

# Caracterización térmica de prototipos rápidos y piezas obtenidas mediante fabricación aditiva en impresora 3D

J. Santolaria Mazo, C.E. Cajal Hernando, J. Velázquez Sancho, J.J. Aguilar Martín

Dpto. de Ingeniería Diseño y Fabricación Universidad de Zaragoza  
jsmazo@unizar.es

---

*El presente trabajo pretende acotar las condiciones en las que piezas obtenidas en una impresora 3D de resina fotopolimerizable están en tolerancia no solo debido a la temperatura sino a la variación temporal de esta tanto en régimen permanente como estacionario. Se han diseñado distintos patrones que han sido medidos en un sistema de temperatura controlada mediante sondas térmicas. Como resultado del análisis de los datos, desde el punto de vista de condiciones operativas, se obtienen los parámetros recomendados y mínimos en cuanto tiempo de estabilización y errores debidos a la temperatura tanto para el régimen permanente como el transitorio.*

---

## 1. INTRODUCCIÓN.

Tanto a la hora de evaluar la precisión con la que las máquinas de prototipado rápido son capaces de fabricar determinadas piezas como de evaluar sus requerimientos funcionales en determinadas aplicaciones existen aspectos críticos como son la temperatura de fabricación y la de su posterior utilización.

Otro de los aspectos relevantes, e intrínsecos al proceso de depósito y curado del material, es que se siguen trayectorias constantes independientemente de la geometría de la pieza a fabricar, dando lugar a piezas con características básicas de material ortótropo en lo relativo a propiedades mecánicas. Dichas trayectorias, a diferencia de otros sistemas de fabricación basados en el arranque de viruta, se realizan siempre en la misma dirección (eje X) variando incrementalmente en el otro eje (Y) con el que forma un plano. Tras finalizar, esta capa sirve de sustento para sucesivos planos paralelos (según eje z).

Así mismo, se presenta una nueva técnica de caracterización de la función del coeficiente de dilatación térmica, dependiente de la temperatura, a partir de la fabricación de patrones con alojamientos cónicos que permiten una medición automática y precisa a diferentes temperaturas mediante una máquina de medir por coordenadas (MMC) con palpado esférico autocentrante.

Simulando el funcionamiento cíclico de una sistema de acondicionamiento térmico se ha analizado en régimen permanente cómo reaccionan los patrones en términos de dilatación y contracción térmica en función de la frecuencia y amplitud de las variaciones térmicas del ambiente y de las condiciones de contacto de la pieza con el aire y otros elementos como pueden ser las mesas de medición de la MMC. Dicha reacción sigue un patrón de histéresis por lo que se podría deducir una cierta inercia térmica. Para ello se establece un símil eléctrico basado en la reacción de componentes electrónicos a señales eléctricas alternas. Desde el punto de vista de régimen transitorio, en el caso de una única variación de las condiciones de temperatura a las que está sometida una pieza, esta requiere un tiempo de estabilización. Siguiendo el símil eléctrico se extrapola una constante de tiempo para el cálculo de los tiempos de estabilización.

## 2. DESCRIPCIÓN INICIAL DEL SISTEMA.

En el laboratorio de metrología se han instalado 3 sondas térmicas para estudiar cómo se produce el acondicionamiento térmico de la estancia en función de las condiciones climatológicas exteriores. Se han establecido los parámetros de operación para simular posibles desviaciones sobre la temperatura estándar de funcionamiento que se establece en  $20^{\circ} \pm 1C^{\circ}$ .

Dichas 3 sondas han recogido la temperatura en el aire una, en un patrón de medición en contacto con la mesa de máquina de medición por coordenadas la segunda y finalmente una tercera con la pieza patrón aislada de la mesa y solo en contacto con el aire del laboratorio.

La pieza patrón consiste en materializar un eje dónde se han creado alojamientos cónicos para la inserción de un palpador esférico para que la MMC pueda realizar un palpado autocentrante.

