



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

CARACTERIZACION DE PLASTICOS PARA IMPRESORAS 3D

Piovan Marcelo^{1,2}, Romero Andrés^{1*}

¹Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, UTN FRBB Bahía Blanca, Argentina.

² CONICET, Argentina. mpiovan@frbb.utn.edu.ar, andresrom147@hotmail.com

RESUMEN

En este trabajo se muestra un procedimiento de caracterización de las propiedades mecánicas del plástico PLA usado en impresoras 3D, para su posterior aplicación en la estimación de la respuesta mecánica-estructural de componentes fabricados por la mencionada técnica de impresión.

El universo de las impresoras 3D se ha expandido tanto, desde el prototipado rápido en las industrias hasta su uso en micro instalaciones domésticas, que está por cambiar la forma de concebir la fabricación, reposición y uso de componentes tanto en industria como en aspectos domésticos básicos. En ello ha influido de sobremanera la descomunal reducción de costo de construcción y el empleo de esquemas de control amigables como Arduino, con lo que se ha pasado, en diez años, de impresoras domésticas de un costo base de U\$ 5000 hasta U\$ 300, para los modelos más elementales.

La caracterización de las propiedades mecánicas (entiéndase Módulo de Elasticidad longitudinal y/o cortante, límites elásticos de tensión, etc.) es de fundamental importancia para la construcción, en impresión 3D, de piezas útiles listas para trabajo, no ya como prototipos sin resistencia mecánica. Es por ello que dependiendo de la manera de efectuar el trazado de deposición del plástico PLA, y de otros parámetros en la impresión 3D (tales como espesor de pasada, tamaño de boquilla, velocidad de fabricación, etc.), se puede tener una aleatoriedad importante en la respuesta estructural de la pieza.

Para caracterizar los materiales plásticos PLA se emplean probetas basadas en estándares, con diferentes parámetros de construcción. Las mismas son evaluadas en un banco de pruebas desarrollado "Ad-Hoc" por los autores, recurriendo al empleo de sensores de fuerza y movimiento de tipo académico. Se cotejan luego los resultados, compendiados en tablas y/o ábacos. En algunos casos posibles se comparan los resultados con respecto a los valores determinados por los fabricantes de los materiales PLA y/o por otros autores. Finalmente se ofrecen conclusiones de utilidad para la construcción de piezas con impresoras 3D que sean funcionales y útiles.

Palabras Claves: *Plástico PLA, impresión 3D, Propiedades Mecánicas.*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

El universo de la impresión 3D no es particularmente nuevo como concepción tecnológica. Como tal, la industria de impresión 3D, involucrada en el desarrollo y construcción rápida de prototipos a escala o reales, comenzó a fines de los años 1980 [1-2] y con algunos casos de índole más bien académica en los años 1970. Sin embargo tales máquinas eran muy limitadas, aparatosas y su producto sustancialmente costoso [1-2].

Desde aquellos comienzos se han desarrollado varios tipos de tecnologías para la fabricación de prototipos rápidos siguiendo los conceptos de impresión 3D, que se pueden englobar en lo que se denomina la estrategia de construcción estratificada. De las varias tecnologías para impresión 3D estratificada, la más común, es la llamada FFF o “Fused Filament Fabrication” según la cual se deja caer por una boquilla precalentada un filamento y/o gota de un tipo de material como por ejemplo plástico o cera o bien metal, sobre una superficie. De los varios enfoques con que se puede hacer o seguir el protocolo FFF, el denominado Método de Deposición de Filamento o FDM (por su locución en lengua inglesa: Fused Deposition Method) es el más empleado. En esencia el FDM es muy simple, y a pesar de ello permite crear objetos muy complejos partiendo de un material plástico que se extruye a través de una boquilla caliente [1-2] para depositarlo sobre una plataforma. En ello se sigue un protocolo definido “a-priori” para concluir el cuerpo sólido (modelado en plataformas CAD) con una evolución vertical capa por capa. Aquellos lectores interesados en aspectos descriptivos y pragmáticos de la tecnología y métodos de fabricación 3D por FFF/FDM pueden recurrir a las referencias [1] a [3], donde encontrarán mayores detalles de los procedimientos, criterios de fabricación y vínculos entre las tecnologías CAE-CAD-CAM.

