



Desarrollo de Banco Automatizado para Ensayos de Polímeros Utilizados en Impresión 3D

Development of automated testing machine for polymers used in 3D printing

Presentación: 15/02/2020

Aprobación: 13/05/2020

Mainetti Carlos

Grupo de Estudio sobre Energía, Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional, 11 de Abril 461, 8000 Bahía Blanca - Argentina.
mainetti@frbb.utn.edu.ar

Romero Andrés

Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional, 11 de Abril 461, 8000 Bahía Blanca - Argentina.
andresrom147@hotmail.com

Piovan Marcelo

Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional, 11 de Abril 461, 8000 Bahía Blanca - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Argentina
mpiovan@frbb.utn.edu.ar

Resumen:

En este trabajo se presenta el desarrollo, construcción y uso de un banco de ensayo para medir las características elásticas de los plásticos utilizados en máquinas de impresión 3D por deposición de filamento polimérico. Productos impresos de utilidad industrial o comercial requieren contar con equipamientos adecuados para la determinación de sus propiedades elásticas o la de los polímeros usados. Tales equipamientos suelen ser onerosos y no siempre cuentan con accesorios para ensayos en plásticos. El equipo desarrollado en este artículo emplea placas Arduino, sensores apropiados y programación en MATLAB para efectuar el control y registro de desplazamiento y fuerza. El mismo ofrece ventajas económicas, sin perder calidad de medición, que lo hacen asequible a cualquier establecimiento educativo o centro de investigación con su consiguiente beneficio. Para evidenciar su utilidad, se efectúan contrastes con máquinas profesionales mediante caracterizaciones de propiedades elásticas de polímeros usados en impresión 3D.

Palabras clave: Polímeros de impresión 3D. Banco de pruebas de bajo costo.

Abstract

This paper presents the development, construction and use of a test bench to measure the elastic characteristics of plastics used in 3D printing machines by polymeric filament deposition. Printed products of industrial or commercial utility require adequate equipment to determine their elastic properties or that of the polymers used. Such equipment is usually expensive and does not always have accessories for tests on plastics. The equipment developed in this article uses Arduino boards, appropriate sensors and programming in MATLAB to carry out the control and registration of displacement and force. It offers economic advantages, without losing measurement quality, which makes it affordable to any educational establishment or research center with its consequent advantage. To demonstrate its usefulness, contrasts are made with professional machines by characterizing elastic properties of polymers used in 3D printing.

Keywords: Polymers for 3D printing. Low cost testing machine.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de impresión 3D por deposición de filamento fundido (FDM) utilizan plásticos para la realización de piezas de utilidad. Las características intrínsecas de dichos materiales resultan determinantes en la resistencia mecánica de la estructura definitiva del cuerpo impreso (Canesa et al, 2013, pp 19-60; Dizon et al., 2018). Asimismo, la forma o la orientación de la deposición del material también influirán en la distribución de esfuerzos en la estructura. De aquí nace la necesidad de analizar la respuesta de dicha estructura con ensayos de resistencia convencionales.

Si bien las tecnologías de construcción aditivas (o impresión 3D) son conocidas para realización de prototipos desde la década de 1980, la necesidad de contar con información ingenieril comenzó tíbiamente hace unos 20 años (Ahn et al, 2002, Rodriguez et al., 2000, entre otros) y en los últimos 5/6 años cobró extraordinario interés debido al crecimiento exponencial de las ventas de equipos y productos asociados a impresión 3D (Tymrak et al., 2014; Dizon et al, 2018; Caminero et al., 2019).

Una revisión sopesada en el estado del arte referente al estudio de propiedades elásticas de piezas hechas por construcción aditiva (Dizón et al, 2018; Forster, 2015; Tymrak et al., 2014) revela la gran dispersión de resultados, complejidad de situaciones y limitaciones que todavía existen a pesar de los más de 400 artículos científico-técnicos que se han publicado en los últimos 6 años. Los principales aspectos de complejidad y limitación residen en la aun llamativa ausencia de normas y estándares específicos para ensayos de piezas impresas (optándose por el uso de las normas homónimas para materiales plásticos inyectados o bien laminados compuestos, con sus debidos recaudos, según se explicita en el trabajo de Forster, 2015). Otro de los problemas suele hallarse en la clase de equipos necesarios para efectuar los ensayos con sus debidos aditamentos que no siempre son accesibles desde el punto de vista económico, logístico y/o temporal (es decir en caso de tener laboratorios cercanos pero que tienen mucha demanda de uso). Finalmente, el problema más acuciente de la caracterización elástica y mecánica de piezas impresas reside en que la mayoría de las

piezas impresas por método FDM están conformadas por una cáscara de un cierto espesor y un relleno interno con diferentes clases de formas (en tramados rejilla, panal de abeja, circular, etc.) que hace más compleja la construcción de un modelo meso-estructural para prescribir el comportamiento elástico del cuerpo.

En virtud del precedente contexto y ante la necesidad de describir y dar información sólida sobre el comportamiento mecánico/elástico de piezas impresas, los autores han diseñado y construido una máquina de ensayo de banco y portable, para poder caracterizar las propiedades elásticas y mecánicas de piezas construidas con impresoras 3D bajo el método de deposición de polímeros fundidos. Esta máquina, como se verá en los próximos apartados, fue pensada para permitir efectuar con suficiente comodidad la mayoría de ensayos típicos y algunos específicos en probetas plásticas impresas siguiendo la concepción básica de varias normas internacionales de plásticos inyectados y/o plásticos reforzados con fibras (es decir ISO o ASTM). En el desarrollo de este equipo, se han evaluado otros desarrollos de equipos académicos publicados en la literatura técnica internacional tales como los efectuados por Simbeye (2016) y Huerta et al. (2010), cuyas características tienen puntos de contacto con el presente desarrollo en cuanto que son automatizadas y pensadas para cargas relativamente bajas debido a su finalidad, aunque no exentas de ciertas complejidades funcionales. Sin embargo los autores consideran que se puede realizar el mismo trabajo recurriendo a una mecánica y automatización más simples y costo moderado en su construcción.