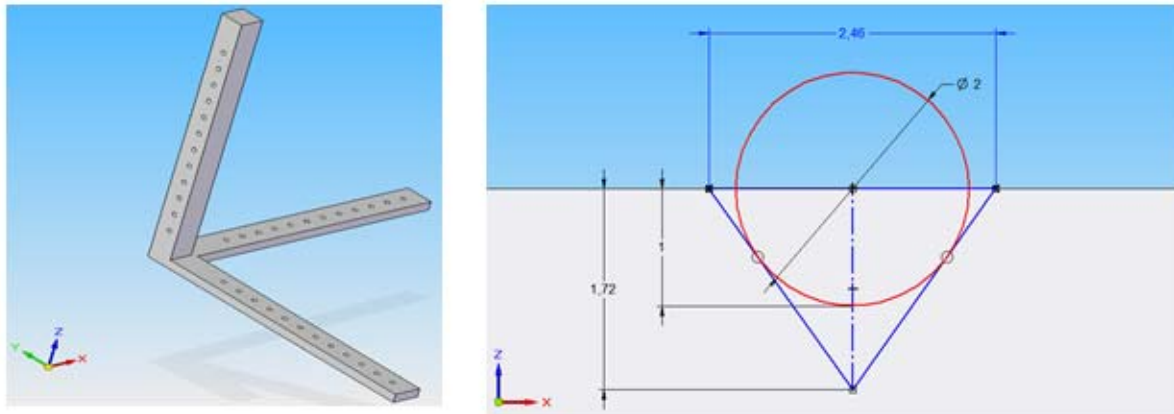


Figura 1. Patrón tridimensional y alojamiento cónico

Se han construido varias piezas patrón con el fin de identificar el papel que la disposición espacial de las piezas en su fabricación juega en los errores. Así mismo se podrá observar si de cara a la dilatación el hecho de fabricar piezas idénticas en posiciones y orientaciones diversas es relevante [1].

Se han construido tres patrones de 31 alojamientos equidistantes. Dos de ellos según el eje X y otro siguiendo el eje Y. Así mismo se ha construido un patrón con asientos cónicos siguiendo los tres ejes, con la salvedad de que al eje Z se le ha dotado de un grosor adicional buscando una rigidez mayor debido a que, a diferencia de los ejes X e Y, no se mide apoyado en la mesa.

### 3. Alojamientos cónicos.

Se recomienda que el ángulo se encuentre entre 60 y 120 grados y que la profundidad del alojamiento sea tal que como mínimo un tercio del diámetro de la esfera que se aloje en el asiento. Si dos o más alojamientos son utilizados para definir una distancia de un patrón de longitud se debe prestar un cuidado adicional para asegurar que los ejes de los conos son paralelos.

El alojamiento cónico ha sido diseñado para que una punta de palpado de la MMC de diámetro 2 mm pudiera entrar al 50 % quedando el centro de dicha esfera alineado con el plano superior de la pieza patrón. La MMC utiliza un sistema de palpado autocentrante con lo que se consigue que el palpador se coloque automáticamente en la posición deseada [2][3]. Se ha definido un programa de medición en modo automático en el que basándose en las coordenadas nominales de los alojamientos la MMC realiza una medición de cada punto, quedando estos valores registrados para su posterior análisis.

La utilización de asientos cónicos permite que, sea cual sea la dirección de palpado, el centro de la esfera se encuentre alineado con la superficie en la que se encuentra situado el alojamiento[4].

### 4. Toma de datos.

Se han analizado 18 mediciones intentando ilustrar la mayor disparidad de condiciones dentro de los parámetros permitidos de operación de la MMC utilizada [5].

Se han utilizado 3 sondas térmicas para medir la temperatura. Una de ellas mide la temperatura ambiente en proximidad a la zona de medición y las otras dos miden la temperatura de piezas, idénticas al patrón longitudinal, con y sin contacto con la mesa de medición para establecer la relevancia de dónde se encuentra colocada la pieza en cuanto a su variación térmica.

### 5. ESTUDIO TEMPERATURA LARGO PLAZO.

Mediante el análisis de la temperatura durante un periodo de varias semanas con un intervalo de 10 minutos se pretende establecer la relación entre las variaciones de la temperatura ambiente y las de la pieza para determinar qué requisitos se deben de garantizar para no cometer errores debido a una inadecuada estimación de la temperatura en la pieza al estar solo monitorizando la temperatura ambiente del laboratorio. En la figura 2 se puede observar una muestra de la temperatura durante dos días donde se ven la discrepancia entre la temperatura de la sala y de la pieza.