La reducción en los costos de producción de varios de los elementos necesarios para construir una impresora 3D ha hecho que sea viable obtener una impresora profesional de alta calidad por unos 10000 dólares y una semi-profesional por menos de 1000 dólares y hasta de ínfimos 300 dólares. Este contexto está gestando la simiente para un formidable futuro en la fabricación de objetos a escala industrial y también doméstica. Para tener una idea, el volumen actual del mercado de impresoras 3D se puede quintuplicar en los próximos 6 a 8 años solamente en la Argentina [3], donde desde hace unos pocos años se están empleando estas máquinas para usos en industrias autopartistas, arte y decoración y hasta en la construcción de órtesis y prótesis [4].

A pesar de las extraordinarias posibilidades que permite la impresión 3D, no se observa mucha información y sopesada caracterización de las propiedades materiales y/o elásticas de los plásticos empleados en la construcción de piezas [5-8] con los esquemas de fabricación estándar. Esto es sustancialmente importante para la estimación de la respuesta mecánica/elástica de componentes



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

plásticos, listos para para ser empleados en servicio luego de la impresión. Bajo estas circunstancias se propone en este artículo la evaluación de las propiedades elásticas de un tipo de plástico empleado en las impresoras 3D bajo el método de deposición de filamento o FDM. El tipo de material a caracterizar es el denominado ácido poli-láctico (o PLA según su denominación en inglés: Poly-Lactic Acid) y, en concreto, se medirán los módulos de elasticidad a tracción y flexión, límites de resistencia elásticos y de rotura bajo carga estática. Para ello se emplea una máquina de banco, de desarrollo académico, construida específicamente para la medición de propiedades elásticas empleado los sensores de fuerza y desplazamiento de la marca PASCO [9] utilizados en los laboratorios de la institución. Se recurre a metodología basada en normas internacionales para caracterización de plásticos y/o polímeros de uso industrial [10,11]. Se presentan los resultados en forma tabular y/o gráfica, estableciendo algunas cotas de tipo estadístico.

2. MATERIALES, TIPOS DE PROBETAS Y BANCADA EXPERIMENTAL

Para efectuar los ensayos, se emplean probetas fabricadas por deposición de filamento en forma estratificada, construidas con el polímero denominado Ácido Poli-láctico o PLA. En la Figura 1 se observan dos especímenes de probetas manufacturadas con la configuración de producción básica que tiene una impresora 3D, en este caso hechas con la impresora 3D Replikat M4 de fabricación argentina [3]. El protocolo de fabricación establecido en los programas de control de la Replikat M4 conduce, para cada capa, al desarrollo del perímetro en primer lugar y luego al relleno del vacío con pasadas a 45° en forma “angle-ply” [12] parecida a la construcción de laminados de materiales compuestos usando cintas “pre-pegs” [12], tal como se aprecia claramente en el Figura 1(a). La probeta que se muestra en la Figura 1(a) corresponde al tipo de ensayo para tracción, mientras que la restante se emplea en el ensayo a flexión. Las dimensiones de las probetas para tracción y para flexión, basadas en los especímenes sugeridos en los estándares ASTM D790-02 y D638-02a [10,11] se pueden ver en la Tabla 1.



Figura 1. Ejemplo de probetas. (a) Para tracción, (b) Para flexión.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabla 1. Características de las probetas.

| Parámetro | Probeta de tracción | Probeta de flexión |
|-------------------------------|---------------------|--------------------|
| Ancho: b [mm] | 4.3±0.3 | 5.3±0.1 |
| Espesor: e [mm] | 2±0.2 | 2±0.2 |
| Longitud total: L_T [mm] | 80.8±0.2 | 79.6±0.2 |
| Longitud efectiva: L_e [mm] | 51.5 | 70.0 |
| Espesor de capa [mm] | 0.2 | 0.2 |

