que existe entre las capas es por la solidificación del material estando en contacto con otra capa. Este eje de la probeta presenta una menor resistencia que los otros ejes, presentando un punto de análisis. Es por esta razón que se analizará para conocer la posición que genere mejores propiedades.

D. Elaboración de protocolo para impresión de probetas.

Para que la pieza formada sea de calidad es necesario que se tomen en cuenta ciertas configuraciones para la impresión 3D, ya que cada material se comporta de manera diferente. Para comenzar, es necesario tener control de la temperatura tanto del extrusor como de la cama de la impresora. La temperatura del extrusor debe ser lo suficientemente alta como para poder fundir el filamento de policarbonato, mientras que la cama debe tener una temperatura elevada para que la adhesión del material sea mejor. Para mejorar la adhesión entre la cama y la pieza será necesario utilizar goma

en barra u otro método, de esta manera también se tendrá facilidad de extraer la probeta de la cama de impresión. Además, también es necesario configurar la capa inicial de la probeta, como ha sido mencionado en el protocolo para impresión 3D. La razón de esta configuración es la alta tendencia del policarbonato al pandeo, por lo que al imprimir con una menor velocidad la primera capa, es posible tener una mejor adhesión. Todas estas consideraciones se incluyen en el protocolo de impresión 3D. CURA configura automáticamente estos parámetros al seleccionar el tipo de material que se utilizará para la impresión.

Cuando la impresión es configurada mediante CURA, es necesario modificar ciertas opciones para que la impresión sea obtenida de manera correcta. Para iniciar es necesario activar el soporte, en las probetas impresas con orientación en el borde y verticales. La razón de esto es que estas probetas al ser impresas tendrían superficies que serían construidas en el aire y esto no sería posible ya que al depositar el material este debe caer sobre una superficie sólida. Al activar esta opción se forma un soporte, con otro material, para que estas superficies sean construidas sobre una estructura sólida. El tipo de soporte seleccionado es *Touching Buil Plate*, ya que este aplica material de soporte solo al área que lo necesita y de esta manera no hay un gasto innecesario de material. Otro punto que debe ser configurado es *Build Plate Adhesion*, el cual tiene como objetivo agregar una base plana en la probeta para evitar el pandeo, además al realizar esta capa inicial se prepara la boquilla. Se utiliza el tipo *Brim*, ya que el tipo de geometría no requiere que esta primera capa sea más gruesa. Por último, es necesario deshabilitar la opción de *Prime Tower* que se encuentra en *Dual Extrusion*. Esta opción es utilizada cuando se utilizan dos materiales, para la construcción de la pieza. Cada vez que se cambia de boquilla de extrusión el material deposita una pequeña cantidad de material para preparar el material antes de ser extruido. En este caso esto no es necesario.

E. Elaboración de protocolo para ensayos a tensión

Al finalizar la impresión de las probetas, se deberán realizar los ensayos a tensión. Estos ensayos deberán seguir cierto protocolo para que las propiedades obtenidas estén bajo un mismo estándar y puedan ser comparados con resultados obtenidos en otras investigaciones. Para empezar, será necesario definir ciertas propiedades para la uniformidad de los ensayos. Las condiciones ambientales a las que se realizan las pruebas deben tener cierto control. Es necesario que la temperatura se encuentre en un rango de 21 °C a 25 °C y un porcentaje de humedad relativa que se encuentre entre 40 % y 60 %. Estos valores son los que la norma sugiere para que no exista variación en los resultados a causa de condiciones ambientales.

Otro punto que debe ser considerado en los ensayos a tensión es el número de pruebas a realizar. Este permite que los resultados tengan validez, ya que puede que en alguna prueba los resultados hayan sido alterados por un factor externo, brindando propiedades erróneas. La norma indica que, para materiales isotrópicos, realizar 5

pruebas permite confiabilidad en los resultados. Para un material anisotrópico indica que es necesario realizar 5 pruebas con el eje de anisotropía paralelo y 5 con el eje normal al eje de aplicación de la tensión. En el caso de las probetas obtenidas mediante modelado por deposición fundida, se considera que presentan un comportamiento anisotrópico por la debilidad en la resistencia del eje de adherencia de capas. Por esta razón se realizarán pruebas modificando la orientación de las probetas y así variar el eje de anisotropía de la probeta para cumplir con lo que le estándar solicita. Por lo que, por cada una de las modificaciones realizadas en los parámetros de impresión 3D, se realizarán un total de 5 pruebas. Si en dado caso, el material falla por otra razón que no sea la tracción o falla fuera del área de análisis, será necesario repetir esta prueba.

La velocidad a la que se realiza el ensayo es otro de los puntos que deben controlarse para obtener resultados adecuados. La norma ASTM D-638 brinda distintas velocidades de impresión y las clasifica por el tipo de probeta utilizada y por la rigidez que presenta el material. La probeta utilizada en estas pruebas es del tipo I. Luego la ASTM define un material como rígido si tiene un módulo de elasticidad mayor a 700 MPa y define como no rígido a un material con un módulo de elasticidad menor a 70 MPa. En el caso del policarbonato, Ultimaker incluye en la ficha técnica del material un módulo de elasticidad de 2,134 MPa, para fines prácticos se utilizó este valor para obtener la velocidad de prueba. Con la clasificación de una probeta tipo I con material rígido, se obtuvo un valor para la velocidad de 5 mm/min con una variación de $\pm 25\%$.

El área inicial y final de la probeta es fundamental para los cálculos que se realizan luego de obtener los resultados de los ensayos a tensión. Las medidas deben ser lo más precisas posibles, para poder tener mayor exactitud en los resultados. Todas estas mediciones deben ser realizadas siguiendo un procedimiento, el cual permite que las mediciones puedan ser precisas. El procedimiento que se debe seguir es establecido por la ASTM, en donde indica que instrumentos usar y cuáles deben ser los pasos a seguir. El instrumento para las mediciones será un micrómetro, ya que permite realizar las mediciones con mayor precisión. Cada una de las mediciones debe ser realizadas tres veces y al final realizar un promedio de las tres mediciones, de esta manera se pueden validar los resultados obtenidos.

En el caso de las máquinas que no tienen la capacidad de almacenar los datos, para luego trasladarlos a la computadora y analizarlos, es necesario hacer uso de una cámara para tomar video de toda la prueba. Con esta cámara es necesario enfocar tanto el indicador de la fuerza que se le está aplicando a la probeta, como también los valores que presenta el extensómetro. Estos deben estar enfocados en la misma cámara para que al momento de analizar los datos, sea posible tomar ambas mediciones en el mismo instante. Este video luego debe ser enviado al software *Tracker*, en el cual se hará un análisis de cada una de las mediciones que hay marcado los indicadores en el transcurso de las pruebas. Estos datos serán utilizados posteriormente en el análisis para encontrar las propiedades de las probetas. En el caso de las máquinas más modernas esto no será

necesario, normalmente estas generan un archivo en el cual se presentan las distintas fuerzas aplicadas con su respectiva deformación.

F. Elaboración de hoja de cálculo.

Luego de obtener los resultados de los ensayos a tensión, es necesario realizar ciertos cálculos para obtener las propiedades, a tracción, que representan las distintas configuraciones del material impreso mediante modelado por deposición fundida. Para facilitar este proceso de análisis, se incluye en este trabajo, una hoja de cálculo en la cual se facilita el proceso de documentación y cálculos respectivos de la prueba. La hoja de cálculo está conformada por distintas pestañas, las cuales tienen distintos funcionamientos y a la vez permiten manejar con mayor facilidad la gran cantidad de datos que se manejarán al realizar estas pruebas. En la primera pestaña se presenta un código de identificación para cada una de las configuraciones que se realizarán en las probetas. Se consideró agregar este código para tener facilidad de identificar cada uno de los ensayos realizados.

La siguiente pestaña permite almacenar todos los datos obtenidos de las mediciones de las probetas para el cálculo del área de la probeta. En esta parte hay un total de 36 tablas, dos para cada una de las configuraciones realizadas. Una de las tablas es para las medidas iniciales de las pruebas y otra es para las medidas finales. Por cada una de las probetas es necesario realizar un total de 3 mediciones para el largo, y 9 mediciones tanto para el ancho como para el grosor de la probeta. La cantidad de mediciones se debe a que, al tener varias iteraciones, es posible tener la certeza que el dato que se obtiene al final es certero y no fue tomado de manera errónea. Para el cálculo del área, utilizada en la próxima pestaña, se utilizará el promedio de las distintas mediciones que se realicen a las probetas. Cada una de las tablas están identificadas debidamente, con los valores de los parámetros configurados, de esta manera el usuario no tendrá confusiones al subir los resultados obtenidos. Además de esto en cada una de las tablas se incluyen 5 divisiones, para que se documenten las mediciones de las probetas en las 5 pruebas realizadas por cada una de las configuraciones.

La siguiente pestaña presente en la hoja de cálculo es en la que se realizan los respectivos cálculos para la obtención de las propiedades del material. El diagrama esfuerzo deformación es el que presenta el comportamiento de la probeta en todo el proceso que conlleva el ensayo a tensión, este diagrama está definido por la deformación porcentual de la probeta y los esfuerzos generados por cada una de estas deformaciones. La razón por la que estos datos son utilizados es para que los resultados obtenidos en las pruebas no tengan ninguna dependencia de la geometría y puedan ser utilizados posteriormente en cualquier pieza de análisis. El porcentaje de deformación se calcula comparando el largo inicial con el largo respectivo en cada punto de las pruebas. Los esfuerzos son calculados utilizando el área inicial, como se presenta en la ecuación 1. Una vez se tiene definidos estos puntos, la construcción del diagrama esfuerzo-deformación es automático.

$$\sigma = \frac{F}{A_i}$$

Ecuación 1. Esfuerzo

Las propiedades calculadas mediante esta hoja de cálculo son el porcentaje de reducción de área, la deformación total, el módulo de Young/elasticidad, la resistencia a la fluencia, la resistencia final, la resistencia a la rotura, la resiliencia del material y por último la tenacidad. El porcentaje de reducción de área y la deformación total caracterizan la ductilidad que tiene el material, al tener valores altos significa que la ductilidad del material es alta, ya que permite que el material se deforme más, antes de fracturarse. Estos valores son calculados comparando los valores iniciales y finales tanto del área como de la longitud de la probeta, como se presenta en la ecuación 2 y 3.

$$\text{Reducción porcentual de área} = 100 \frac{A_0 - A_B}{A_0}$$

Ecuación 2. Porcentaje de reducción de área

$$\epsilon_{tot} = 100 \frac{L_B - L_0}{L_0}$$

Ecuación 3. Deformación total

Las distintas resistencias y el módulo de Young son los puntos más importantes que definen el ensayo a tensión realizado. El módulo de Young es calculado obteniendo la pendiente de los datos que se encuentren en la zona elástica, para realizar esto se utilizó la función de Excel, *pendiente*. Esta función es utilizada para calcularla en todos los puntos presentes. Esta función está configurada de manera que va aumentando los datos por cada una de las filas que se agregan, así es posible calcular la pendiente de todos los datos ingresados. Para definir el punto en el que se encuentra el módulo de Young es necesario que el usuario indique cual es el valor de la resistencia a la fluencia. A partir de la resistencia a la fluencia el material deja de ser elástico, por lo que la pendiente de los datos hasta este punto representa el módulo de Young. Cuando el usuario ingresa el valor del esfuerzo de fluencia, se utiliza la función *BUSCARV*, para que se encuentre el valor de pendiente respectivo al esfuerzo de fluencia. El esfuerzo de fluencia se encuentra justo al final de la primera pendiente del diagrama esfuerzo deformación y este debe ser encontrado por el usuario. Se decidió utilizar esta técnica, ya que al utilizar métodos automáticos no se podía asegurar que se encontrará exactamente el punto deseado. La resistencia final está definida por el máximo esfuerzo encontrado en el ensayo y en la hoja de cálculo se utilizó la función *MAX*, para encontrarlo entre todos los datos del problema. Por último, el esfuerzo de ruptura se encuentra en el último punto que ha sido documentado. Para encontrar este esfuerzo se utilizó la función *DESREF*, la cual identifica el último dato de la tabla. En este caso se

buscó la última fuerza registrada por la máquina de ensayos y se dividió por el área final de la prueba para encontrar el resultado real de resistencia última.

La resiliencia y tenacidad del material representan la densidad de energía necesaria para deformar permanentemente el material y la densidad de energía necesaria para fracturarlo, respectivamente. Estos valores son representados por el área bajo la curva del diagrama esfuerzo-deformación, según el área de análisis de cada una de las propiedades. En el caso de la resiliencia es el área bajo la curva de la zona elástica y en el caso de la tenacidad el área bajo la curva de toda la gráfica. Existen varios métodos para calcular el área bajo la curva de una gráfica. El método más certero es integrando la ecuación de la curva que represente el área de análisis, en este caso no se cuenta con esta ecuación y solo se podrían obtener aproximaciones que brindarían cierto margen de error. Otro método para realizar este cálculo es por medio de rectángulos, el cual divide la curva en pequeños rectángulos que al sumarlos se aproximan al valor real de esta área. Entre menor sea el ancho de cada uno de estos rectángulos, menor será el error que exista en el resultado. Este fue el método utilizado en esta hoja de cálculo. En la columna *tenacidad* se multiplica el esfuerzo por la diferencia entre la deformación actual y la anterior. En la columna suma se van sumando estas áreas encontradas. Para la resiliencia, utilizando la función *BUSCARV*, se encuentra el valor de área en el mismo punto que la resistencia a la fluencia. En el caso de la tenacidad, se utiliza la función *SUMA*, la cual tiene como objeto sumar todas las casillas de la columna *suma*, y así obtener el área total de la curva. En la ecuación 4 se presenta el cálculo utilizado para el área bajo la curva.

$$\text{Área bajo la curva} = \sum_{i=0}^n \sigma_i * (\epsilon_i * \epsilon_{i-1})$$

Ecuación 4. Área bajo la curva para tenacidad y resiliencia

En la pestaña de cálculos se habilitaron tres botones: “Borrar contenido”, “Calcular” y “Almacenar resultados”, los cuales cumplen con ciertas funciones al momento de ser presionados. Para permitir el funcionamiento de estos se utilizaron macros, los cuales graban cierto procedimiento que se ingrese y luego lo replican cada vez que el botón es presionado. De esta manera las casillas se borran reiniciando el procedimiento, se ajustan los cálculos para la obtención de los resultados requeridos y se almacenan las propiedades obtenidas en una pestaña diferente de manera automática luego de simplemente presionar el botón que habilite la función.