A continuación, los contenidos se estructuran de la siguiente manera: en primer lugar se describen los criterios de diseño propuestos y la configuración general de la máquina de ensayo, luego se describen los sistemas de funcionamiento control, programación, ensayo y registro de datos. Se presenta una comparación de la respuesta de la máquina con una máquina de ensayo profesional INSTROM 33691 (perteneciente a un laboratorio del CONICET: PLAPIQUI) a modo de verificación del comportamiento mecánico/estructural de la máquina y la calidad de medición para algunos polímeros de impresión 3D. Luego se presenta un somero estudio sobre de las propiedades elásticas de un tipo de plástico empleado en las impresoras 3D, en concreto, se medirán los módulos de elasticidad a tracción y límites de resistencia elásticos y de rotura bajo carga estática. Finalmente se elaboran las conclusiones sobre la utilidad de la máquina, sus beneficios, ventajas y recaudos a tomar durante los ensayos.

CRITERIOS CONSTRUCTIVOS Y DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYO

La concepción y el diseño de esta máquina se nutren de prototipos construidos ad-hoc por los autores en base a homónimos equipos académicos de las firmas PASCO y GUNT Machinen, principalmente por la disponibilidad de sensores (carga, rotación, desplazamiento, etc.) de tales marcas en los laboratorios de la institución.

Para conducir y auxiliar el proceso de diseño y futura construcción se han adoptado los siguientes criterios, condiciones y objetivos, de manera que el banco de ensayo:

- a) Sea de fácil construcción, manipulación, mantenimiento y traslado.
- b) Sea automatizado y controlable por computadora.
- c) Permita el uso con sensores e instrumentos disponibles en los laboratorios.
- d) Permita por lo menos los ensayos de tracción, flexión según ISO o ASTM.
- e) Facilite algún ensayo con sollicitaciones tangenciales entre otros.

Bajo estos supuestos se ha diseñado y construido un prototipo base, cuyo conjunto operacional ensamblado y sin carcasa estética puede verse en la Figura 1. La máquina se sustenta en una bancada metálica, en uno de cuyos lados se encuentra montado el conjunto operativo conformado por motor/reductor y embolo tractivo accionado por tornillo de potencia. Al otro extremo del tornillo está adosado un cabezal con mordaza para sujetar la probeta, según se ve en Figura 2(a). En el otro lado de la bancada se ubica el conjunto fijación constituido por eje colineal al tornillo que porta el otro cabezal con mordaza y este, a su vez, conectado a una celda de carga anclada a la bancada, según se ve en Figura 2(b). El comando del tornillo de potencia se realiza a través de una reducción por medio de una correa sincrónica que es operada por un motor de corriente continua controlado mediante la técnica Pulse Width Modulation (PWM), tal como se verá más adelante.



Figura 1.- Sistema de medición

El control del motor y la adquisición de datos provenientes de la celda de carga se realizan a través de una placa microcontroladora de aplicación general Arduino. A su vez, esta placa se encuentra conectada vía un cable de comunicación a una computadora, en la cual se ejecuta una aplicación desarrollada en MATLAB, que permite configurar el sistema de medición, manipulación y registro de datos experimentales, y curvas de evolución del ensayo. En la Figura 3 se puede observar la pantalla de comando de la aplicación MATLAB que controla todo el sistema. Hay tres magnitudes que se registran instante a instante: desplazamiento del cabezal móvil, fuerza activa y velocidad de avance del tornillo (la cual es necesaria para estipular la velocidad de deformación en el ensayo).



Figura 2.- (a) Cabezal tractor con tornillo de potencia, (b) cabezales con celda de carga.

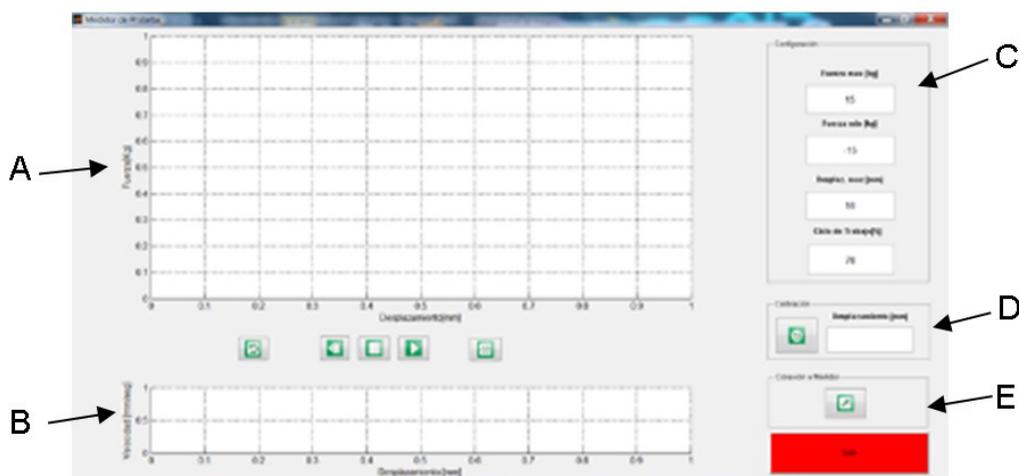


Figura 3.- Interface de MATLAB.

En la interfaz de Matlab se destacan distintas zonas demarcadas como:

- A: gráfica xy en el cual se imprime la respuesta de la probeta, desplazamiento de las mordazas (en mm) en función de la fuerza aplicada a la muestra (kg).
- B: gráfica xy donde se muestra la velocidad lineal de la prueba (mm/seg).
- C: configuraciones de la fuerza máxima y mínima de la prueba (kg), el desplazamiento máximo esperado (mm) y velocidad de la prueba (en porcentual).
- D: calibración del sistema en donde se inicializa la celda de carga, se precarga la probeta y se muestra el desplazamiento inicial obtenido.
- E: botón para inicializar la comunicación entre el sistema de medición y Matlab.