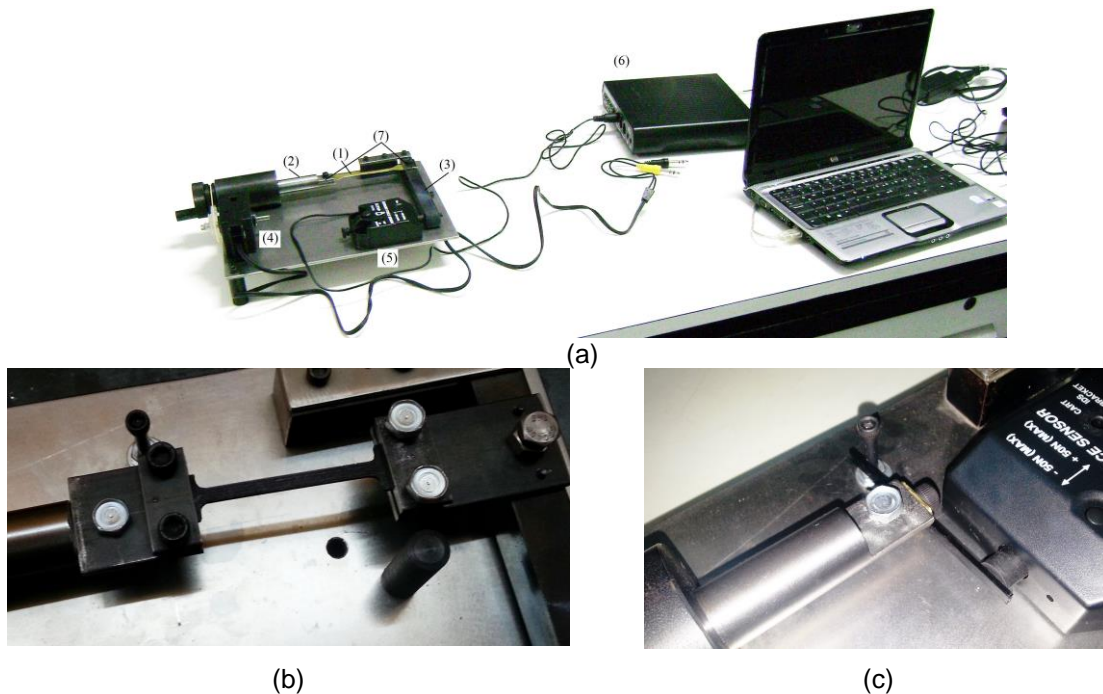


Figura 2. (a) Sistema de ensayos, (b) Montaje para tracción, (c) Montaje para flexión.

Con el propósito de efectuar las mediciones de las propiedades mecánicas se ha construido un banco de prueba simple con el instrumental de índole académica. En la Figura 2(a) se puede apreciar el dispositivo de ensayo junto con su montaje básico, el cual fue desarrollado empleando sensores calibrados de medición de fuerza y de movimiento disponibles en los laboratorios de la institución. El sistema, que originalmente fue hecho solo para ensayos tractivos, funciona de la siguiente manera: la probeta (1) es montada entre los actuadores (2) y (3) mediante un sistema de montaje (7) que puede variar según la configuración de la probeta y tipo de ensayo como en las Figuras 2(b) y 2(c). El actuador palanca (3) se ajusta de tal manera que el sensor de fuerza esté



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

tarado en cero. El actuador (2) contiene un tornillo graduado de precisión con un avance de un milímetro, que se acciona desde la manivela en el extremo izquierdo. La manivela está conectada al sensor de rotación (4) mediante un sistema de polea-correa suficientemente tensado como para evitar deslizamientos. En la medida que se deforma la probeta, la palanca (3) transfiere carga al sensor de fuerza (5). Finalmente las lecturas de ambos sensores son capturadas por el encoder (6) para su procesamiento en la computadora.

Además, en las Figuras 2(b) y 2(c) se muestran los esquemas del montaje para el caso de tracción y el caso de flexión, respectivamente. En el primero se emplea la configuración de actuación típica según lo explicado en el párrafo precedente, mientras que en el segundo se usa el sensor de carga como uno de los soportes y la deformación se ejecuta con el actuador (2). Esto obedece a que el banco de ensayos fue construido originalmente para ensayos extensionales y se lo ha querido dotar de la capacidad de ensayos flexionales sin incorporar mayores complejidades constructivas.