La última propiedad analizada en la hoja de cálculo es el *Strength Ratio*. Ya que en las pruebas se realizan cambios en el porcentaje de relleno, la masa de las probetas cambia, teniendo una mayor masa para las probetas con un mayor porcentaje de relleno. Para poder comparar los resultados obtenidos con los distintos porcentajes de relleno se utiliza el *Strength Ratio*. Este valor es una relación entre las fuerzas máximas

obtenidas en los ensayos y la masa de la probeta. Con esta relación será posible conocer cuál es el comportamiento de la probeta al tener una mayor masa.

G. Elaboración de protocolo para simulación de ensayos a tensión

El protocolo para la simulación de ensayos a tensión fue diseñado para ser utilizado en el programa ANSYS. En el protocolo se sugiere realizar la simulación en dos de los sistemas de análisis que brinda este software. El primero es en *static structural*, el cual permite simular el comportamiento del sistema, al aplicarle cierta fuerza a la probeta, el análisis es estático. El otro sistema que está incluido en la simulación es *explicit dynamics*, el cual fue elegido porque permite simular la rotura de la probeta.

En la simulación será necesario ingresar las propiedades mecánicas del material. Con esta información es posible conocer la manera en la que se comportará el material al ser sometido a cierto fenómeno, en este caso al tensionarlo. Para iniciar se debe ingresar el módulo de Young, el cual permite saber el comportamiento de la parte elástica del sistema. Otro de los datos que debe ingresarse es la relación de Poisson's, con esta información es posible conocer la manera en la que se deformará la pieza para simularlo. Otra de las propiedades que debe ingresarse es la resistencia a la fluencia, esta da a conocer el punto en el que el material dejará de tener una deformación elástica. El módulo tangente debe ingresarse para que se tenga una aproximación de la manera en la que se comportará el material en la parte plástica de la simulación. Por último, es necesario ingresar la resistencia última, con este dato el programa podrá conocer en qué punto la probeta fallará, ya que indica el mayor esfuerzo que puede soportar antes de fracturarse.

El mallado fue otro de los puntos que se tomó en cuenta en este protocolo. Para tener una mayor exactitud, convergencia y velocidad en la simulación es necesario tener un mallado de calidad. El programa genera un mallado default, el cual es simple y no busca tener alta calidad. Para mejorar este mallado es posible aplicar distintas opciones y así poder tener resultados más precisos. Una de estas opciones es *sizing*, la cual tiene como objetivo minimizar el tamaño de los elementos en los que se divide la pieza, permitiendo tener un análisis más precisos. Otra de las opciones con las que cuenta este simulador es con la aplicación de distintos métodos para generar elementos con la misma geometría y así conseguir una mejor calidad en el mallado. Estas fueron las opciones que se consideraron en este protocolo.

En la simulación es necesario aplicar ciertas condiciones iniciales para que el programa pueda mostrar el comportamiento del elemento de análisis al ser sometido a cierta acción. En el caso de los ensayos a tensión, la pieza esta fija de uno de los lados, mientras que en el otro está siendo ejercida una fuerza. En el sistema *static structural* se colocó un soporte fijo de uno de los lados de la probeta y en el otro lado se colocó una fuerza contraria a la probeta, generando ese estiramiento por tensión en la probeta. En el caso de *explicit dynamics* se aplicaron dos fuerzas nodales, las cuales representan

la aplicación de una fuerza en todos los nodos del mallado del elemento de análisis. Cada una de estas fuerzas fue aplicada desde un extremo hasta el centro de la probeta, con dirección opuesta. Esto simula una pieza a tensión y a la vez permite que la fractura se de en el área de análisis de la probeta.

Por último, en la simulación es necesario insertar los resultados que queremos, después de la aplicación de las condiciones iniciales. Para iniciar se debe insertar *Deformation – total*, esta presenta la deformación que sufrió la pieza al ser sometida a la fuerza que se ingresó al inicio. *Strain – Normal* presenta el alargamiento que tuvo la pieza, con este dato es posible comparar el alargamiento que real que tuvo la pieza en las pruebas experimentales. Además, fue incorporado en el análisis *Strain - Equivalent* y *Stress – Equivalent*, con ellos será posible analizar a profundidad el comportamiento de la pieza y también comparar con los datos de los ensayos a tensión, para verificar si la pieza fallará o no al aplicar cierta fuerza. También se incluyó en el análisis *Strain – Equivalent Plastic*, la cual hará una representación del comportamiento plástico de la pieza. El último análisis que se incluyo fue *Stress Tool – Max tensile stress*, el cual brinda el factor de seguridad de la pieza. Si el factor de seguridad es menor a uno indica que en la pieza fallo en esta parte, ya que no soportó la tensión. Ese fue incluido solo en *Static Structural* ya que en esta parte no es posible simular la rotura de la pieza.

Para la simulación de las probetas con patrón de relleno *triangles*, se realizó un modelado del interior para asemejarlo a la realidad. Para poder modelar esto se utilizó inventor y los parámetros de impresión 3D que brinda CURA. Para iniciar se utilizó la función *Shell* para generar la parte externa de la probeta, en la cual no se incluye el patrón de relleno. El siguiente paso fue realizar una línea atravesando la probeta, en el centro, con un ángulo de 165° y un grosor de 0.4 mm. A partir de esta línea se construyeron otras dos mediante un patrón circular, de esta manera se obtenían las líneas con el mismo ángulo entre ellas y así poder generar los triángulos que representan el patrón de relleno. Una vez realizadas estas tres líneas se utilizó la función patrón rectangular para replicar estas líneas a lo largo de toda la probeta y así rellenarla con el patrón de relleno. Esta distancia cambiaba según el porcentaje de relleno utilizado. Por último, se eliminaron los excesos de material en la probeta.

La geometría interna que se generó tenía geometrías muy pequeñas con las que ANSYS no tenía la capacidad de generar un mallado. Por la forma de triángulos en el patrón relleno, en las orillas de la probeta se generaron pequeños triángulos, los cuales debieron ser eliminados para que la simulación fuera posible. Esto sucedió solo en las probetas con 50% de porcentaje de relleno. Por esta razón fue necesario modificar la geometría interna de la probeta y permitir que el mallado fuera generado. Una vez realizadas las modificaciones el mallado fue generado y la simulación funcionó.

VII. Resultados

Para poder llevar a cabo ensayos a tensión es necesario definir una probeta, la cual será sometida a ciertos esfuerzos y permitirá caracterizar el material. Para este protocolo se definió la probeta según el estándar ASTM D638, el cual es utilizado para ensayos a tensión en plásticos. La norma brinda distintas dimensiones para las probetas, clasificadas según el grosor que se utilizará. Para este caso se seleccionó una probeta Tipo 1, con un grosor de 6 mm. En el anexo A se encuentra el detalle de las dimensiones y la forma que la probeta debe tener.

Los parámetros de impresión que serán modificados para los distintos ensayos también fueron definidos. Se realizarán configuraciones en tres de las distintas opciones que la impresión 3D permite alterar. Estos parámetros serán patrón de relleno, porcentaje de relleno y orientación de impresión. Al realizar los ensayos se podrá analizar la influencia que tiene cada uno de ellos sobre las propiedades mecánicas de las piezas y la manera de optimizarlos según las necesidades. En el anexo B es posible encontrar más información sobre estos parámetros y las distintas combinaciones que se realizarán. El Cuadro 2 presenta los valores que se asignarán a cada parámetro.

Cuadro 2 Parámetros de impresión

Parámetro	Valor
Patrón de relleno	Triangles
	Gyroid
Porcentaje de relleno	100 %
	50 %
	20 %
Orientación de impresión	Plano
	Vertical
	En el borde

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el protocolo de impresión 3D para facilitar el proceso de la obtención de las probetas, este se encuentra en el anexo B. En él se pueden encontrar las configuraciones más importantes que deben realizarse al momento de utilizar policarbonato, como material de impresión 3D. Además, el protocolo brinda una guía detallada de los pasos a seguir cuando la impresión se configura utilizando como software CURA. Esta guía incluye también los pasos para poder configurar los parámetros de impresión que se modificarán en los ensayos de tensión.

En el anexo C, es posible encontrar el protocolo para la elaboración de ensayos a tensión con probetas impresas en 3D. En él es posible encontrar todos los detalles que deben ser controlados, para que los ensayos brinden resultados válidos. También indica el procedimiento que se debe llevar a cabo, para realizar de manera adecuada, la medición de las dimensiones que serán analizadas. Por último, se encuentra una guía, paso por paso, de lo que debe realizarse en cada uno de los ensayos, brindado una solución si se diera el caso

de que la máquina de ensayos no entregue los resultados de la prueba. En el Cuadro 3 están los valores establecidos para los parámetros que deben ser controlados.

Cuadro 3 Valores por controlar en ensayos a tensión

Parámetro	Valor	Dimensión
Temperatura	21 a 25	°C
Humedad	40 a 60	%
Número de pruebas	5	-
Velocidad de prueba	5	mm/min
Tiempo de prueba	0.5 a 5	min

Fuente: Elaboración propia

Una hoja de cálculo fue diseñada, para facilitar la obtención de las propiedades mecánicas del material, mediante el software Microsoft Excel. Una vez se han obtenido los resultados de los ensayos a tensión, se deberán ingresar en la hoja de cálculo y con ellos se realizarán los cálculos correspondientes. Esta hoja de cálculos será brindada al usuario en una memoria USB. Para facilitar el uso de esta herramienta, en el anexo C, se encuentra una guía con las distintas funciones de la hoja de cálculo y del procedimiento a seguir para obtener las propiedades. En el Cuadro 4 están las propiedades que pueden ser calculadas.

Cuadro 4 Tabla de propiedades en hoja de cálculo

Propiedades
Porcentaje de reducción de área
Deformación total
Módulo de Young
Resistencia a la fluencia
Resistencia última
Resistencia a la rotura
Resiliencia
Tenacidad

Fuente: Elaboración propia

Por último, el protocolo para la simulación de ensayos a tensión fue realizado y se encuentra en el anexo D. En este protocolo se realizan simulaciones en el sistema *static structural* y en el sistema *explicit dynamics*. El protocolo brinda indicaciones para la creación de ambos sistemas, el ingreso de propiedades del material, el mallado que se le dará a la pieza, las condiciones iniciales que deberán colocarse en cada uno de los sistemas y los resultados que serán obtenidos mediante estas simulaciones.

Para validar el protocolo de ensayos a tensión se realizaron las simulaciones en la probeta sólida (100% porcentaje de relleno) y todas las probetas con patrón de relleno *triangles*. Los datos del material ingresados fueron los que Ultimaker brindaba en su ficha técnica. En el caso del mallado, para la probeta sólida se pudo aplicar un *sizing* y el método *multizone*. En las probetas con patrón de relleno *triangles* (20% y 50% porcentaje de relleno), solo fue posible generar el mallado default. Con todas las probetas, se obtuvieron resultados para ambos sistemas.

VIII. Análisis de resultados

Se creó un protocolo para la elaboración de ensayos a tensión a probetas de policarbonato manufacturadas mediante el método de modelado por deposición fundida. El objetivo es brindar al usuario una orientación, para poder realizar los ensayos con mayor facilidad y buscando obtener resultados válidos. El protocolo consta de cinco partes; la definición de la probeta que será utilizada en cada una de las pruebas, un protocolo para poder manufacturar las probetas mediante impresión 3D, un protocolo para poder realizar los ensayos a tensión, una hoja de cálculo junto con una guía para poder hacer uso de ella y por último un protocolo para la realización de los ensayos a tensión.

En el diseño de la hoja de cálculo era necesario incluir el cálculo de los esfuerzos a los que es sometida la probeta al aplicarle las distintas fuerzas. Este esfuerzo es calculado dividiendo la fuerza entre el área de la probeta en cada momento de la práctica. El área de la probeta se deforma en todo el ensayo a causa de la tensión que se le está ejerciendo. Para poder tener esta área en cada uno de los momentos del ensayo se debe hacer uso de dos extensómetros extra que permitan dar las medidas exactas en todo momento y muchas veces esto no es posible. En el caso de este protocolo no se tomó en cuenta la variación del área, por lo que los cálculos de esfuerzo son con el área inicial de la probeta. Los esfuerzos obtenidos no son los valores reales, pero dan una aproximación cercana.

La resiliencia y tenacidad de la pieza representan el área bajo la curva del diagrama esfuerzo – deformación. Para poder calcular el valor exacto de estas propiedades es necesario conocer la ecuación de la curva que representa el diagrama que se analizará y así poder calcular la integral de la curva. En este caso no se conoce la ecuación de la curva por lo que fue necesario implementar otro método para el cálculo del mismo. En el cálculo se dividió la figura en pequeños cuadrados y se calculó el área de cada uno de los cuadrados, para luego sumarla y obtener el área bajo a curva. Esta es una manera de aproximar el valor del área bajo la curva con un menor error. Si se tiene un poco número de datos, el valor aproximado tendrá un mayor error en comparación con el valor real.