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DEL BANCO

Los ensayos requieren del conocimiento en todo instante de dos magnitudes: la elongación o deformación de la probeta y la fuerza aplicada a la misma. A su vez también es necesario conocer la velocidad de deformación, pero la misma es fija durante todo el ensayo y su control está asociado a la uniformidad del proceso de deformación en el espécimen. Entonces, como se conoce la relación existente entre el desplazamiento lineal del tornillo y el movimiento angular de la salida del reductor del motor, puede controlarse el desplazamiento del tornillo d . Para ello en el eje de salida del reductor planetario del motor de corriente continua hay fijado un disco con 36 ranuras, el cual interactúa con un opto-acoplador brindando un pulso digital cada 10 grados de rotación. La medición de dichos pulsos junto con la relación de cadena cinemática asociada (piñón - correa sincrónica - corona y tornillo de desplazamiento del embolo) determina el desplazamiento efectivo del cabezal móvil así como también su velocidad dada la base de tiempo asociada.

$$d = \frac{\omega_{pulsos} \cdot d_t}{R} \frac{mm}{pulsos} \quad (1)$$

Donde ω_{pulso} es la resolución del motor CC por pulso generado [°/pulso], d_t es el desplazamiento lineal del tornillo de tracción por vuelta [mm/360°] y R es la relación de transmisión entre el motor y el tornillo. Por otro lado, el registro de fuerza se realiza a través de una celda de carga. En la Figura 4 se observa un esquema del sistema de control propuesto para el banco de pruebas.

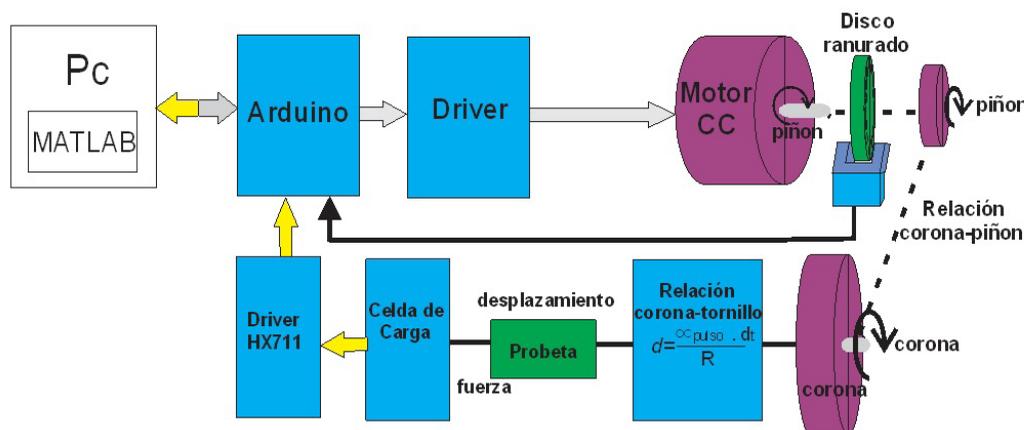


Figura 4.- Sistema de control abierto implementado.

A fin de minimizar el ruido existente en el sistema de medición, se establecieron diferentes mecanismos de mitigación. Entre ellas se mantuvo el cable original, compensado en temperatura, de la celda de carga, se unificaron las mallas del sistema junto con la masa de la celda, se colocó un filtro pasa bajos entre la celda y el amplificador de instrumentación (HX711), se minimizó el largo del conexionado entre la placa HX711 con el Arduino. Además, fue necesario la colocación de filtros de bypass (capacitores) entre los puntos de alimentación del motor y masa. Luego, a nivel de software, dado la variación existente en la medición de fuerza, se estableció la media de las lecturas recibidas de la celda. Luego de varios de ensayos se determinó que luego de un mínimo de 5 lecturas sostenidas, se obtiene una respuesta estable.

CALIBRACION DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO

El sistema de tracción consta de un embolo de tracción operado por un tornillo de potencia solidario a una corona de 145 dientes conectada al piñón del motor por una correa sincrónica, tal como se muestra en la Figura 5. El tornillo de precisión tiene un avance de 1 mm/vuelta, dotando en consecuencia del mismo avance al embolo de tracción. El piñón, solidario a la salida del reductor posee 16 dientes. En consecuencia, la relación de transmisión de reducción es 9.06.

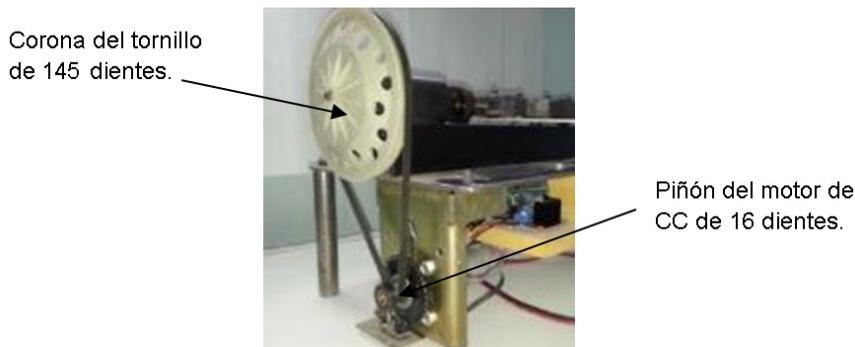


Figura 5.- Sistema de tracción

Las características del motor de corriente continua son: Tensión de alimentación (V_{dc}) de 24 V, Consumo de Corriente (I_{dc}) de 1,4 A, Resolución ($^{\circ}$ /pulso) de 10 grados. A continuación, se realiza los cálculos para hallar cuantos milímetros se desplaza el eje cuando el motor rote y genere un pulso:

$$d = \frac{\alpha_{pulso} \cdot d_t}{R} = \frac{10^{\circ} \cdot 1mm}{9,06 \cdot 360^{\circ}} = \frac{1}{326,16} \frac{mm}{pulso} = 0,003066 \frac{mm}{pulso} \quad (2)$$

Luego la cantidad de pulsos necesarios para desplazar 10 mm el émbolo será:

$$p = 10mm \cdot 326,16 \frac{pulso}{mm} = 3261 pulsos \quad (3)$$

El control del motor se realiza a través de la placa Arduino UNO R3, la cual envía una secuencia de pulsos PWM para obtener una rotación controlada. En virtud de las características de éste motor, cada pulso emitido por el disco ranurado representa una rotación de 10 grados. El algoritmo de control se establece de modo tal que cada 250 milisegundos se realiza un conteo de los pulsos recibidos, estableciéndose de este modo el desplazamiento realizado, la velocidad y la fuerza aplicada a la probeta a través de la celda de carga. O sea, a cada rotación le corresponde un desplazamiento de la mordaza móvil que deforma la probeta, haciendo así sentir su efecto sobre la mordaza fija solidaria a la celda de carga.

CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE FUERZA

Para obtener registros precisos es necesario calibrar la celda de carga antes de comenzar con la medición, para ello el sistema prevé una inicialización, en la cual básicamente se debe hallar el valor de escala a emplear en el ensayo. Es decir que se debe hallar el factor de conversión para adaptar el valor de lectura eléctrica (n) en un valor con unidades de fuerza (kg). La escala es diferente para cada celda y cambia de acuerdo a la forma de instalación, al peso máximo o modelo de celda de carga, incluso así se trate del mismo modelo de celda no necesariamente tienen el mismo valor de escala.

La celda de carga empleada fue una del tipo S de la marca REACCION modelo CZC500. Internamente posee un puente de galgas extensiométricas y cuyas especificaciones técnicas son: Tensión máxima de 15 V, Capacidad de 500 kg, Sensibilidad de $S=2$ mV/V y Resistencia

del puente 350Ω .

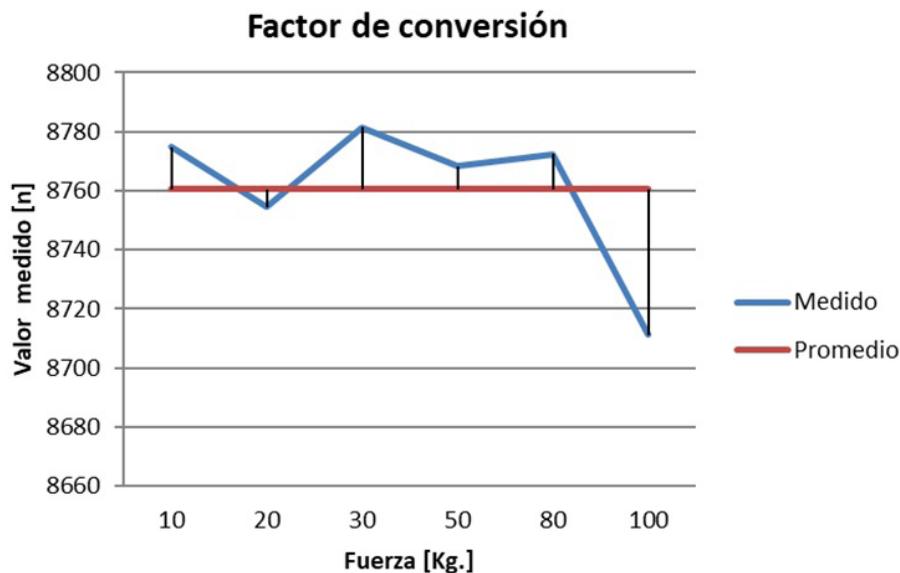


Figura 6.- Valores de escala medidos para calibración.

Para calibrar el sistema es necesario colocar una carga conocida. En este caso se utilizó un sistema de medición adicional calibrado, en serie con el sistema a implementar, y se emplearon cargas patrón del orden de la magnitud de fuerzas a utilizar en los ensayos. En la Figura 6 se observa la variación del factor de conversión para distintas cargas. Dado el rango de fuerzas a utilizar para las pruebas, se decidió establecer un valor promedio para el rango de valores entre los 10 kg y 100 kg. Dicho factor de conversión se estableció en 8760 y se toma como valor de escala en el programa de lectura de fuerza.

Para establecer el registro de máxima escala de la celda de carga se debe tener presente que la tensión a escala máxima V_{FS} que entrega la celda viene dada por la tensión de alimentación V_{EXC} y la sensibilidad S . La relación es:

$$V_{FS} = V_{EXC} \cdot S \quad (4)$$

Teniendo en cuenta el tipo de celda de carga utilizada, y considerando que se alimenta con 5 Volts:

$$V_{FS} = 5V \cdot 2 \text{ mV} / V = 10mV \quad (5)$$

El valor medio V_{CM} sobre el cual se entrega la señal y que corresponde al puente equilibrado de la celda es:

$$V_{CM} = 2,5V \quad (6)$$

Ahora bien, para efectuar la conversión analógica-digital, el número total de niveles de cuantización (denominado “cuentas”) c que se requieren para la celda es igual a la fuerza a fondo de escala (500kg) dividido por la carga mínima deseada (0,1 kg), entonces:

$$c = \frac{500}{0,1} = 5000 \text{ cuentas} \quad (7)$$

La resolución libre de ruido necesario, V_{pp} , está dada por:

$$V_{pp} = \frac{V_{FS}}{c} = \frac{10 \text{ mV}}{5000} = 2 \mu\text{V} \quad (8)$$

Esto define el ancho del código (cantidad de bits), por tanto, el ruido pico a pico debe ser menor a $2 \mu\text{V}$. En resumen, la resolución libre de ruido η del conversor analógico-digital se calcula como sigue:

$$\eta = \frac{\log_{10} \left(\frac{V_{FS}}{V_{PP}} \right)}{\log_{10} (2)} = \frac{\log_{10} \left(\frac{10 \text{ mV}}{2 \mu\text{V}} \right)}{\log_{10} (2)} = 12.28 \cong 13 \text{ bits} \quad (9)$$

En este caso, la celda de carga se conecta con un transmisor de celda de carga HX711, el cual posee un conversor de precisión analógico/digital (A/D) de 24 bits. A su vez, el módulo HX711 envía una señal analógica a la placa Arduino UNO, el cual posee internamente un conversor A/D de 10 bits. Cabe mencionar que esta doble conversión no ha producido errores de muestreo que impliquen un cambio del microcontrolador de mejores prestaciones (por ejemplo ARDUINO DUE cuyo A/D es de 12 bits). En la figura 7 puede observarse la conexión del transmisor HX711 con el microcontrolador mediante 2 pines (Clock y Data) de forma serial.

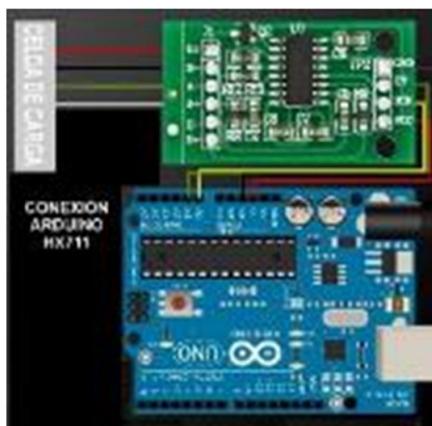


Figura 7.- Conexión a la placa Arduino UNO R3: módulo HX711 y celda de carga.