3. METODO DE ENSAYO

Tanto del ensayo de tracción como con el ensayo de flexión se desean obtener:

- Módulo de elasticidad.
- Límite elástico y de rotura (de ser factible).
- Curvas de respuesta fuerza-desplazamiento.

En el caso de una viga a tracción se tienen las siguientes expresiones para calcular el módulo de elasticidad y la tensión efectiva en la barra:

$$E_{tra} = \left(\frac{F}{\Delta L} \right) \frac{L_e}{be} \quad (1)$$

$$\sigma_{tra} = \frac{(F)}{be} \quad (2)$$

Siendo que las entidades entre paréntesis son los valores de fuerzas y de desplazamientos medidos por los sensores (y/o proyectados) y correspondientes a la tracción, es decir F es la fuerza de tracción y ΔL es la elongación de la probeta. Mientras que para el caso de flexión las expresiones de cálculo son las siguientes:



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

$$E_{fle} = \left(\frac{F}{\delta} \right) \frac{L_e^3}{4be^3} \quad (3)$$

$$\sigma_{fle} = \frac{3L_e(F)}{2bh^2} \quad (4)$$

Nuevamente, las entidades entre paréntesis corresponden a los valores medidos, siendo en este caso F la fuerza de flexión en el centro de la viga (para el caso simplemente apoyado o flexión de tres puntos [10]) y δ el desplazamiento medido en el centro de la viga.

Para cada uno de los ensayos se emplean probetas con dos tipos de calidad de terminación en la deposición del material plástico: 25% y 100% de relleno con capa de 1.2 mm en el perímetro de la misma, siguiendo los protocolos de fabricación del constructor de la impresora 3D Replikat [3]. Además, para cada tipo de sollicitación y cada calidad de terminación se ha empleado un conjunto de cuatro probetas.

4. RESULTADOS Y COMPARACIONES

En las Figuras 3(a) y 3(b) se puede observar dos ejemplos típicos de la evolución de los ensayos efectuados, tanto para tracción como para flexión. Las Figuras 3(a) y 3(b) corresponden al caso de llenado del 25%. Luego de un análisis de los datos recabados se ha efectuado, mediante el uso de las fórmulas (1) a (4), el cálculo de las propiedades elásticas para los diferentes casos de terminación de la impresión.

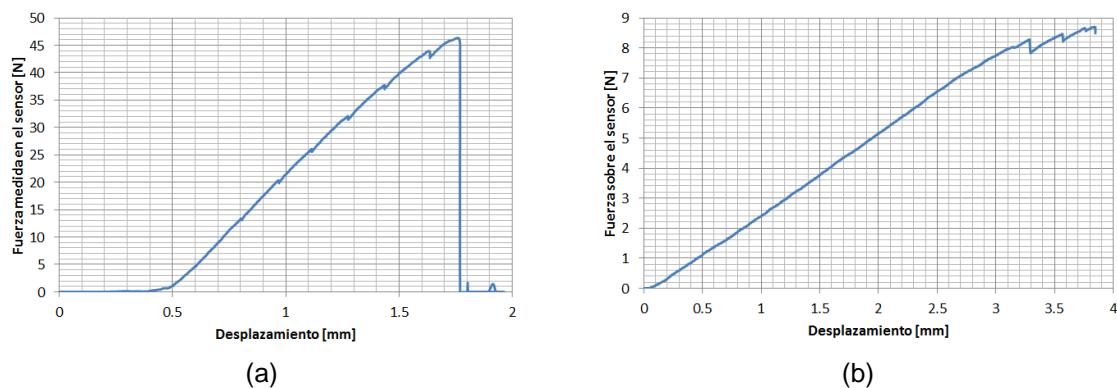


Figura 3. Casos típicos de ensayo. (a) Para tracción (b) Para flexión.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabla 2 Valores estadísticos de los ensayos para tracción.