En el caso de la simulación es necesario que la geometría de análisis sea lo más similar posible a la realidad. En la actualidad no hay una manera de generar el patrón de relleno a partir del código que genera el software de impresión 3D, por ello es necesario diseñarlo haciendo uso de un programa de modelado, como lo es inventor. En este caso, el patrón de *triangles* fue realizado, utilizando la geometría de muestra que brinda CURA y con los parámetros de impresión 3D. Este patrón no es exactamente igual al patrón que se obtiene al imprimir la pieza. Para empezar la posición de las líneas no inicia de la misma manera en que la impresión 3D la genera. Además de esto, para que fuera posible generar el mallado en estas probetas, fue necesario realizar ciertas modificaciones a la geometría, provocando diferencias entre el patrón real y el modelado. Para saber que tanto afecta esto los resultados, es necesario comparar la simulación con los ensayos experimentales.

En las pruebas que se realizaron para validar el protocolo de simulaciones se inició utilizando una probeta sólida. A esta probeta fue posible aplicarle un *sizing* y un método *multizon*, para mejorar su mallado. El mallado que se obtuvo alcanzó un valor de 0.9965 para *orthogonal quality* y un valor de 0.0442 para *skewness*, lo cual representa un mallado de alta calidad. En el caso de las probetas con patrón de relleno *triangles*, solo fue posible generar el mallado default. Si hicieron pruebas realizando un *sizing* de 0.2 mm, ya que el tamaño de las líneas internas es de 0.4 mm, y el programa no logró generarlo por falta de memoria RAM, utilizando una computadora con 8GB. Por esta razón se obtuvieron valores alrededor de 0.201 para *orthogonal quality* y valores alrededor de 0.863 para *skewness*. El mallado en estas probetas no fue de la mejor calidad.

IX. Conclusiones

1. El protocolo elaborado para ensayos a tensión en probetas de policarbonato impresas en 3D define todos los puntos necesarios para llevar a cabo las pruebas y obtener resultados válidos.
2. La probeta para ensayos a tensión está definida por la norma ASTM D638 en la clasificación tipo I, con un grosor de 6 mm, para obtener la fractura en el área de análisis y resultados certeros.
3. Los parámetros de impresión que serán modificados en los ensayos a tensión son patrón de relleno, porcentaje de relleno y orientación de impresión.
4. Por cada una de las configuraciones realizadas en los parámetros de impresión 3D se deberán realizar un total de 5 ensayos a tensión, para poder validar los resultados.
5. Mediante el protocolo de impresión 3D, que se encuentra en el Anexo 2, se permite al usuario realizar las configuraciones necesarias, para la obtención de las probetas, haciendo uso del software CURA. Además, se brinda un instructivo para tomar las mediciones de las probetas, realizar los ensayos a tensión y utilizar *tracker* si en caso fuera necesario, en el protocolo de ensayos a tensión que se encuentra en el Anexo 3.
6. La hoja de cálculo permite el almacenamiento de las mediciones realizadas a las probetas, el cálculo de las propiedades mecánicas, además de un sistema de almacenamiento de propiedades identificado debidamente.
7. Se proporciona un instructivo, que se encuentra en el Anexo 4, para la hoja de cálculo, el cual indica los pasos a seguir para realizar la adecuada utilización de esta herramienta, indicando cuales son los datos que debe ingresar y cuáles son los que se obtienen.
8. El protocolo para simulación de ensayos a tensión, que se encuentra en el Anexo 5, brinda instrucciones para el montaje de la simulación, en dos sistemas de análisis, haciendo uso del software ANSYS.

X. Recomendaciones

1. Antes de imprimir y crear todas las probetas para ser analizadas se recomienda realizar ensayos de tensión de prueba en una probeta para validar que el comportamiento sea el esperado por los protocolos de ensayos. En dado caso la probeta no presenta el comportamiento esperado deber referirse a la norma D638 y hacer pruebas con las distintas opciones de probetas hasta encontrar la que brinde roturas ,en el área de análisis, para poder ser caracterizada.
2. Leer detenidamente el protocolo previo a la realización de cada uno de los pasos para la obtención de las propiedades de ensayos a tensión. El no realizar esto podrá conllevar que el ensayo realizado no se pueda considerar valido.
3. Descartar los resultados, de los ensayos a tensión, de toda probeta que no se fracture en el área de análisis.
4. Modelar el patrón de relleno de las probetas con geometrías simples, para que sea posible generar el mallado para las simulaciones.
5. Si se desea obtener, en las simulaciones, resultados con mayor precisión será necesario realizar un estudio más extenso para la elaboración del mallado así como una computadora con gran capacidad de cómputo.

XI. Bibliografía

- Alvarez, K., Lagos, R., & Aizpun, M. (2016). Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM). *Revista chilena de ingeniería*, 17-24.
- ANSYS. (2009). *Explicit Dynamics Chapter 8 Analysis Settings*. Obtenido de SCRIBD: <https://es.scribd.com>
- ANSYS. (2020). *Structural Analysis Software Solutions*. Obtenido de Ansys: www.ansys.com
- ASTM. (2000). *Standard Terminology Relating to Plastics*. Obtenido de Yizimg: <http://file.yizimg.com/175706/2011090910321097.pdf>
- ASTM. (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Obtenido de Department of aerospace and ocean engineering: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~aborgolt/aoe3054/manual/expt5/D638.38935.pdf>
- ASTM. (2017). *Additive Manufacturing - Standards*. Londres.
- Baltar, J., & Carvalho, C. (2016). Simulation of uniaxial tensile test through of finite element method. *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. Curitiba: Asociación Brasileña de Ingeniería y Ciencias Mecánicas.
- Behzadnasab, M., & Yousefi, A. (2016). Effects of 3D printer nozzle head temperature on the physical and mechanical properties of PLA based product. *12th International Seminar on Polymer Science and Technology*. Tehran: Faculty of Polymer Processing.
- Cain, P. (2016). *Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D printing*. Obtenido de 3D HUBS: www.3dhubs.com
- Cantrell, J., Sean, R., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J., . . . Jerez, A. (2017). Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, 89-105.
- Farbman, D., & McCoy, C. (2016). Materials Testing of 3D Printed ABS and PLA Samples to Guide Mechanical Design. *ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference*. Virginia: American Society of Mechanical Engineers.

- Godec, D., Cano, S., Holzer, C., & Gonzalez-Gutierrez, J. (2020). Optimization of the 3D Printing Parameters for Tensile Properties of Specimens Produced by Fused Filament Fabrication of 17-4PH Stainless Steel. *Materials*, 774-797.
- Goldschmidt, B. (2020). *The Best Cura Infill Pattern (for Your Needs)*. Obtenido de ALL3DP: <https://all3dp.com>
- Grasso, M., Azzouz, L., Ruiz-Hincapie, P., Zarreli, M., & Ren, G. (2018). Effect of temperature on the mechanical properties of 3D-printed PLA tensile specimens. *Rapid Prototyping Journal*, 1337-1346.
- Impresoras 3D. (2019). *Impresoras 3D FDM*. Obtenido de Impresoras 3D: <https://impresoras3d.org.es>
- Laminated Plastics. (2017). *Technical Data Sheet Polycarbonate (PC)*. Obtenido de Laminated Plastics: <https://laminatedplastics.com/polycarbonate.pdf>
- Martínez, A. (2015). Modelado y verificación del comportamiento a tracción de probetas bimatériau termoplásticas. *Tesis Universidad Politécnica de Valencia*. 167 págs.
- Materialise. (2017). *Modelado por deposición fundida (FDM)*. Obtenido de Materialise: <https://www.materialise.com>
- Rodríguez-Panes, A., Claver, J., & Camacho, A. (2018). The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. *Materials*, 1-21.
- Rodríguez-Panes, A., Claver, J., Camacho, A., & Sebastián, M. (2018). Análisis normativo y evaluación geométrica de probetas para la caracterización mecánica de piezas obtenidas por fabricación aditiva mediante FDM. *XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*. Madrid: UNED.
- Schmailzl, A., Amann, T., Glockner, M., & Fadanelli, M. (2012). Finite element analysis of thermoplastic probes under tensile load using LS-DYNA compared to ANSYS WB 14 in correlation to experimental investigations. *ANSYS Conference & 30th CADFEM Users' Meeting*. Kassel.
- Stratasys. (2018). *FDM: donde la función se encuentra con la forma*. Obtenido de stratasys: www.stratasys.com
- Tanikella, N., Wittbrodt, B., & Pearce, J. (2017). Tensile Strength of Commercial Polymer Materials for Fused Filament Fabrication 3D Printing. *Additive Manufacturing*, 40-47.

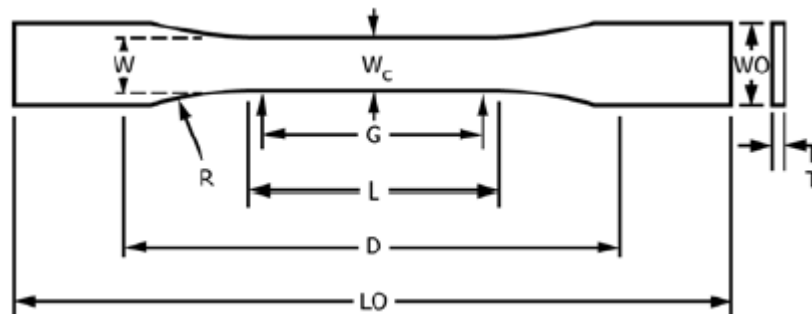
- Ultimaker. (2020). *La selección de materiales más amplia del mercado*. Obtenido de Ultimaker: <https://ultimaker.com>
- UVG D-HIVE. (2018). *Manual de impresión 3D Ultimaker 3*. Guatemala: UVG.
- Vidakis, N., Vairis, A., Petousis, M., Savvakis, K., & Kechagias, J. (2016). Fused deposition modelling parts tensile strength characterisation. *Academic journal of manufacturing engineering*, 87-94.
- Vo, B., Ajibade, A., Rosengren, M., Pena, K., & Moran, M. (2019). The Effect of 3D Printing Temperature on the Mechanical Properties of Polypropylene. *JUCER*, 24-31.

XII. Anexos

A. Probeta.

Los ensayos a tensión requieren de una probeta a la cual se le aplicarán diferentes fuerzas hasta que se fracture. La probeta será el elemento de análisis, ya que de ella dependerán todos los resultados obtenidos. En esta prueba se utilizará una probeta definida por el estándar ASTM D638. En la Figura 1 se puede apreciar la geometría que debe tener y las dimensiones se encuentran en el Cuadro 5.

Figura 1 Geometría con dimensiones de probeta



Fuente: ASTM, 2014, D639 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

Cuadro 5 Dimensiones probeta Tipo I

Dimensión (Ver Figura 1)	mm(in)
W – Ancho sección estrecha	13 (0.5)
L – Longitud sección estrecha	57 (2.25)
WO - Ancho total, min	19 (0.75)
LO – Largo total, min	165 (6.5)
G – Longitud del calibre	50 (2.0)
D – Distancia entre empuñaduras	115 (4.5)
R – Radio de filete	76 (3.0)

Fuente: ASTM, 2014, D639 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

Los extremos, con un ancho mayor, son los que se utilizan para enganchar la probeta a las mordazas de la máquina de tensión. El área estrecha es a la que se le realizará el análisis. El cambio de esta área, a lo largo de la prueba, es de mucho interés para el ensayo.

B. Protocolo para impresión de probetas.

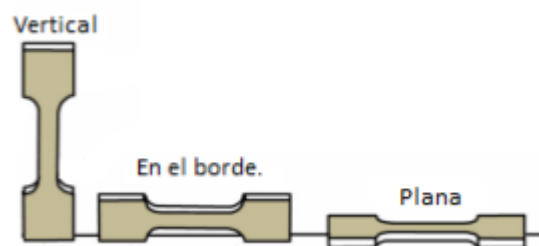
El policarbonato es un polímero con buenas propiedades mecánicas en cuanto a resistencia al impacto, resistencia al calor y transparencia. Con respecto a la resistencia al calor, el policarbonato tiene una temperatura de transición vítrea de 152 °C, lo cual significa que mantiene su integridad estructural hasta esta temperatura, y una temperatura de fusión de 250 °C.

A pesar de que estas propiedades son muy beneficiosas; para la impresión 3D representan un problema. Al tener una temperatura de fusión tan alta, al momento de realizar una impresión, es necesario que el extrusor alcance dicha temperatura. Por esta razón, normalmente, el filamento contiene aditivos que permiten imprimirlo a una menor temperatura, sin embargo, la temperatura de impresión sigue siendo alta. Por lo que, para tener una impresión exitosa, será necesario tomar en cuenta las siguientes sugerencias.

Parámetros de impresión:

Las pruebas serán realizadas con diferentes configuraciones en ciertos parámetros de impresión, para evaluar el comportamiento que presentan las probetas al ser sometidas a tensión. Los parámetros a los que se les realizarán modificaciones serán el porcentaje de relleno, el patrón de relleno y la orientación de impresión. Para el porcentaje de relleno se utilizarán los valores 20 %, 50 % y 100 %. En el caso del patrón de relleno, se utilizarán dos diferentes, *Triangles* y *Gyroid*. Por último, las probetas serán impresas en tres posiciones distintas; en el borde, vertical y plana, en la Figura 2 se pueden observar estas orientaciones.