DESCRIPCIÓN DE LOS MONTAJES Y ACCESORIOS PARA ENSAYO

Tal como se mencionó en el apartado de criterios de diseño, se pretendió dotar al equipo con la posibilidad de efectuar ensayos de tracción como los fundamentales y de flexión como complementarios. A su vez se ha pensado en alternativas para realizar otros ensayos de caracterización de propiedades mecánicas como rotura por desgarro o corte entre otras. En el diseño de los cabezales y garras de sujeción de las probetas se ha pensado en estos particulares y algunos detalles. Así pues, en la Figura 8(a) se muestra un detalle de una garra de sujeción. La misma consta de un par de mordazas con moleteado diamante en su cara de presión y en forma de cuña, las cuales van insertadas en un alojamiento con perfil conjugado, a su vez un resorte calibrado da la presión de soporte inicial de la probeta. El cabezal-garra incluye un mecanismo de palancas para su apertura y montaje. Una tuerca de fijación efectúa el trabado inicial de la probeta, el cual se ve favorecido por el formato en cuña que tienen las mordazas para que compriman la probeta generando el auto enclavamiento de la misma y evitando de esta manera el resbalamiento en la fase inicial del ensayo. Las mordazas se construyeron en acero SAE 1045 templado con un ángulo de cuña de 30°. Con esta clase de cabezales se pueden efectuar ensayos de tracción de las probetas de la Norma ASTM D638 Tipo I a Tipo V y de la Norma ISO 527/2 Tipos 1A, 1B, 1BA, 1BB, 5A, 5B, o bien otras probetas que se diseñen “ad-hoc”, con espesor máximo de 5 mm y longitud máxima de 250 mm.

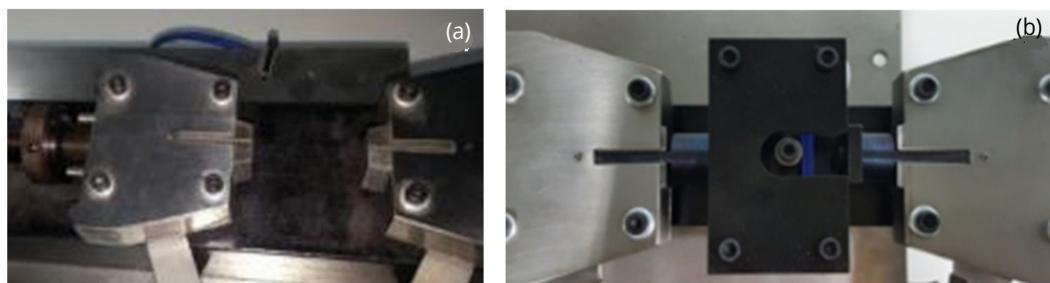


Figura 8.- (a) Vista del cabezal y mordazas. (b) aditamento para flexión.

El dispositivo incorpora además de un par de aditamentos accesorios para la realización de ensayos de flexión según se muestra en la Figura 8(b). Este aditamento fue pensado para las probetas de la norma ISO 178, la cual se considera como la más práctica para efectuar ensayos de flexión y su respectivo análisis. El aditamento consta de dos cuerpos: por un lado posee un par de postes y es solidario a un armazón que es fácilmente encastrado en las pinzas de tracción solidarias al tornillo, por otro lado un armazón similar con un solo poste se fija a las pinzas vinculadas a la celda de carga. La conversión del equipo de tracción a flexión es sumamente simple y no requiere de ajustes ni calibraciones previas.

En las Figuras 9 se muestran algunos aditamentos para efectuar los ensayos de corte bajo las normas ASTM D 7078D-7078M, ASTM D 4255D-4255M. En estos ensayos es preciso disponer de galgas extensiométricas en las probetas. Por otro lado en la Figura 10 se muestran los aditamentos para ensayos de corte por desgarro y otras clases de falla. Estos últimos cuatro procedimientos se encuentran en curso de investigación a la fecha de entrega de este artículo.

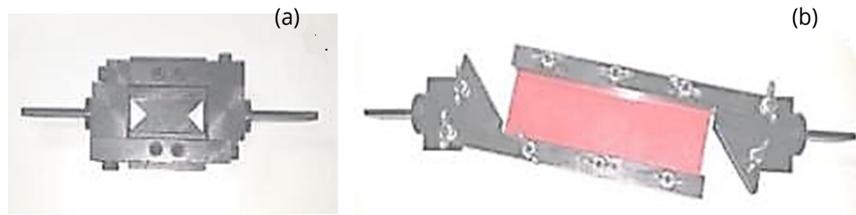


Figura 9.- Aditamentos para corte (a) ASTM D 7078D-7078M. (b) ASTM D 4255D-4255M

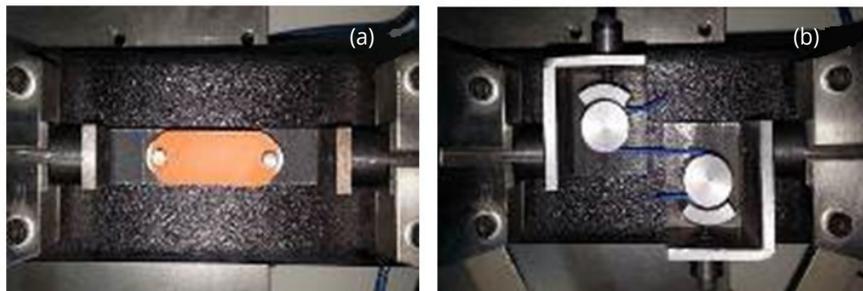


Figura 10.- Aditamentos para ensayos de (a) desgarro (b) rotura de filamentos

DETALLES SOBRE EL ENSAYO DE TRACCIÓN

En todas las normas propuestas y en varias más relativas al ensayo de tracción, se sugiere el empleo de un extensómetro para poder determinar con detalle el patrón de deformaciones y luego el módulo de elasticidad. Aunque dada la poca masa que tienen las probetas, el montaje de un extensómetro podría causar eventualmente interferencias. En varios estudios efectuados a la fecha sobre máquinas de ensayo profesionales, se ha empleado extensómetro (Tymrak et al., 2015; Dizon et al., 2018, etc), mientras que en otros estudios no se ha empleado extensómetro (Lanzotti et al., 2015; Ahmad et al., 2017, entre otros), sean en máquinas profesionales como académicas. Estos últimos toman la medición de la deformación a partir de los desplazamientos relativos de los cabezales. Debido a ello es necesario mencionar un par de conceptos, que serán de utilidad pragmática, en especial para el cálculo del módulo de elasticidad, en el ensayo de tracción con la máquina desarrollada en este artículo.