| Parámetros | Llenado 25% | | Llenado 100% | |
|-----------------------------------------|-------------|--------------------|--------------|--------------------|
| | Promedio | C _v [%] | Promedio | C _v [%] |
| Mod. Elasticidad E _{tra} [MPa] | 865 | 4.35 | 1232 | 2.92 |
| Límite de fluencia [MPa] | 18.50 | 6.55 | 43.24 | 2.35 |
| Límite de rotura [MPa] | 22.39 | 7.89 | 46.18 | 1.59 |

Tabla 3 Valores estadísticos de los ensayos para flexión.

| Parámetros | Llenado 25% | | Llenado 100% | |
|-----------------------------------------|-------------|--------------------|--------------|--------------------|
| | Promedio | C _v [%] | Promedio | C _v [%] |
| Mod. Elasticidad E _{fle} [MPa] | 3073 | 19.56 | 4935 | 12.95 |
| Límite de fluencia [MPa] | 32.75 | 20.56 | 54.28 | 9.36 |

En la Tabla 2 se muestran los valores promedio y los coeficientes de variación porcentuales C_v (entendidos como la razón entre el desvío estándar y el promedio) para el caso de tracción, mientras que en la Tabla 3 se hace lo propio para el caso de flexión. Téngase presente que cada valor de las tablas ha sido calculado en el espacio de muestreo según lo explicitado en el párrafo precedente. Nótese que en la Tabla 3, es decir en el caso de flexión, no se indican los límites de rotura pues no se ha manifestado tal situación en ninguno de los ensayos efectuados.

Se puede observar que las probetas con llenado al 25%, a la sazón una práctica convencional en la fabricación por FDM, disminuye el módulo de elasticidad en un 30% para el caso de tracción y del orden de 38% para flexión, ambos al ser comparados respecto a su contraparte de relleno del 100%. Por otro lado, los límites de rotura y fluencia a la tracción disminuyen un peligroso 50% cuando se pasa de la terminación 100% a la 25% en la fabricación por FDM. El límite de fluencia para flexión disminuye sobre el orden de 40%. Se debe destacar que los coeficientes de variación C_v se han mantenido en menos del 10% para el ensayo de tracción, mientras que para el ensayo de flexión se observan variaciones o dispersiones importantes, que pueden oscilar el 20% como en el caso de llenado al 25%.

Tanto para el caso de llenado del 100% como en el de 25%, se tiene que recordar que el entramado de deposición del filamento plástico se hace a 45° respecto de los ejes longitudinales de las probetas y en disposición “angle-ply” [12] a semejanza de los materiales compuestos laminados, es decir, el hecho de pasar de una configuración más compacta a otra más dispersa



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

coadyuva a debilitar el efecto de reforzamiento por la disposición angular, especialmente en la sollicitación tractiva, lo cual ya es conocido y de comportamiento semejante en los materiales compuestos laminados [12]. En el caso de flexión, si bien se verifica el mismo comportamiento de disminución de las propiedades elásticas, y a pesar de tener una dispersión de resultados notoria, no se manifiesta un efecto tan grande como en el caso de tracción.

El caso de relleno del 100%, corresponde a una situación de material compacto y en tal sentido se puede cotejar con valoraciones del PLA efectuadas con otras técnicas según se desprende de las referencias [8] y [9]. En la Tabla 4 se muestra una comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio con los de las referencias mencionadas.

Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos con otros métodos.

| Parámetros | Presente | Ref.[8] | Ref.[9] |
|----------------------------------|----------|---------|---------|
| Mod. Elasticidad E_{fle} [MPa] | 4935 | 3536 | 3400 |
| Mod. Elasticidad E_{tra} [MPa] | 1232 | 1968 | 1600 |