Figura 2 Orientación de probetas



Fuente: Cantrell, y otros, 2017, Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts

Las pruebas serán realizadas, con todas las combinaciones posibles, de los parámetros de impresión. De esta manera será posible analizar cuál es la influencia que tiene el parámetro en las propiedades físicas obtenidas. Además, al realizar las pruebas se podrá decidir qué combinación brinda los mejores resultados y cual brinda los peores. En el Cuadro 6 se encuentran estas combinaciones.

Cuadro 6 Combinaciones parámetros

Número	Porcentaje de relleno	Patrón de relleno	Orientación
1	20 %	Triangles	Vertical
2	50 %	Triangles	Vertical
3	100 %	Triangles	Vertical
4	20 %	Gyroid	Vertical
5	50 %	Gyroid	Vertical
6	100 %	Gyroid	Vertical
7	20 %	Triangles	Borde
8	50 %	Triangles	Borde
9	100 %	Triangles	Borde
10	20 %	Gyroid	Borde
11	50 %	Gyroid	Borde
12	100 %	Gyroid	Borde
13	20 %	Triangles	Plana
14	50 %	Triangles	Plana
15	100 %	Triangles	Plana
16	20 %	Gyroid	Plana
17	50 %	Gyroid	Plana
18	100 %	Gyroid	Plana

Fuente: Elaboración propia

Requerimientos para la impresora:

- La temperatura de la cama de impresión debe encontrarse entre 80 °C y 120 °C.¹
- La temperatura del extrusor deber encontrarse entre 260 °C y 310 °C.*
- La superficie de construcción deberá tener un adhesivo para que la pieza se adhiera mientras se imprima y para facilitar la extracción. Puede utilizarse como primera opción goma en barra, aplicándola en el vidrio de impresión. Otra opción es utilizar masking tape azul, el cual se pega en el vidrio. Por último, si la impresora lo requiere, será necesario utilizar una lámina de PEI.
- Es necesario que la impresora este cerrada, para que el interior de la impresora mantenga una temperatura estable, durante la impresión.

Personalizar el ajuste en la primera capa:

El policarbonato tiene cierta tendencia al pandeo, para poder reducirla será necesario realizar cierta configuración en la primera capa.

- La altura de capa (*Layer Height*) debe configurarse entre 0.2 y 0.3 mm.
- La anchura de capa (*Initial Layer Line Width*) debe configurarse entre 120 % y 150%.

¹ Depende de la marca del filamento.

- La velocidad de impresión (*Initial Layer Speed*) debe configurarse entre 7.5 y 15 mm/s.
- La temperatura de la cama debe estar 30 °C más alta, que en el resto de la impresión, si es posible.

Consejos adicionales:

- Si la pieza muestra un comportamiento con tendencia a inclinarse, considerar apagar el ventilador en la primera capa y disminuir su funcionamiento al 40% hasta la cuarta o quinta capa.
- Si el material fue expuesto a humedad, disminuir la temperatura de impresión a menos de 280 °C.

Impresión 3D mediante Ultimaker:

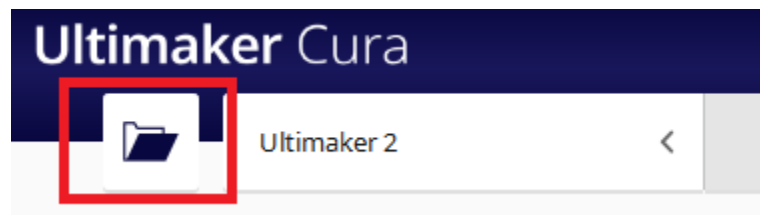
Ultimaker cuenta con un software para generar los códigos para la impresión de las piezas, llamado CURA. En este software existe una base de datos que especifica la configuración para cada uno de los materiales Ultimaker. Al generar el código de impresión, mediante CURA, es posible seleccionar el perfil de policarbonato (PC) que ya contiene las configuraciones anteriores.

Pasos para configuración en CURA² e impresión de probetas:

El software de CURA brinda una base de datos con distintos materiales y las configuraciones necesarias para la impresión de cada uno de estos. Los siguientes pasos serán para imprimir las probetas de policarbonato, con un filamento de Ultimaker.

- Abrir CURA.
- Buscar el ícono de carpeta en la esquina superior izquierda y presionarlo.

Figura 3 Ícono para abrir archivos



Fuente: Elaboración propia

- Seleccionar el archivo que contenga el diseño de la probeta, en versión STL, y abrirlo.

² Versión de CURA 4.6.2

- Colocar la probeta en la posición en la que se imprimirá, buscando el recuadro de la Figura 4.

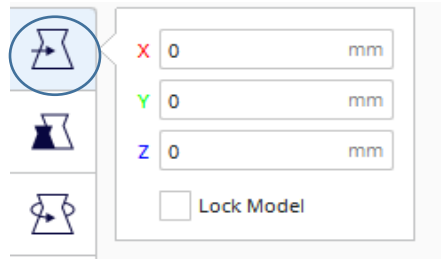
Figura 4 Posición de impresión



Fuente: Elaboración propia

- Al presionar el botón indicado, seleccionar la cara que debe ir contra la cama, según la orientación de impresión de la prueba.
- Verificar que la probeta se encuentre en el centro, colocando en 0 los valores al presionar el botón de la Figura 5 ubicado al lado izquierdo de la pantalla.

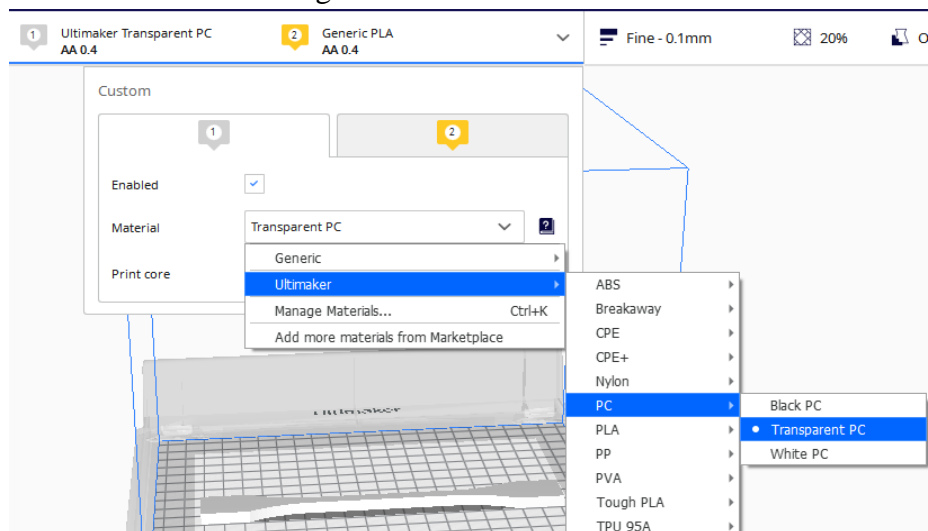
Figura 5 Ubicación de la probeta en la cama



Fuente: Elaboración propia

- Buscar en la parte superior central un recuadro con los materiales de cada una de las extrusoras y presionarlo.

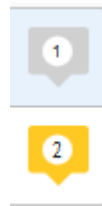
Figura 6 Selección de material



Fuente: Elaboración propia

- Seleccionar la extrusora que se va a utilizar para configurar el material.
 - Presionar en el recuadro que contiene el material.
 - Seleccionar el recuadro que dice *Ultimaker*.
 - Seleccionar *PC* y el color del filamento con el que se realizarán las impresiones.
 - Presionar *discard* en el recuadro que aparece.
 - Repetir el procedimiento para seleccionar le material del soporte.³
- Seleccionar la pieza, y en la esquina inferior izquierda, seleccionar la extrusora que se utilizará. (Los recuadros que tengan el número 1 y 2)

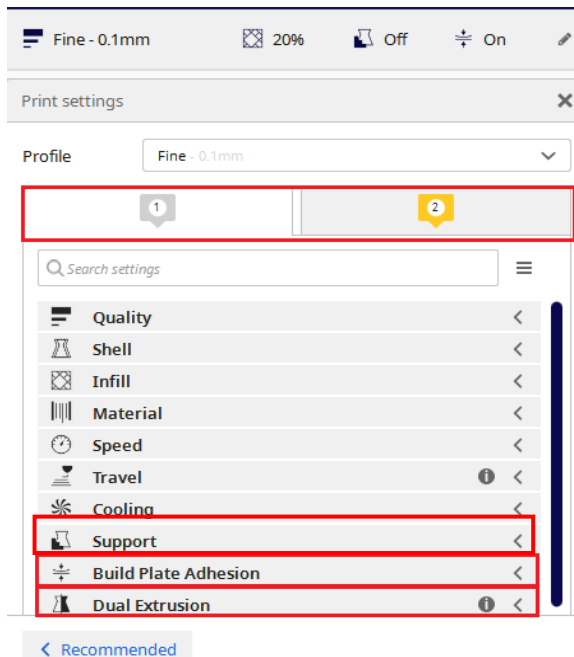
Figura 7 Selección extrusora



Fuente: Elaboración propia

- Ir a *Print Settings*.

Figura 8 *Print Settings*

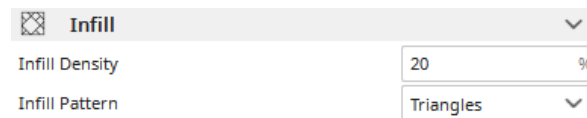


Fuente: Elaboración propia

³ El soporte será necesario para las probetas impresas en el borde y verticales.

- Presionar la extrusora que se utilizará.
 - Seleccionar en el listado *Support*
 - Habilitar la opción *Generate Support*.
 - En *Support Extruder* elegir la extrusora en la que se encuentra el material para soporte.
 - Por último, en *Support Placement*, elegir la opción de *Touching Buildplate*
 - Seleccionar en el listado la opción de *Build Plate Adhesion*.
 - Habilitar la opción *Enable Prime Blob*.
 - En la opción *Build Plate Adhesion Type* se encuentran las opciones de brim y raft. Para las probetas seleccionar brim, raft es más grueso y en este caso no es necesario.
 - Seleccionar en el listado *Dual Extrusion*.
 - Deshabilitar la opción *Circular Prime Tower*.
- Los siguientes pasos son para la configuración de los parámetros de impresión. Permanecer en *Print Settings*.

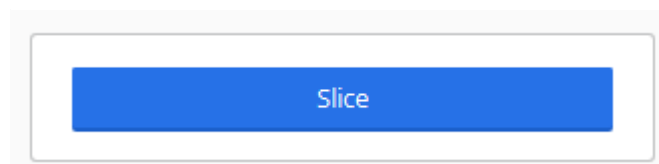
Figura 9 Relleno



Fuente: Elaboración propia

- Seleccionar en el listado la opción *Infill*.
 - Llenar, con el porcentaje de la prueba, la opción *Infill Density*.
 - Seleccionar el patrón de relleno de la prueba en la opción *Infill Pattern*.
- Presionar la opción *slice* en la esquina inferior derecha.

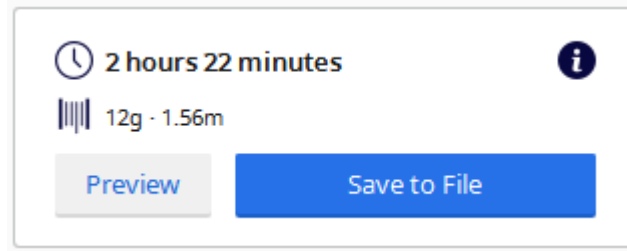
Figura 10 Operación *Slice*



Fuente: Elaboración propia

- Insertar la memoria USB que se utilizará.
- Presionar la opción *Save to file* en la esquina inferior derecha.

Figura 11 Almacenar archivo



Fuente: Elaboración propia

- Almacenar en la memoria USB el archivo en formato “.gcode” que se genere.
- Extraer la memoria USB de la computadora.
- Cubrir la cama de la impresora con una capa de goma en barra (Pritt).
- Insertar la memoria USB en la impresora Ultimaker. (Ver Figura 12)
- Mediante el botón de la impresora buscar el archivo que almacenamos en la memoria. (Ver Figura 12)

Figura 12 Configuración en impresora 3D



Fuente: UVG D-HIVE, 2018, Manual de impresión 3D Ultimaker 3

- Seleccionar el archivo para empezar la impresión. (Ver Figura 12)
- Monitorear que la impresión no tenga ningún inconveniente.
- Esperar a que la cama de la impresora enfríe al terminar la impresión.
- Remover el vidrio, con la pieza, de la impresora.
- Extraer la pieza utilizando la espátula metálica, como se observa en la Figura 13.

Figura 13 Remover pieza del vidrio de



Fuente: UVG D-HIVE, 2018, Manual de impresión 3D Ultimaker 3

C. Protocolo para ensayos a tensión.

Todos los materiales se comportan de manera diferente ante las condiciones del ambiente en el que se encuentran. Es por ello que, al realizar distintas pruebas a los materiales, para conocer sus propiedades, es necesario seguir un estándar. Esto permite que los resultados sean confiables, comparables con otros ensayos y precisos.

El estándar que actualmente existe para la impresión 3D no tiene un protocolo establecido para los ensayos a tensión. Este simplemente redirige hacia las normas que se utilizan para materiales plásticos. El presente protocolo ha sido diseñado mediante la utilización del estándar ASTM D638-14 y algunas sugerencias realizadas por distintos artículos científicos.

Control de temperatura y humedad:

Las propiedades físicas y eléctricas de los plásticos son influenciadas tanto por la temperatura como por la humedad relativa, provocando que los resultados sean variados y no utilizables al tener diferencias en estos parámetros. Para que los resultados obtenidos de las pruebas puedan ser comparables, de manera confiable, con otros materiales y pruebas hechas en diferentes laboratorios, es necesario estandarizar la temperatura y humedad relativa a la que van a ser sometidas las probetas en el ensayo.