Así pues, en la Figura 11(a) se observa un dibujo de una probeta montada entre los cabezales de acuerdo con las especificaciones de la norma. Con ello las distancias L_{gh} (entre extremos montados) y L_G (distancia de medición de deformación constante: es decir para montaje de extensómetro si lo hubiera) ya están definidas para cada tipo de probeta en las diversas normas a emplear. En la Figura 11(b) se muestra el estado de deformación ante una carga testigo para una probeta ASTM D638 Tipo IV, modelada y calculada en Elementos Finitos mediante el software FlexPDE (<https://www.pdesolutions.com/>), bajo hipótesis de linealidad elástica material. Nótese que en la región calibrada (L_G) el desplazamiento es lineal y la deformación constante tal como se pretende en el comportamiento de tracción pura. Sin embargo, las zonas externas a L_G tienen un patrón no lineal (que dependiendo de la forma de la probeta puede ser conocida, en particular cuadrática) debido al incremento de la sección resistente. Así pues, estas dos partes con respuesta variable (dentro la proporcionalidad

material) deben contemplarse para el cálculo de las propiedades elásticas. Para ello se ha programado una rutina en MATLAB que captura los datos crudos del ensayo para calcular la deformación y desplazamiento de la zona calibrada L_G en función del desplazamiento de L_{gh} , para luego normalizar la escala de desplazamientos y la de deformaciones.

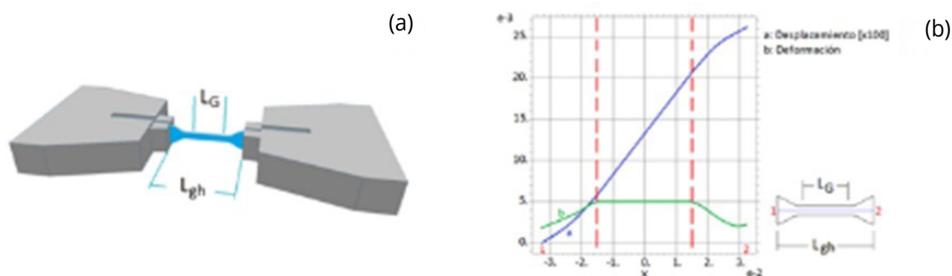


Figura 11. (a) Esquema de montaje. (b) Desplazamientos y deformaciones efectivas en L_G y L_{gh} .

Este procedimiento permite mejorar la determinación del módulo de elasticidad a tracción. En algunas máquinas profesionales de alta calidad, estos detalles y particulares ya han sido contemplados en las rutinas de control de sus sistemas computarizados.

ENSAYOS DE COMPARACION

En este apartado se presentan algunos estudios para comprobar la calidad de la máquina en cuanto a los ensayos más típicos de tracción. Para ello se ha recurrido al uso de la máquina de ensayo profesional para polímeros INSTROM 33691 del instituto PLAPIQUI de CONICET. En efecto, se caracterizaron dos materiales convencionalmente usados en impresión 3D: Poli-ácido láctico (PLA) y Tereftalato de Polietileno (PET), empleado probetas ISO 527/2 Tipo 5A, cuyas dimensiones se pueden apreciar en la Figura 12(a). En la Tabla 1 se indican las características de construcción de las probetas de cada material, y para cada uno de ellos se ha determinado los módulos de elasticidad entre otros aspectos. Todas las probetas fueron hechas en una impresora de origen argentino marca FAR TECNOART II. Se construyeron 10 probetas de cada material, según se muestra en la Figura 12(b), ensayando cinco especímenes por máquina, seleccionando para el análisis aquellas que rompieran en conformidad, es decir dentro de la zona calibrada. La velocidad del ensayo se fijó en el estándar típico de 5 mm/min, esto es la velocidad del émbolo de accionamiento.

	PLA	PET
Espesor de capas de impresión [mm]	0.2	0.2
Espesor lateral [mm]	0.8	0.8
Espesor de capa superior e inferior [mm]	0.8	0.8
Llenado interno [%]	100	100
Angulo de deposición respecto eje longitudinal	0°	±45°
Temperatura de cama [°C]	60	35
Temperatura de pico [°C]	205	240
Color del material	Negro	Gris
Cantidad de probetas impresas	10	10

Tabla 1. Detalle de las probetas impresas

En la Figura 13(a) se muestra la pantalla del sistema de control de la máquina en una corrida típica del ensayo de tracción. Nótese que la traza del diagrama desplazamiento/fuerza no arranca estrictamente en cero pues en el procedimiento de ensayo se fijan unos valores pequeños de precarga (y por ende pre-deformación) para garantizar el agarre efectivo de las mordazas. En caso de no efectuar tal precarga, suelen aparecer deslizamientos como en el ensayo indicado en la Figura 13(b); misma que aunque no sea descartable del todo, sus datos requieren un post-proceso para normalizar a cero el ensayo según se explicita en la norma (ISO 527/2,1996).

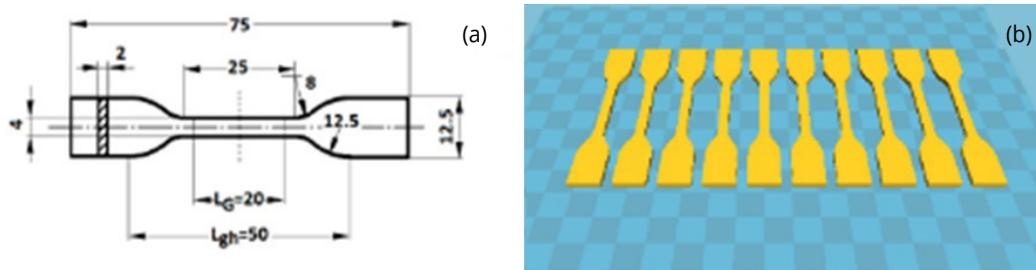


Figura 12. (a) Probeta ISO 527/2 Tipo 5A. (b) Disposición de impresión.