Si bien existen variaciones entre los resultados obtenidos en el presente estudio y los dos tomados como referencia, se puede decir que las mismas se hayan dentro del extenso rango de variabilidad que se observa para los materiales PLA, construidos a lo ancho del mundo con diversas metodologías (por extrusión, por inyección, etc.). En este sentido según el método de caracterización experimental se han observado variaciones, por ejemplo para E_{tra} , en los rangos [2000, 3600] MPa y [310, 5600] MPa empleando ASTM D638 e ISO 527-2, respectivamente, de acuerdo a lo expuesto en la referencia [13]. Contemplar esta variabilidad es de fundamental importancia para el diseño y construcción de piezas resistentes empleando el proceso de FDM en impresión 3D.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un estudio preliminar para efectuar la caracterización de las propiedades elásticas del plástico PLA de uso frecuente en los procesos de impresión 3D por FDM. Se han efectuado ensayos experimentales sobre un banco de prueba de mesa empleando los patrones de probeta más pequeños ajustables a las normas ASTM D638-02a y ASTM D790-02. De los resultados obtenidos se puede concluir que las propiedades elásticas de las probetas dependieron fuertemente de los tramados constructivos, observándose a su vez una importante

variabilidad en uno de los casos (flexión con relleno del 25%). Dependiendo del tipo de tramado constructivo, volumen de relleno y caso de solicitación, las propiedades elásticas y su variación presentan similitudes con el comportamiento de los plásticos reforzados con fibras, en el sentido que se observa mayor resistencia y/o rigidez en la dirección de los refuerzos y en la medida mayor volumen de refuerzos. A su vez, se ha cotejado los resultados experimentales obtenidos con la información disponible en la literatura abierta internacional, observándose la razonable correlación entre los distintos parámetros medidos, a pesar que varios de ellos se han hecho con diferentes técnicas constructivas y dentro de la gran variabilidad que ofrece la fabricación de PLA.

A futuro se pretende efectuar un conjunto de ensayos, con un mayor espacio de muestreo, para poder caracterizar las propiedades elásticas de la gran variedad de tramados de fabricación que se emplean en las impresiones 3D. De esta manera, se puede poseer una estimación suficientemente realista de las propiedades elásticas para piezas que se construyan por FDM y en consecuencia su uso como valores testigo en la simulación computacional.

REFERENCIAS

- [1] E. Canesa, C. Fonda, M. Genaro, Low cost 3D-printing, Ed. Int. Center Theor. Physics, 2013.
- [2] A. Kasciunas France. Make 3D printing. Maker Media, Inc. 2014.
- [3] Replikat S.A. <http://www.replikat.com>, 2014
- [4] <http://www.clarin.com>, sección Sociedad. El sueño de Felipe: logran hacerle una mano con una impresora 3D. Diario Clarín, Ed. 8 de mayo, 2014.
- [5] M. Vaezi y C.K. Chua, Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process. Int J Adv Manuf Technol 53:275–284, 2011.
- [6] M.S. Mamadapur. Constitutive modelling of fused deposition modeling: Acrylonitrile Butadiene styrene (ABS). Master Degree Thesis, Texas A&M University, U.S.A., 2007.
- [7] M. Bijarimi, S. Ahmad, R. Rasid. Mechanical, Thermal and Morphological Properties of PLA/PP Melt Blends. International Conference on Agriculture, Chemical and Environmental Sciences (ICACES'2012) Dubai, Emiratos Arabes Unidos, Octubre, 2012.
- [8] K. Oksmana, M. Skrifvars, J.-F. Selin. Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites, Composites Science and Technology 63:1317–1324, 2003.
- [9] Pasco Inc. <http://www.pasco.com>, 2011.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

[10] ASTM Code D790-02: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International, pp. 146-154, 2002.

[11] ASTM Code D638-02a: Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International, pp. 46-58, 2002.

[12] I.M Daniel, O. Ishai. Engineering mechanics of composite materials, 2nd Ed, Oxford University Press, NY, EEUU, 2006.

[13] <http://plastics.ides.com/generics/34/c/t/polylactic-acid-pla-properties-processing>

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la SGCyT de la Universidad Tecnológica Nacional y al CONICET por el apoyo y al Departamento de Física de la UTN-FRBB por su asistencia en los ensayos, en especial al Ing H.D. Colavincenzo. A su vez desea agradecer al personal de la firma Replikat por el aporte de las probetas para los ensayos.