Es necesario que las probetas se mantengan a una temperatura de 23 °C con una variación de ± 2 °C y una humedad relativa del 50 % con una variación de ± 10 %. Esto debe realizarse al menos 40 horas antes de realizar los ensayos. Es posible hacerlo utilizando una refrigeradora en la que se puedan especificar los parámetros antes mencionados.

Para el laboratorio en el que se realizarán las pruebas será necesario que el ambiente se encuentre en las mismas condiciones que para el almacenamiento de las probetas, con los mismos valores de temperatura y humedad relativa. La mejor opción para poder cumplir con estas especificaciones es realizar los ensayos en una habitación en la que exista un sistema de acondicionamiento de aire al cual se le pueda configurar tanto la temperatura como la humedad relativa. Si esto no es posible será necesario realizar las pruebas en las horas del día en las que los valores de temperatura y humedad relativa estén dentro del rango antes mencionado.

Número de pruebas:

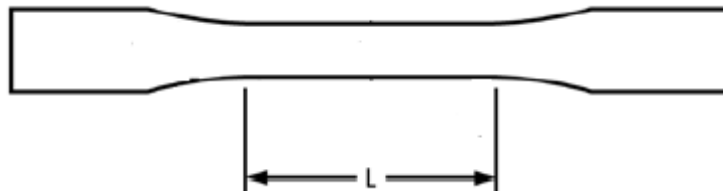
La estructura de las piezas, que están manufacturadas mediante la técnica de modelado por deposición fundida (FDM), está formada mediante la adhesión de varias capas a lo largo del eje Z. Esto provoca que la pieza tenga una estructura anisotrópica. Según ASTM

D638-14, si el material tiene este comportamiento, es necesario realizar un mínimo de 10 pruebas. Cinco de estas pruebas deben realizarse de manera paralela al eje principal de anisotropía y el resto de manera perpendicular al eje principal de anisotropía.

Para poder evaluar la anisotropía de las piezas será necesario imprimirlas con distinta orientación. Al imprimir las piezas modificando esta configuración se modifica el eje Z, ya que las capas se adhieren desde otro perfil. Con una modificación en el perfil de adherencia se modifica el eje principal de anisotropía, permitiendo que se pueda analizar la pieza aplicando la fuerza de tensión paralela y perpendicularmente. Esto es una ventaja ya que, con solo una configuración, en el software de impresión 3D, es posible cambiar este eje sin necesidad de alguna especialidad en la máquina para ensayos. Las orientaciones en las cuales se colocará la pieza se encuentran en el Anexo B.

Para tener resultados más confiables será necesario descartar las probetas que fallen a causa de una imperfección en la manufactura. También se deberán descartar todas las probetas que fallen fuera de la sección de análisis (dimensión L en la Figura 14). Para estos ensayos descartados se tendrá que volver a practicar la prueba con una probeta nueva.

Figura 14 Longitud de prueba de la probeta



Fuente: ASTM, 2014, D639 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

Velocidad de ensayo:

La velocidad de ensayo es la que indica la tasa relativa de movimiento de las mordazas. Esta velocidad debe de estar dentro de cierto límite para que la prueba de resultados precisos. ASTM D638-14 brinda un rango de velocidad, según la clasificación del material y el tipo de probeta que se utilizará. El tipo de geometría de la probeta se encuentra en el Anexo A.

Un material rígido o semirrígido es el que tiene un módulo de elasticidad mayor a 700 MPa, el cual ha sido obtenido mediante ensayos que siguen el estándar de ASTM. Un material no rígido es el que tiene un módulo de elasticidad menor a 70 MPa, evaluado mediante el estándar ASTM. Cuando no se tiene la clasificación del material se elige la velocidad más baja según el tipo de geometría que se tiene. Con esta velocidad establecida los ensayos deben tener una duración de entre 0.5 a 5 minutos. En la siguiente tabla es posible encontrar estos valores de velocidad. La velocidad que se utilizará en las pruebas es de 5mm/min. (ASTM, 2000)

Cuadro 7 Designación de la velocidad de prueba

Clasificación	Tipo de probeta	Velocidad de la prueba, mm/min (in/min)
Rígido y semirrígido	I, II, III varillas y tubos.	5 (0.2) ± 25%
		50 (2) ± 10%
		500 (20) ± 10%
	IV	5 (0.2) ± 25%
		50 (2) ± 10%
		500 (20) ± 10%
	V	1 (0.05) ± 25%
		10 (0.5) ± 25%
		100 (5) ± 25%
No rígido	III	50 (2) ± 10%
		500 (20) ± 10%
	IV	50 (2) ± 10%
		500 (20) ± 10%

Fuente: ASTM, 2014, D639 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

Método para determinación de dimensiones de probetas:

Para poder realizar las respectivas medidas de la probeta se deberá utilizar micrómetro con trinquete calibrado (*ratchet*) o dedal de fricción. El micrómetro tiene que tener la capacidad de medir con una precisión de 2.5 µm (0.0025 mm). Para medir el largo es necesario que el micrómetro sea de 50 a 75 mm, para tener la capacidad de realizar la medición. El espesor y el ancho de la probeta utilizarán un micrómetro de 0 a 25 mm. Todas las mediciones se deben realizar con las mismas condiciones ambientales que en los ensayos a tensión.

Para realizar la calibración del aparato de medición se necesitarán bloques de calibración estándar u objetos metálicos con medidas conocidas. Con el instrumento se toma la medida de esta pieza, la precisión de la dimensión conocida debe de estar dentro del ±10% de la escala más pequeña del dial. En el caso de este micrómetro, el error debe estar entre ±0.25 µm para comprobar que este calibrado. Se recomienda realizar esta calibración al menos una vez al año.

Para iniciar la medición cerrar el micrómetro en un área de la probeta que tenga una dimensión similar a la que se desea medir. Una vez realizada esta medición abrirlo, aproximadamente, 100 µm más allá de la medida esperada y colocarse en el área de medición. Utilizando el trinquete o dedal, cerrar el micrómetro a una velocidad en la que las divisiones de escala puedan ser contadas con facilidad, aproximadamente 50 µm/s. Apretar hasta que el trinquete haga clic tres veces o hasta que el dedal se resbale por fricción. Por último, registrar la medida encontrada en la Hoja de cálculo. Realizar al menos tres mediciones de la dimensión, la media aritmética será el valor de la medida resultante. Para el largo de la probeta será necesario tomar la medición solo de la parte angosta de la probeta. En el caso del grosor y ancho de la probeta, realizar la medición en

varios puntos de la probeta, dentro de la región de análisis y lo más cercano al centro de la misma. Realizar la medición 3 veces, en cada uno de los puntos que se utilicen.

Procedimiento:

- Tomar la temperatura y la humedad del ambiente y verificar que este dentro de los límites establecidos.
- Colocar un trípode para sostener la cámara, verificando que esta se encuentre completamente perpendicular con la probeta para no tener errores en las mediciones.⁴
- Situar la cámara en un ángulo donde enfoque tanto la medición de fuerza y como el desplazamiento brindado por el extensómetro.
- Medir la masa de la probeta y almacenar los datos en la hoja de cálculo, incluir la precisión del instrumento de medición.
- Con un marcador señalar la sección de análisis mencionada anteriormente en el “número de pruebas”.
- Siguiendo el método de medición obtener el largo de la probeta.
- Siguiendo el método de medición obtener el grosor de la probeta.
- Siguiendo el método de medición obtener el ancho de la sección de análisis de la probeta.
- Seleccionar las mordazas que se adecuen de mejor manera a las probetas, estas deben tener el tamaño suficiente para cubrir toda el área de agarre.⁵
- Colocar cinta adhesiva en las mordazas, si el material es muy dúctil y la mordaza es dentada.
- Colocar, en la máquina para ensayos, las mordazas para las piezas de impresión 3D.
- Separar las mordazas de manera que adecuen a la longitud de la probeta.
- Montar la probeta en la mordaza superior y dejar que cuelgue libremente.
- Adecuar la mordaza inferior a la posición en que se encuentra la probeta.
- Solicitar ayuda del técnico o ensayista, si es posible.
- Verificar que todas las probetas sean colocadas de la misma manera.
- Verificar que la máquina para los ensayos este trabajando a la velocidad especificada anteriormente.
- Iniciar la grabación.
- Dar inicio al ensayo.
- Al finalizar el ensayo parar la grabación.
- Medir el largo, ancho y grosor final de la sección de análisis, siguiendo el método de medición.

⁴ En caso la máquina de ensayo no brinde los resultados de la prueba.

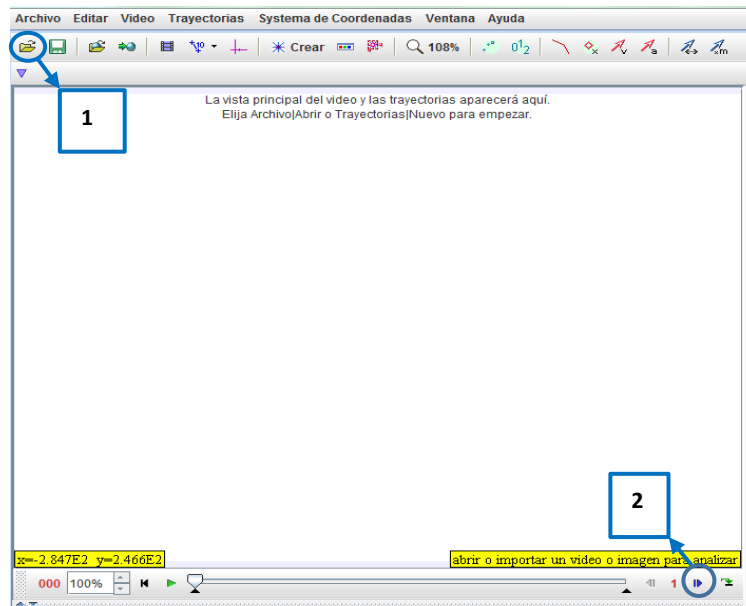
⁵ Consultar el instructivo de la máquina, para indicaciones especiales de montaje, si es posible.

Resultados de ensayos utilizando *tracker*:

Tracker es una herramienta de análisis de videos y en este caso será utilizada para poder analizar cada video de los ensayos a tensión, en el caso que la máquina no brinde los resultados. Esta aplicación es posible obtenerla con solo teclear en el buscador de *Google* su nombre e ingresar a la primera página que se despliega.

Para iniciar con el análisis del video será necesario abrir la aplicación, la cual desplegará la pantalla que se muestra en la Figura 15. Para ingresar el video que se quiere analizar se deberá presionar en la carpeta que está señalada por el número 1, esto desplegará un menú en el cual se deberá buscar el video y se abrirá. Una vez insertado el video se localizará la posición en la que se desplieguen los valores de fuerza y deformación.

Figura 15 Pantalla *Tracker*



Fuente: Elaboración propia

La aplicación divide el video en *frames*, lo que significa que permite que el video pueda ser visto en imágenes. Para ir pasando cada *frame* del video se deberá presionar la flecha señalada por el número 2 en la Figura 15. El usuario deberá ver cada uno de los *frames* del video para ver los cambios que haya en la magnitud de la fuerza y el desplazamiento y se deberán almacenar todos estos cambios para hacer el análisis posterior del ensayo.

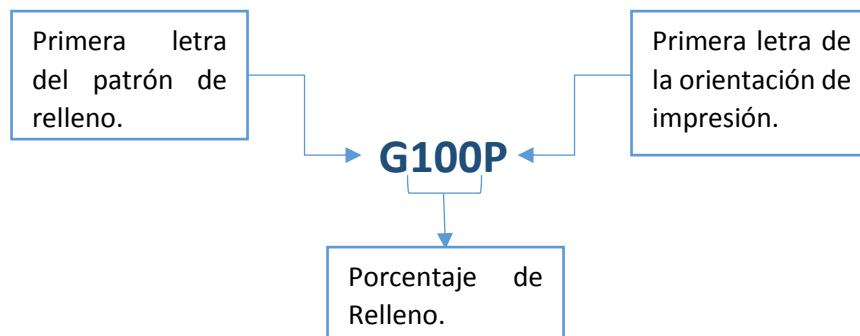
D. Hoja de cálculo.

La Hoja de cálculo es una herramienta mediante la cual se podrán obtener las propiedades mecánicas de los materiales, a partir de las diferentes pruebas a tensión que serán realizadas. El objetivo de esta herramienta es facilitar al usuario el cálculo de las propiedades, luego de que haya obtenido los resultados de las pruebas. Consta de cinco pestañas con los siguientes nombres; Código de Prueba, Dimensiones, Cálculos, Propiedades Almacenadas y *Strength Ratio*. La Hoja de cálculo fue realizada mediante el software Excel de Microsoft. A continuación, se presenta una guía para el uso de cada una de estas pestañas.

Código de prueba

Las pruebas que se realizarán para conocer más sobre el comportamiento del policarbonato involucran ensayos con distintos parámetros de impresión en las probetas. Por esta razón se ideó un código con el cual es posible identificar cada una de las pruebas. Es posible encontrar los códigos en la primera pestaña de la hoja de cálculo. Este código hace referencia a los valores asignados para cada uno de los parámetros modificados en la prueba. En esta pestaña es necesario elegir el código que representa la prueba, ya que será necesario para la pestaña llamada “Cálculos”. A continuación, se presenta la interpretación del código.