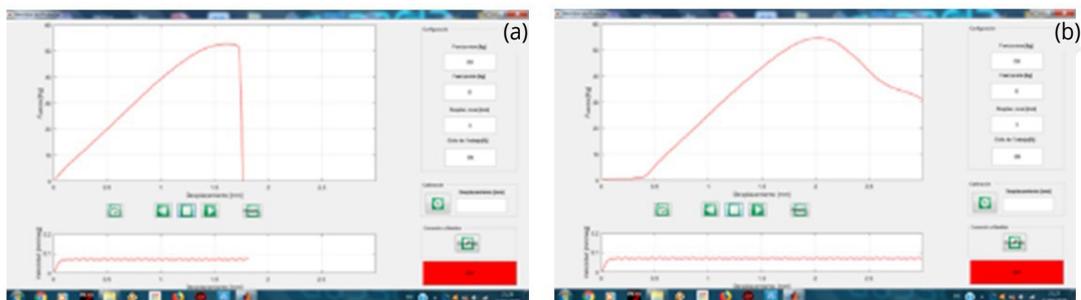


Figura 13. (a) Ensayo típico de tracción con precarga. (b) Ídem sin precarga.

En la Figura 14(a) se puede apreciar la comparación módulos de elasticidad promedio de ambos materiales en los experimentos efectuados con las dos máquinas, mientras que en la Figura 14(b) se consigna lo propio para la tensión máxima. En ambos casos se han descartado algunos ensayos con patrón errático. De ambas Figuras se puede observar que existe un notorio paralelismo en la respuesta de ambas máquinas: En el caso del módulo de elasticidad con poca o muy poca variabilidad, mientras que para la tensión máxima se observa una mayor variabilidad. Esto último puede deberse a que en tales circunstancias los materiales están recorriendo un camino de deformaciones plásticas permanentes y en cuyo contexto ligeras e imperceptibles variaciones dentro del material impreso juegan un papel preponderante.

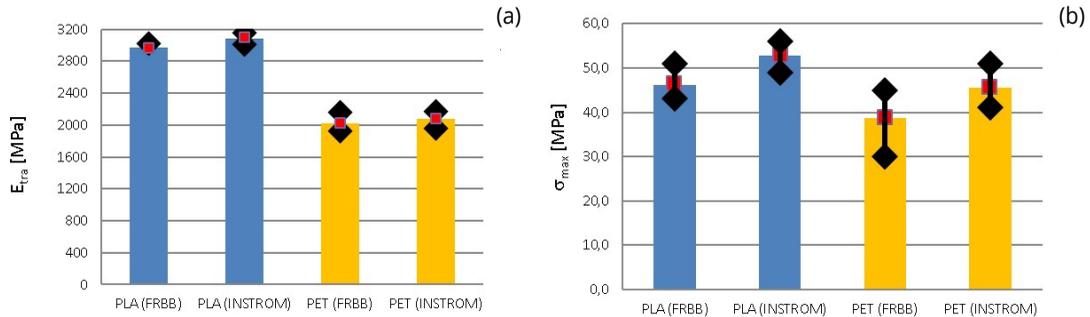


Figura 14. (a) Módulo de elasticidad. (b) Tensión máxima.

Más allá de los aspectos de incertidumbre e imponderables expresados en el párrafo anterior, se ha efectuado un análisis de varianza (ANOVA) para los módulos de elasticidad obtenidos con ambas máquinas dado que en ambos casos las varianzas de las muestras de cada máquina son aproximadamente iguales. Adoptando un valor de significancia del 5%, se puede concluir que ambas máquinas ofrecen los mismos resultados, teniendo una probabilidad menor al 4.86% (valor crítico para el número de muestras involucrado) en contrario. Con ello se muestra que la máquina tiene la calidad suficiente para reproducir valores experimentales de máquinas de ensayo de alta performance y en consecuencia los resultados que se obtengan son confiables.

Finalmente en la Figura 15 se ofrece una comparación con resultados de otros autores con PLA y bajo las mismas características de impresión (en algunos casos se desconoce la velocidad de ensayo). Se puede apreciar que hay una discrepancia del orden $\pm 20\%$ entre los resultados de los otros autores y los obtenidos en este estudio.

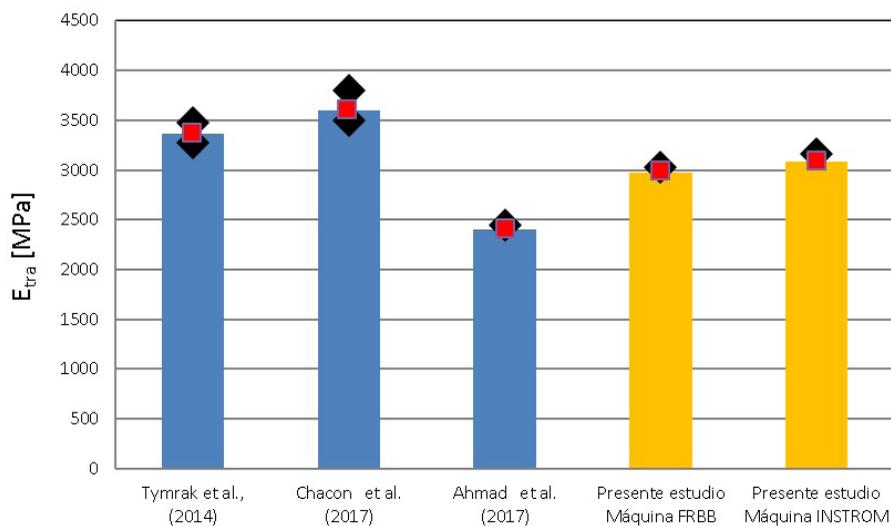


Figura 15.- Comparación con resultados de otros autores.