Figura 16 Interpretación código



Fuente: Elaboración propia

Dimensiones:

En el protocolo para elaboración de ensayos a tensión hay un instructivo para la obtención de las distintas dimensiones de la probeta. Todos los datos obtenidos deberán ser almacenados en la pestaña de “Dimensiones”, que se encuentra en la Hoja de cálculo. Se proporcionan dos tablas para cada una de las pruebas realizadas y todas están identificadas con el código de prueba y el número de ensayo. En la primera tabla se almacenarán las dimensiones iniciales obtenidas y en la segunda tabla se almacenarán las dimensiones

finales. En la tabla se permite, en total, ingresar las dimensiones de cinco probetas, ya que es la cantidad de pruebas realizadas por cada combinación.

Cálculos y datos almacenados

La tercera pestaña de la Hoja de cálculo tiene el nombre de “Cálculos” y de aquí es de donde se obtienen las propiedades de cada una de las pruebas. Dentro del sistema se encuentran tres botones con diferentes funciones. El primero botón, llamado “Borrar Contenido”, tiene como función poner en blanco toda la hoja para iniciar el análisis de un nuevo ensayo a tensión. El botón “Calcular” tiene la función de brindar las propiedades que se desean obtener del ensayo. Por último, “Almacenar Resultados”, es el botón que permite almacenar las propiedades de cada una de las pruebas en una pestaña diferente. En la Figura 17 se presentan los tres botones:

Figura 17 Botones Hoja de cálculo



Fuente: Elaboración propia

La hoja fue diseñada para ser lo más automatizada posible, por lo que solo es necesario ingresar algunos datos para obtener los resultados. Desde el inicio será necesario que el usuario llene la celda “Código”, en la cual se colocará el código de la prueba indicado en la pestaña anterior; y la celda “No. de Ensayo”, la cual indica qué ensayo se está realizando de la prueba indicada. A continuación, se presenta un listado de las celdas a las cuales es necesario ingresar información:

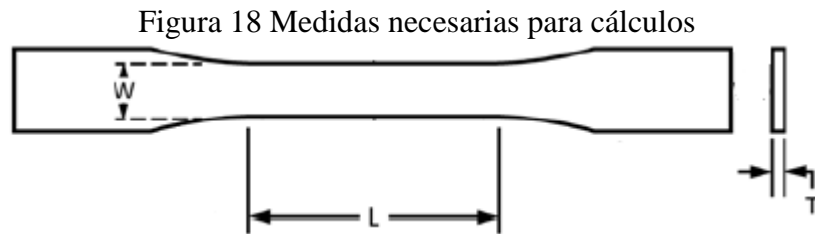
Cuadro 8 Datos a ingresar Hoja de cálculo

Casillas por ingresar	
T _i	Espesor Inicial
w _i	Ancho inicial
L _{inicial}	Largo inicial
T _f	Espesor Final
w _f	Ancho Final
Código	-
No. de Ensayo	-
Carga	-
Largo	-
Esfuerzo encontrado	-

Fuente: Elaboración propia

El espesor inicial (T_i), ancho inicial (w_i), largo inicial (L_{inicial}), espesor final (T_f) y ancho final (w_f) son los datos encontrados en las mediciones respectivas realizadas antes y después de los ensayos a tensión, estos deben ser los valores promedio de la iteración de

mediciones realizadas. En el protocolo para ensayos a tensión se encuentra una guía detallada de la manera en que deben ser realizadas las mediciones. En la Figura 18 se presentan las medidas que se requieren de la probeta:

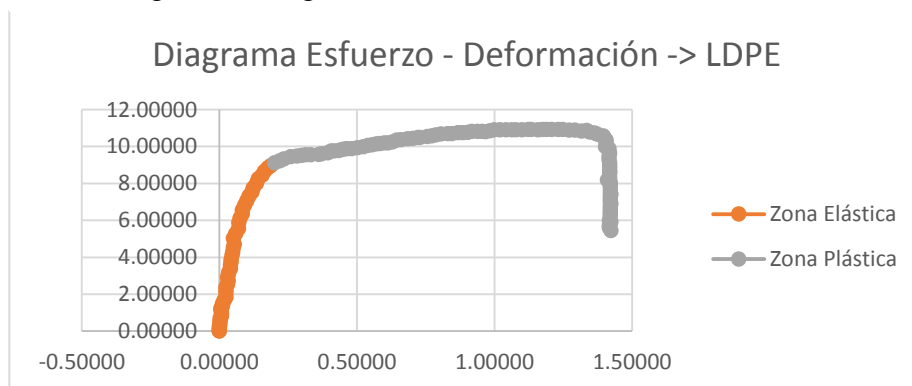


Fuente: ASTM, 2014, D639 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

Una vez ingresados estos datos será necesario ingresar la carga (N) y el largo (mm) de la probeta, obtenidos a lo largo de toda la prueba a tensión. Esta información será brindada ya sea por la máquina utilizada o por el análisis realizado mediante *tracker*⁶. Si la máquina brinda solamente la deformación de la probeta, será necesario sumarles a estos datos el largo inicial de la probeta antes de ingresarlos al programa. Esta información debe ser colocada en las columnas respectivas de la tabla presentada en la hoja de cálculo.

Cuando todos los datos mencionados anteriormente han sido ingresados se generará automáticamente el diagrama Esfuerzo – Deformación. Este diagrama presentará dos áreas importantes, la zona elástica y la zona plástica. El usuario deberá analizar la gráfica y encontrar el esfuerzo que se encuentra justo antes de pasar a la zona plástica, este esfuerzo es llamado resistencia a la fluencia. Esto es posible distinguirlo ya que la zona elástica tiene un comportamiento lineal y es la primera parte del diagrama. A continuación, en la Figura 19 y 20, se presentan dos ejemplos de la zona elástica y plástica de ensayos a tensión de distintos materiales.

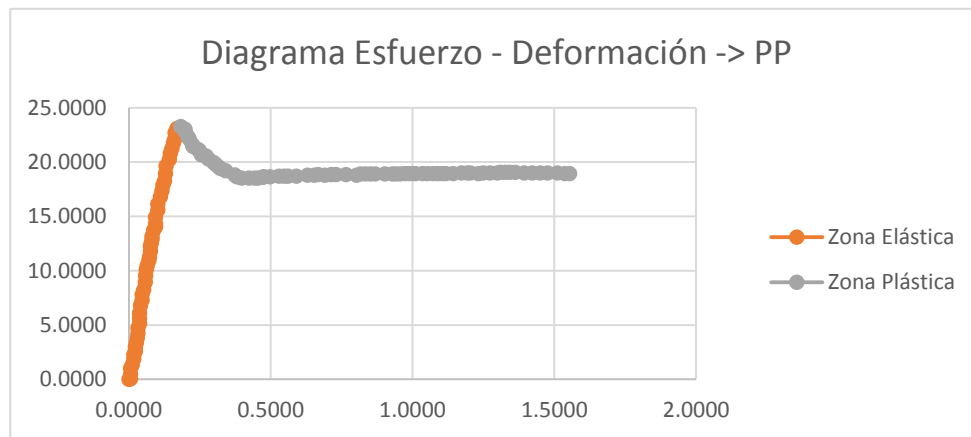
Figura 19 Diagrama Esfuerzo - Deformación (LDPE)



Fuente: Elaboración propia

⁶ Para obtención de datos mediante *tracker* referirse al protocolo para elaboración de ensayos a tensión.

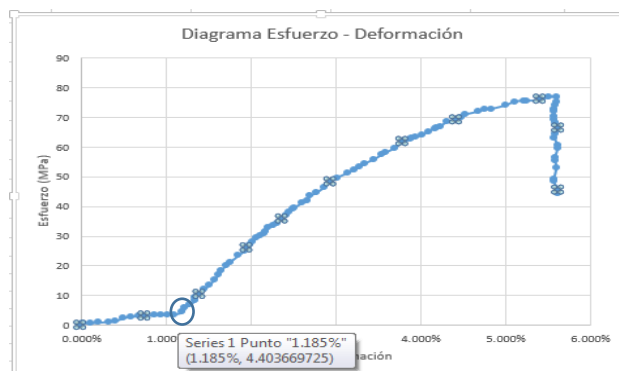
Figura 20 Diagrama Esfuerzo - Deformación (PP)



Fuente: Elaboración propia

En algunos diagramas es posible observar más de un comportamiento lineal, en estos casos la zona elástica terminará cuando, la pendiente de la primera recta finalice. Para poder encontrar la resistencia a la fluencia, el usuario deberá darle *click* a los puntos presentes en el diagrama y colocarse sobre el punto justo antes de que la zona elástica finalice. Al realizar esto aparecerán el esfuerzo y deformación que definen este punto, el usuario deberá copiar los valores exactos brindados. Luego se deberá buscar este punto en la tabla en la que se encuentren todos los datos y se copiará el valor exacto del esfuerzo indicado. Este esfuerzo se tendrá que colocar en la celda de “esfuerzo encontrado” que se encuentra al lado derecho del diagrama. Es fundamental buscar el valor exacto en la columna de esfuerzos (σ) y copiarla con los mismos dígitos a la celda de “esfuerzo encontrado” para que sea posible el cálculo. La búsqueda del valor del esfuerzo se puede observar en la Figura 22.

Figura 21 Demostración para encontrar la resistencia a la fluencia



Fuente: Elaboración propia

Figura 22 Búsqueda del esfuerzo de fluencia en los datos de las tablas

σ (Mpa)
0
0.73394495
0.73394495
0.97859327
1.22324159
1.46788991
2.44648318
2.93577982
3.18042813
3.18042813
3.42507645
3.42507645
3.66972477
3.66972477
4.40366972

Fuente: Elaboración propia

En cuanto se haya encontrado el valor de la resistencia a la fluencia y se haya colocado en la celda mencionada será necesario presionar el botón “Calcular”. En este momento las propiedades del ensayo han sido calculadas y se presentarán al lado derecho de la Hoja de cálculo. Para poder almacenar las propiedades encontradas en este ensayo será necesario presionar el botón “Almacenar Resultados”. Estas propiedades quedarán almacenadas en la pestaña “Datos Almacenados” y serán debidamente identificadas.

Figura 23 Parte de la tabla para almacenar datos de cada ensayo

Código	No. de Ensayo	% de reducción de Área	Deformación total	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia
A1	1	8.61%	45.00%	43363.88	221.11

Fuente: Elaboración propia

Strength Ratio

En esta pestaña se calcula el *Strength Ratio*, esta propiedad relaciona la fuerza que pueden soportar las probetas teniendo un peso diferente. Con esta propiedad será posible comparar la resistencia que tienen las probetas con un porcentaje de relleno diferente. En esta pestaña será necesario ingresar la fuerza máxima que soporta la probeta y el peso de esta. Estos valores deben ser el promedio de los 5 ensayos de cada una de las pruebas. Los recuadros están identificados según el tipo de prueba.

Como ha sido mencionado anteriormente, para el cálculo del *strength ratio*, es necesario comparar el peso de la probeta, con la fuerza máxima que soporta. En esta parte de la hoja de cálculo se presentan 6 tablas en total. Cada tabla presenta el mismo patrón de relleno y porcentaje de relleno. Lo que se compara en las tablas son los porcentajes de relleno de cada una de las probetas. En la Figura 24, se presenta una de las tablas que se encontrarán y se enseña las zonas que deben ser ingresadas.

Figura 24 Tabla de *Strength Ratio*

Gyroid Plano		
Porcentaje de relleno	-	100%
Masa probeta	kg	
Fuerza máxima	N	
Porcentaje de relleno	-	50%
Masa probeta	kg	
Fuerza máxima	N	
Porcentaje de relleno	-	20%
Masa probeta	kg	
Fuerza máxima	N	
Strength Ratio 100%/50%		
Strength Ratio 100%/20%		

Fuente: Elaboración propia

E. Protocolo para simulación de ensayos a tensión

La simulación en ingeniería es un método mediante el cual es posible predecir o calcular ecuaciones no lineales que no pueden ser resueltas a mano. Estas ecuaciones funcionan para poder modelar un fenómeno real y así poder identificar y entender los factores que controlan el sistema. También es posible predecir el futuro comportamiento del sistema.

La simulación de los ensayos a tensión servirá para poder conocer más a fondo el comportamiento de la probeta sometida a ciertos esfuerzos. Uno de los aspectos que pueden ser analizados es la posición en la que se encuentra el mayor y mínimo esfuerzo. Por lo que la simulación funcionará como una herramienta para poder tener una idea más clara de la manera en que la probeta reacciona al someterla a tensión. Además, estas simulaciones, podrían funcionar, en el futuro, como una solución para analizar situaciones reales en las que se pretenda utilizar piezas impresas en policarbonato.

Tipo de simulación:

ANSYS brinda la posibilidad de realizar distintos análisis y de simular diferentes condiciones que afecten el elemento que se está analizando. En el caso de los ensayos a tensión, se está analizando la estructura de la probeta aplicándole cierta fuerza para que esta se deforme. En el siguiente protocolo se presenta una simulación tanto en el sistema *Static Structural* como en el sistema *Explicit Dynamics*.

Al realizar el análisis *Static Structural*, se aplica una única fuerza a la probeta y se analiza la respuesta de la misma, afectada por esta fuerza de manera constante. Esta simulación es de ayuda para identificar el comportamiento de la probeta cuando es sometida a cierta fuerza, como lo sería la fuerza máxima que soportó antes de fracturarse. La diferencia con el análisis a tensión es que la fuerza no tendrá variación con el tiempo.

Para poder realizar un análisis en el cual la fuerza varíe en el tiempo se utiliza el sistema *Explicit Dynamics*. En esta simulación se brindará una fuerza máxima y el ensayo la aplicará de manera creciente en el tiempo, iniciando en 0. Además, mediante esta simulación se podrá ver la fractura de la probeta, causada por la fuerza máxima aplicada.

Al abrir el Workbench de ANSYS se inicia un nuevo proyecto, en el cual de lado izquierdo aparecen los distintos sistemas en los que se pueden realizar las simulaciones. La Figura 25 hace referencia a la posición en la que se encuentran los análisis que se realizarán en esta prueba. Primero se seleccionará el sistema *Static Structural* y luego se seleccionará el sistema *Explicit Dynamics*. Al seleccionar el segundo sistema, este se arrastrará hasta el esquema del proyecto colocando el cursor sobre el modelo del primer sistema. Al realizar esto se creará un enlace entre el material, la geometría y el modelo del análisis *Static Structural* con el otro sistema. Es posible apreciar este enlace en la Figura 26.

Figura 25 Selección de sistema de análisis



Fuente: Elaboración propia

Figura 26 Enlace de material y geometría

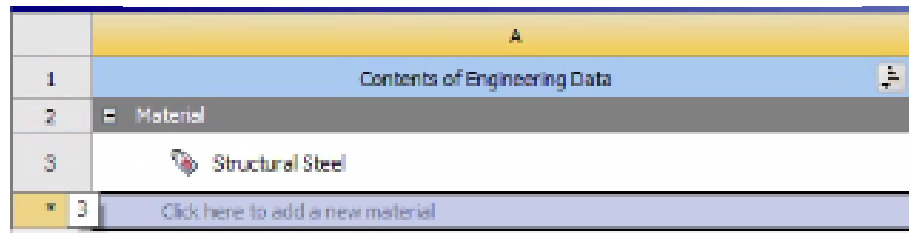


Fuente: Elaboración propia

Material:

ANSYS brinda una biblioteca con una amplia variedad de materiales con distintas propiedades para los diferentes análisis. En el caso de la simulación de los ensayos a tensión será necesario crear el material, utilizando las propiedades obtenidas de los ensayos a tensión. En la Figura 26 se puede observar la opción de *Engineering Data*, y para poder crear el material será necesario seleccionarla. Al momento de ingresar en esta opción se presenta una tabla como la que se observa en la Figura 27 y en la parte subrayada es en donde se nombra el material que se desea crear.

Figura 27 Opción para crear material



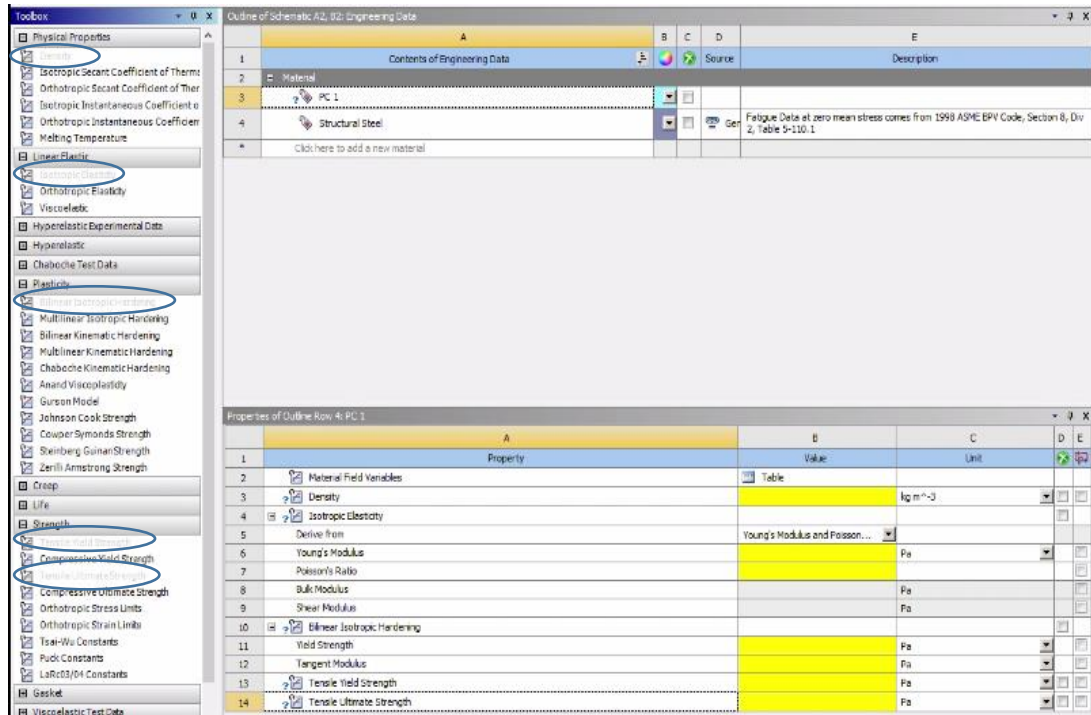
Fuente: Elaboración propia

Una vez ingresado el nombre del material se procede a asignar las distintas propiedades que lo definirán. En este caso se asignarán las siguientes propiedades: *Density*, *Isotropic Elasticity*, *Bilinear Isotropic Hardening*, *Tensile Yield Strength* y *Tensile Ultimate Strength*. Para poder ingresar estas propiedades es necesario dar doble *click* sobre cada una de ellas y es posible encontrarlas del lado izquierdo de la pantalla, como se presenta en la Figura 28.

En la parte inferior de la pantalla se encuentra una tabla en la que son ingresados los valores que definen las propiedades, como se puede observar en la Figura 28, y son los recuadros amarillos los que necesitan ser llenados. Al ingresar los valores, asegurarse que las dimensiones que estén seleccionadas sean las correctas, para cambiarlas solo se deben buscar en el listado de la columna *Units*. El programa da la posibilidad de ingresar la temperatura a la que las pruebas fueron realizadas. Al colocarse sobre cada uno de los valores a ingresar, en el lado superior izquierdo de la pantalla se puede ingresar el valor y la temperatura a la que fue obtenido. Si el usuario realizará pruebas a distintas temperaturas, tiene la posibilidad de incluir esto en las propiedades del material.

Según la ficha técnica del filamento de policarbonato, brindada por Ultimaker, su densidad se encuentra entre 1.18 y 1.20 g/cm³, por lo que se ingresará el valor de 1.19 g/cm³ en la casilla designada para *Density*. En las casillas *Young's Modulus*, *Yield Strength*, *Tensile Yield Strength* y *Tensile Ultimate Strength* se ingresarán los valores de Módulo de Young, Resistencia a la Fluencia (tanto para *Yield Strength* como para *Tensile Yield Strength*) y Resistencia Última, obtenidos de la Hoja de Cálculo, respectivamente.

Figura 28 Configuración de material en ANSYS



Fuente: Elaboración propia

Relación de Poisson:

Una de las propiedades requeridas para poder realizar la simulación es la relación de Poisson (Poisson's Ratio). Para poder realizar el cálculo de este valor se necesita la deformación axial ($d\varepsilon_a$) y la deformación tangencial ($d\varepsilon_t$) de la probeta. La deformación axial es representada por el alargamiento y la tangencial se representa por la disminución del grosor de la probeta (w_i). Para poder encontrar estos valores es necesario el uso de dos extensómetros, uno para la parte axial y otro para la parte tangencial. La ecuación que se presenta a continuación es utilizada para el cálculo del mismo:

$$|\mu| = \frac{d\varepsilon_t/dP}{d\varepsilon_a/dP} = \frac{d\varepsilon_t}{d\varepsilon_a}$$

Ecuación 5. Relación de Poisson.

Para el cálculo de este valor se dibuja una recta que representa la Módulo entre estas variables, donde la deformación transversal representa x y la deformación axial representa y. La relación de Poisson es la pendiente de esta recta. Para resolver esto se utilizará el método de mínimos cuadrados. Por lo que para calcular esta relación se utiliza la siguiente ecuación:

$$|\mu| = \frac{n \cdot \sum(\varepsilon_a \cdot \varepsilon_t) - \sum \varepsilon_a \cdot \sum \varepsilon_t}{n \cdot \sum \varepsilon_a^2 - |\sum \varepsilon_a|^2}$$

Ecuación 6. Método de mínimos cuadrados

En donde ε_a representa la deformación axial de la probeta, ε_t representa la deformación tangencial y n representa el número de datos recabados.

Puede darse el caso en el que, el cálculo de esta relación no sea posible por la falta de uno de los extensómetros. Es por lo que se sugerirá un valor para cada una de las orientaciones en las que se posicionarán las probetas. Estos valores sugeridos son de ensayos realizados a probetas impresas con policarbonato y acondicionadas según la norma ASTM. Para identificar cada una de las orientaciones referirse a Anexo B.

Cuadro 9 Relación de Poisson para distintas orientaciones de impresión

Orientación	Módulo de Poisson
Plana	0.29
Borde	0.38
Vertical	0.31

Fuente: Cantrell, y otros, 2017, Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts

Módulo tangente:

Otro de los parámetros que se requieren para la simulación es el módulo tangente (*Tangent Modulus*). Este valor brinda una aproximación del comportamiento de la probeta en el área plástica. Esto solamente es una aproximación ya que representa el área plástica como una recta. El módulo tangente es la pendiente de esta recta. Para tener una mejor aproximación se calculará la pendiente entre la resistencia última y la resistencia a la fluencia. A continuación, se presenta la ecuación para encontrar este valor:

$$\text{Módulo Tangente} = \frac{\sigma_{ult} - \sigma_y}{\varepsilon_{ult} - \varepsilon_y}$$

Ecuación 7. Módulo tangente

En donde σ_{ult} representa la resistencia última, σ_y representa la resistencia a la fluencia, ε_{ult} representa la deformación en el punto de esfuerzo último y ε_y representa la deformación en el punto de fluencia.

Geometría:

Para insertar cada geometría en la simulación se dará *click* derecho sobre *Geometry* en el sistema de *Static Structural*, el cual se encuentra en la Figura 26. El menú que se despliega muestra la opción *Import Geometry* y aquí se seleccionará *Browse*. Esto abrirá la

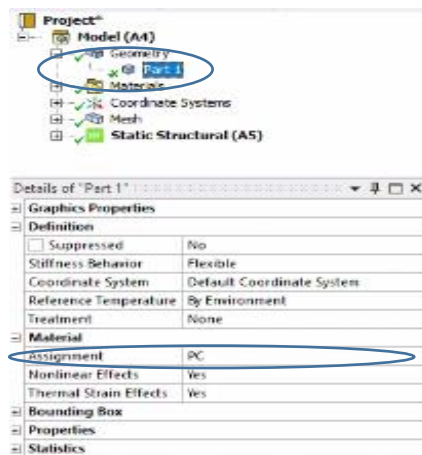
carpeta de archivos en donde se deberá buscar el lugar en donde se encuentren almacenadas las geometrías.

Cuando se realicen las simulaciones de las probetas con porcentaje de relleno del 100% se utilizará como geometría el modelo de la probeta sólida. En el caso de las probetas con otros porcentajes de error, será necesario que el usuario inserte las geometrías con una representación del patrón de relleno, de esta manera la simulación será lo más apegada a la realidad. Por esta razón se deberán recrear los patrones de relleno, haciendo uso de un software de moldeo, como lo es inventor. Para generar los patrones se deberá utilizar como guía la geometría generada por CURA y los parámetros de impresión que brinda este programa.

Configuraciones del material en la simulación:

Para poder ingresar en la simulación será necesario ingresar en la opción de *Model*, la cual se puede observar en la Figura 26. Al ingresar a la simulación, en el lado izquierdo de la pantalla, se encuentra la opción de geometría y al abrirla aparece la pieza que se analizará (*Part 1*), como se observa en la Figura 29. Al posicionarse sobre el nombre de la probeta en la parte inferior izquierda de la pantalla aparece una tabla con los detalles de la pieza. Una de las opciones es el material y al abrirlo, en la parte que dice *Assignment* es posible elegir el material como en la Figura 29. Al presionar esta parte es posible desglosar los materiales y se debe elegir el material que se creó anteriormente.

Figura 29 Asignación de material a la probeta



Fuente: Elaboración propia

Mallado:

El mallado, en la geometría de análisis, permite realizar un análisis más profundo de los componentes internos del elemento a analizar. Esto se realiza dividiendo toda la pieza en elementos pequeños y de esta manera la simulación hace un análisis de cada uno de estos

elementos. Muchas veces el mallado que trae por default la pieza no es lo suficientemente bueno, por lo que el programa permite aplicar métodos para mejorar este mallado. El mallado será el mismo para ambos sistemas.

Para comenzar se generará, en todas las simulaciones, el mallado default. Por ello será necesario dar *click* derecho sobre la opción de *mesh* que se observa en la Figura 29, esto despliega la opción de *generate*. En dado caso, el mallado default no sea generado, será necesario verificar el error o la razón por la que no permite generarlo. Generalmente esto sucede por tener geometrías muy pequeñas o complejas. Por lo que, si el mallado default no es generado, será necesario simplificar o modificar estas geometrías hasta que sea posible para ANSYS generar un mallado básico.

Al colocarse sobre la opción de *Mesh*, en la parte inferior izquierda aparece una tabla con los detalles del mallado, como la que se muestra en la Figura 30. En esta tabla será necesario desglosar *Quality*, en la cual aparecen distintas formas de medir la calidad del mallado, en la opción *Mesh Metric*, la cual al desplegarla nos brinda distintas opciones. Para este mallado se analizará la calidad mediante *Skewness* y *Orthogonal Quality*. Estas despliegan ciertos datos estadísticos sobre los elementos del mallado; para verificar si el mallado es adecuada se utilizará el valor de *Avarage*. Para el *Skewness* un valor cercano a 0 y para *Orthogonal Quality* un valor cercano a 1, indican un mallado de calidad. Con el mallado default, por lo general, no se logran alcanzar una alta calidad de mallado. Por esta razón será necesario agregar ciertas opciones para mejorar el mallado, si la geometría lo permite.