Se desea acotar que hay una importante variabilidad en la calidad dentro de una misma clase de material (PLA), debido a los protocolos empleados por los distintos fabricantes y

es una de las razones por las cuales suele aparecer diferencias importantes entre criterios de ensayo similares. Considérese que en los trabajos de Tymrak et al. (2014) y Chacon et al. (2017) se han empleado extensómetros, mientras que en el trabajo de Ahmad et al. (2017), no. Por otro lado en estos tres estudios se han empleado probetas de mayor tamaño que en el presente artículo, lo cual puede ser fuente de las discrepancias comparativas, aunque esto último es una conjetura que aún está bajo estudio, siendo materia de discusión en no pocos artículos (Bianchimano et al, 2019).

Para finalizar, se desea remarcar que el objeto de este trabajo ha sido presentar el desarrollo, construcción y puesta a punto de la máquina de ensayo junto con algunos estudios de validación y verificación. Debido a los límites editoriales, hay varios tipos de ensayos que no se incluyen en este trabajo y se sugiere la lectura de los trabajos de Stechina et al. (2020), Bianchimano et al. (2019) y Piovan et al. (2018) donde la máquina fue utilizada para realizar ensayos de tracción, flexión, y resistencia de filamentos, entre otros. Algunos estudios que pueden efectuarse con la máquina tales como los de desgarró y corte, por su naturaleza y amplitud requieren un tratamiento aparte y por tal razón no se incluyen en este artículo.

CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el desarrollo de una económica y fácil de implementar máquina de ensayos para polímeros empleados en impresión 3D, adjuntando la información suficiente como para poder ser replicada y/o adaptada en instituciones académicas a costos y con medios asequibles.

Uno de los aspectos primordiales de su desarrollo ha sido la comparación con máquinas de laboratorio profesionales, para poder garantizar una medición efectiva y sin riesgos de error electro-mecánico sensible. Para ello se ha efectuado unos ensayos de contraste entre los experimentos efectuados en la máquina y una máquina INSTRON 33691 perteneciente a un laboratorio de polímeros del instituto PLAPIQUI-CONICET. El estudio preliminar arrojó muy buen grado de comparabilidad entre las muestras ensayadas en ambas máquinas, a partir de las evidencias extractadas del Análisis de Varianza efectuado en ambos caso.

La máquina puede ser también empleada para ensayos en probetas de materiales plásticos inyectados o en laminados de resinas plásticas reforzadas con fibras (composites). A su vez, permite facilitar varias clases de ensayos como el de flexión, los de corte por desgarró, de filamentos, de corte específicos, y otros más que pueden implementarse sin complicación en tanto que las variables a conocer sean la fuerza y el desplazamiento. Varios estudios se están efectuando que serán materia de futuras extensiones al contenido de este artículo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean manifestar su agradecimiento al Dr. Marcelo Faillá de la Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI-CONICET) quien facilitó el acceso y uso de la máquina de ensayos INSTRON 33961 con la cual se han efectuado estudios y homologaciones preliminares de la máquina presentada en este artículo.

REFERENCIAS

Ahmed M., Islam M., Vanhooose J., Rahman M. (2017). "Comparisons of Elasticity Moduli of Different Specimens Made Through Three Dimensional Printing". 3D Printing and additive manufacturing. 4(2), 105-109.

Ahn S, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright P (2002). "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS". Rapid Prototyping Journal 8(4):248-257.

ASTM D638-02a (2002). "Standard test method for tensile properties of plastics". ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States..

ASTM D 4255/D 4255M – 01 (2001). "Standard Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method". ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

ASTM D 7078/D 7078M – 05 (2005). "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method". ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

Bianchimano A, Piovan M., Romero E., Mainetti C. (2019) "Caracterización mecánica de Poli-ácido láctico empleado en impresión 3D: evaluación de probetas y de impresión", Anales XIII Simposio Argentino de Polímeros, pp 520-521. Ed. Universidad Tecnológica Nacional, FRBA.

Caminero M, Chacón J, García-Plaza E, Núñez P, Reverté J, Becar J (2019) "Additive Manufacturing of PLA Based composites using Fused Filament Fabrication: Effect of Graphene Nanoplatelet Reinforcement on Mechanical Properties, Dimensional Accuracy and Texture". Polymers 11:799-821.

Canesa E., Fonda C., Genaro M. (2013). Low cost 3D-printing, Ed. International Center of Theoretical Physics.

Chacón J., Caminero M, García-Plaza E, Núñez P (2018). "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection". Materials and Design 124(15), 143-157.

Dizon, J.R., Espera, A.H., Chen, Q. Advincula, R.C. (2018). "Mechanical characterization of 3D-printed polymers". Additive Manufacturing 20, 44-67.

Forster, A. (2015). Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability (NISTIR 8059). National Institute of Standards and Technology. US Dept.of Commerce, 2015.

Huerta, E., Corona, J.E., Oliva, A.I., Avilés, F., González-Hernández, J. (2010). "Universal testing machine for mechanical properties of thin materials". Revista Mexicana de Física 56 (4) 317-322.

ISO 178 (2001). Plastics: Determination of flexural properties. International Standards Organization.

ISO 527/2 (1996). Plastics: Determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. International Standards Organization.

- Gao W, Zhang Y, Ramanujan D, Ramanian K, Chenc Y, Williams C, Wang C, Shin Y, Zhang S, Zavattieri P (2015). "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering". *Computer-Aided Design* 69, 65-89.
- Lanzotti A., Grasso M., Staiano G., Martorelli M. (2015). "The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer", *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 604-617.
- Piovan M., Mainetti C., Romero A., Stechina D., Mendoza S., Martin H., Maggi C. (2018). "Propiedades a tracción de probetas construidas por impresión 3D. Homologación de resultados bajo diversas metodologías de ensayo". *Anales del VI Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica*. Art318 ISBN 978-987-46987-0-4.
- Rodriguez J, Thomas J, Renaud J (2000). "Characterization of the mesostructure of fused deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials". *Rapid Prototyping Journal* 6(3):175-186.
- Simbeye D. (2016). "Computerized Measurement and Control System of the Universal Testing Machine Based On Virtual Instruments", *Journal of Information Sciences and Computing Technologies* 5(2), 456-465.
- Stechina D., Mendoza S., Martin H., Maggi C., Piovan M. (2020). "Determination of elastic properties of polymeric pieces constructed by 3D printing, subjected to bending", *Revista Materia*, aceptada para publicación.
- Tymrak B, Kreiger M, Pearce J (2014). "Mechanical properties of components fabricated with opensource 3-D printers under realistic environmental conditions". *Materials and Design* 58, 242-246.