Figura 30 Tabla de detalle del mallado

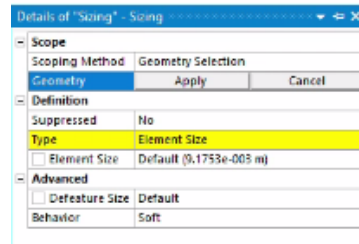
Details of "Mesh"	
+ Display	
+ Defaults	
+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1.3058e-010
<input type="checkbox"/> Max	0.37439
<input type="checkbox"/> Average	6.026e-002
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.547e-002
+ Inflation	
+ Advanced	
+ Statistics	

Fuente: Elaboración propia

Para poder generar una mejora en el mallado, se iniciará insertando un *Sizing*, el cual reduce el tamaño del mallado para que el análisis sea más profundo. Al igual que para generar el mallado, será necesario dar *click* derecho en la opción *mesh* y buscar la opción *Insert*; aquí se seleccionará la opción de *Sizing*. Al seleccionar la opción se desplegará una tabla como la que se muestra en la Figura 31. Para poder aplicar esta opción será necesario seleccionar toda la geometría y presionar *Apply*. Luego se deberá ingresar el tamaño que se quiere dar a cada elemento. El valor que se ingrese en esta parte depende de la geometría, debe colocarse un valor más pequeño que el tamaño del elemento más pequeño de la

probeta. Luego nuevamente se deberá generar el mallado y verificar la calidad del mallado en este punto. En dado caso no se logró generar un *sizing* en el mallado, por limitaciones del software, se deberá realizar la simulación con el mallado default.

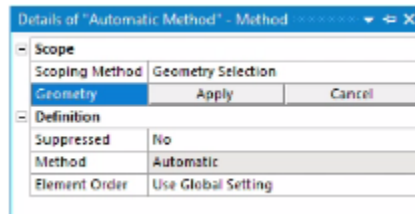
Figura 31 Tabla con detalles sobre el sizing



Fuente: Elaboración propia

Por último, si se desea seguir mejorando la calidad del mallado, es posible insertar la opción *Method*, mediante la cual es posible generar elementos uniformes que permiten tener un mejor mallado. Para poder agregar un método es necesario dar *click* derecho sobre *mesh* y en *insert* seleccionar la opción de *Method*, la cual al seleccionarla, despliega una tabla, en la parte inferior izquierda de la pantalla, como se muestra en la Figura 32. Para empezar, se seleccionará la geometría completa y se presionará la opción *Apply*, de esta manera el método será aplicado a la geometría completa. Y luego en la opción *Method*, se desplegarán las distintas opciones que pueden ser aplicadas. Se realizarán pruebas con los distintos métodos, hasta encontrar el que sea posible generar en la geometría y que permita una mejor calidad del mallado. Si en dado caso, no es posible aplicar ningún método, será necesario realizar la simulación solo con el *sizing* aplicado.

Figura 32 Tabla de detalles del método de mallado



Fuente: Elaboración propia

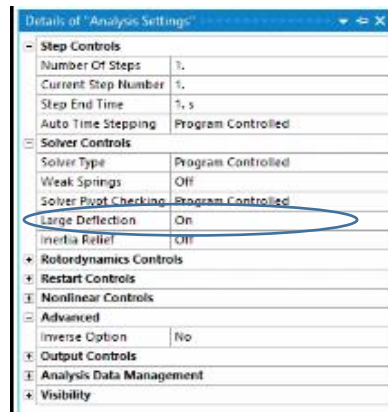
Condiciones iniciales:

Las condiciones iniciales se aplicarán a las probetas para poder simular la prueba a tensión. Estas condiciones serán diferentes en cada uno de los sistemas en los que se harán las simulaciones. A continuación, se presenta la guía para colocar estas condiciones iniciales en cada una de las simulaciones.

Static Structural:

Para iniciar se activará la opción *Large Deflection*, la cual permite que las deformaciones en la pieza puedan ser simuladas. Para poder realizar se extiende la opción *Static Structural*, la cual se encuentra en el lado izquierdo de la pantalla, y en ella será necesario posicionarse sobre *Analysis Settings*. Al realizar esto se despliega una tabla, como la que se muestra en la Figura 33. Aquí encontrará *Large Deflection* y será necesario activarla colocando la opción en *On*.

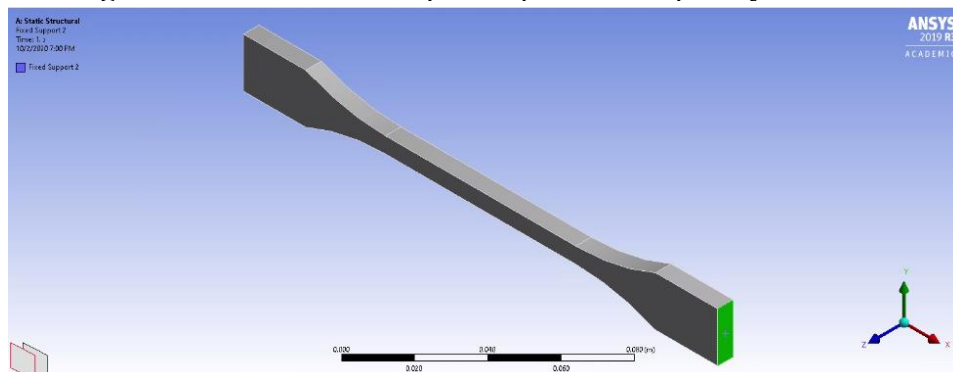
Figura 33 Tabla de detalles Analysis Settings.



Fuente: Elaboración propia

A la probeta se le aplicará una fuerza de un lado y del lado opuesto se le aplicará un soporte. Para ello se da un *click* derecho sobre *Static Structural* y en la lista que se despliega de la opción *Insert*, seleccionar *Fixed Support*. Esto desplegará una tabla en la parte inferior izquierda de la pantalla y lo único que se deberá indicar es la geometría a la cual se le colocará el soporte. Esta geometría es la que se indica en la Figura 34, al seleccionarla se deberá presionar *Apply* para fijar esta geometría.

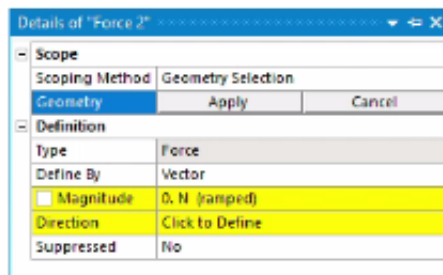
Figura 34 Geometría en la que se aplicará el soporte y la fuerza



Fuente: Elaboración propia

Lo siguiente será aplicar la fuerza, la cual se aplicará en la geometría contraria a la que se muestra en la Figura 34. Para ello se da *click* derecho sobre *Static Structural*, al igual que para aplicar el soporte, y se seleccionará en *Insert* la opción de *Force*. Esta opción desplegará la tabla que se presenta en la Figura 35. Lo primero que deberá realizarse será asignar la geometría en la cual estará aplicada la fuerza, esta se pondrá en el lado contrario a la geometría que se utilizó en el soporte y se aplicará de la misma manera. Lo siguiente a configurar será la magnitud de la fuerza que se aplicará, esto se puede colocar en *Magnitud*, y este valor tiene como dimensional Newton. Además, será necesario verificar que la dirección de la fuerza sea contraria a la probeta, para que la tensión sea aplicada. Las fuerzas que deben colocarse aquí son la fuerza de rotura, la fuerza del punto de fluencia y la fuerza de la resistencia última. Con estas tres fuerzas se podrá analizar el comportamiento de la probeta en los tres puntos más importantes del ensayo.

Figura 35 Tabla de detalles de la fuerza aplicada



Fuente: Elaboración propia

Explicit Dynamics:

Las condiciones iniciales serán aplicadas de manera distinta en este ensayo, para que de esta manera pueda ser observada la fractura de la probeta de manera adecuada. Para iniciar se realizará la selección de los nodos para la aplicación de la fuerza, esto se realizará habilitando la selección de nodos. Para habilitar esta selección se debe posicionar, la barra de selección, que se encuentra en la parte superior del área de simulación, como se muestra en la Figura 36. En la opción *Select*, deberá habilitarse *Mode*, el cual se encuentra en el listado disponible de esta opción. Además, se deberá seleccionar el cubo que está encerrado en un círculo en la Figura 36.

Figura 36 Barra de selección

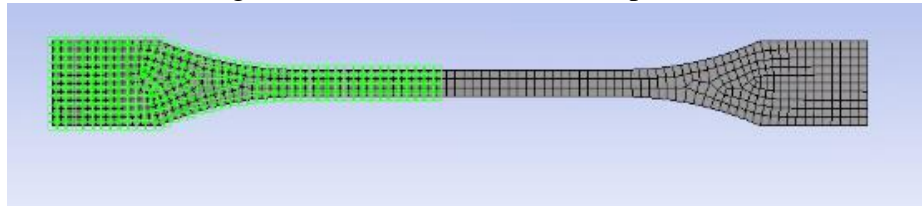


Fuente: Elaboración propia

Una vez se ha habilitado la selección que se desea, se procede a realizar una selección de los nodos a los que se les aplicará la fuerza. Se realiza una selección justo a la mitad de la probeta al derecho y al revés de la misma, como se muestra en la Figura 37. Para seleccionar los dos lados de la probeta, mantener presionado control, al realizar ambas

selecciones. Una vez las dos selecciones estén realizadas se deberá dar *click* derecho sobre la probeta y se seleccionará *Created Named Selection*. Esto desplegará un menú en el cual se nombrará la selección como lado 1 y se dará *click* en *OK*. Realizar el mismo procedimiento en la otra mitad de la probeta, nombrar este como lado 2 esta selección.

Figura 37 Selección de nodos en probeta.



Fuente: Elaboración propia

En este caso se aplicará una fuerza nodal en cada una de las selecciones realizadas. Para crear la fuerza nodal será necesario hacer *click* derecho en *Explicit Dynamics*, esta opción se encuentra en el lado izquierdo de la pantalla. Con las opciones que se despliegan se debe seleccionar *Insert* y agregar la condición *Nodal Force*. La tabla que despliega esta opción se encuentra en la Figura 38 y en ella se debe configurar la selección que se utilizará y la fuerza que se le aplicará en la probeta. En *Named Selection* será necesario elegir lado 1, este nombre es el que se colocó en la selección y en *X Component* se deberá colocar la magnitud de la fuerza que se quiere evaluar. Este mismo procedimiento debe ser aplicado para el otro lado de la probeta con las siguientes modificaciones. En *Named Selection* se elegirá lado 2 y en la magnitud de la fuerza serpa la misma solo que aplicándole signo negativo. Al realizar la simulación será necesario verificar que las fuerzas estén tensionando la probeta y no comprimiéndola. Si se diera el caso en que las probetas están siendo comprimidas, se deberá cambiar la dirección de la magnitud en ambas fuerzas nodales.

Figura 38 Tabla de detalles de fuerza nodal

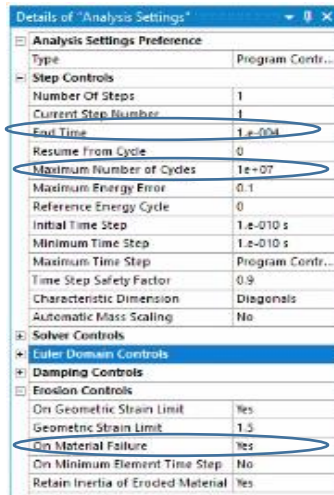
Details of "Nodal Force"	
Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	
Definition	
Type	Force
Coordinate System	Nodal Coordinate System
X Component	0. N (step applied)
Y Component	0. N (step applied)
Z Component	0. N (step applied)
Divide Load by Nodes	Yes
Suppressed	No

Fuente: Elaboración propia

Por último, se deberán realizar algunas modificaciones en *Analysis Settings*, la cual es una opción de *Explicit Dynamics*. Al posicionarse sobre esta opción se despliega la tabla de la Figura 39, con los detalles de *Analysis Settings*, aquí deberá configurarse *End Time* con el valor de 0.0001 y *Maximum Number of Cycles* con 10000. Por último, se deberá

habilitar la opción *On Material Failure*, para que la fractura sea visible, seleccionando *Yes* en las opciones que despliega.

Figura 39 Tabla de detalles de Analysis Settings



Fuente: Elaboración propia.

Análisis:

El último paso, antes de correr la simulación, es definir el análisis que se realizará a la probeta. Tanto en la opción de *Static Structural* y *Explicit Dynamics*, que se encuentran en el lado izquierdo de la pantalla, se puede encontrar la opción *Solution* y al darle *click* derecho se buscará *Insert*. En el Cuadro 10 se presentan las opciones que deben ser elegidas para cada análisis.

Cuadro 10 Datos que serán analizados para cada sistema

	<i>Static Structural</i>	<i>Dynamics</i>
<i>Deformation – Total</i>	X	X
<i>Strain –Equivalent (Von mises)</i>	X	X
<i>Strain – Normal</i>	X	X
<i>Strain – Equivalent Plastic</i>		X
<i>Stress –Equivalent (Von mises)</i>	X	X
<i>Stress Tool – Max Tensile Stress</i>	X	

Fuente: Elaboración propia

Por último, se presionará el botón *Solve*, el cual se encuentra en la barra superior de configuraciones. La simulación estará hecha y será posible ver los resultados de cada uno de los análisis asignados. Esto podrá realizarse con los posicionarse sobre cada una de estas soluciones. Normalmente se presentará una diferencia de colores, en donde rojo representa el valor más alto y azul el valor más bajo. Además, se presentará un rango de valores en la parte izquierda superior de la simulación, en el cual se podrá observar cuanto varían los datos de las soluciones.