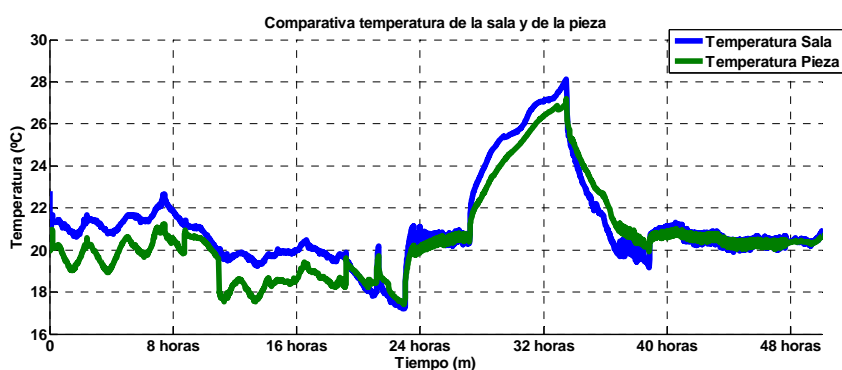


Figura 2. Temperatura de la pieza y de la sala durante 2 días

### 6. Inercia térmica e histéresis.

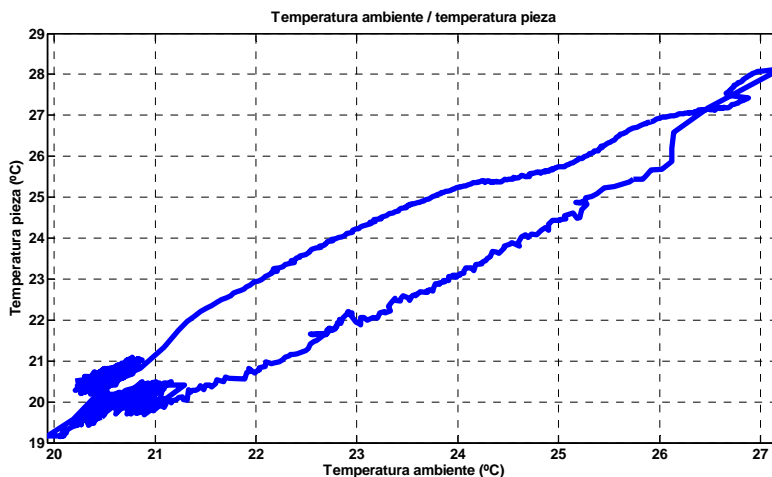


Figura 3. Temperatura de la pieza (Eje Y) en relación a la temperatura del aire en la sala (Eje X)

Como se puede observar en la figura 3 si comparamos la temperatura de la sala con la de la pieza se puede observar que corresponde con la típica de un proceso de histéresis. Es necesario caracterizar esta inercia térmica para determinar su influencia sobre la adecuación térmica de las piezas para su medición, lo que denominaremos régimen transitorio. Por otro lado se determina la influencia de las variaciones térmicas de la sala en régimen estacionario.

## 7. - RÉGIMEN TRANSITORIO.

Cuando se desea medir una determinada pieza se debe proceder a su estabilización térmica. Se debe conseguir que toda la pieza se encuentre a la temperatura nominal de medición. Como norma general se suele proceder a dejar la piezas para medición con al menos una antelación de 24 horas. Las piezas normalmente no necesitan permanecer tanto tiempo en el laboratorio, por lo que en la medida de lo posible se busca establecer un tiempo mínimo de permanencia para asegurar una influencia mínima en los resultados metrológicos. Al igual que en el caso anterior se va a establecer una similitud con un circuito eléctrico para determinar este mencionado tiempo mínimo de adecuación térmica. Este parámetro resulta de vital importancia a la hora de medir piezas de referencia obtenidas en la impresora 3D.

## 8. Simil eléctrico.

En un circuito eléctrico RC básico que consta de un condensador cargado de energía y una resistencia, la energía en el condensador se disipa en la resistencia[6]. Cuando se completa el proceso de descarga  $t \rightarrow \infty$ , toda la energía almacenada en el condensador se ha disipado en la resistencia. El condensador se descarga a través de la resistencia, disminuyendo la carga de manera que la intensidad sigue la ecuación 1, dónde  $Q_0$  es la carga del condensador.

$$I = \frac{Q_0}{RC} e^{-t/RC} \quad (1)$$

Se define por constante de tiempo, RC [7], al tiempo transcurrido desde que se inicia la carga de un condensador conectado en serie con una resistencia hasta que las placas del mismo adquieren un potencial del 63% del valor final (el de la alimentación).

En el caso de la descarga, se trata del tiempo que transcurre hasta que el condensador disminuye su potencial entre placas y alcanza el 37% del valor inicial del mismo.

Se considera que pasadas 5 veces esta constante de tiempo la tensión alcanza el 95% de su valor final por lo que podemos considerar el transitorio finalizado.

Según se puede observar en la figura 4 la variación temporal de la temperatura también sigue una ecuación exponencial por lo que podemos asimilar la temperatura a la tensión en bornes de un condensador en proceso de descarga.

## 9. Análisis de datos para régimen transitorio.

Podemos establecer una constante de tiempo observando los datos y de la figura 5 y estableciendo como la temperatura final para  $t \rightarrow \infty$  la línea roja que supone que el condensador ya se encontraría descargado. La pieza ha sido artificialmente calentada hasta alcanzar temperaturas cercanas a los 50 °C

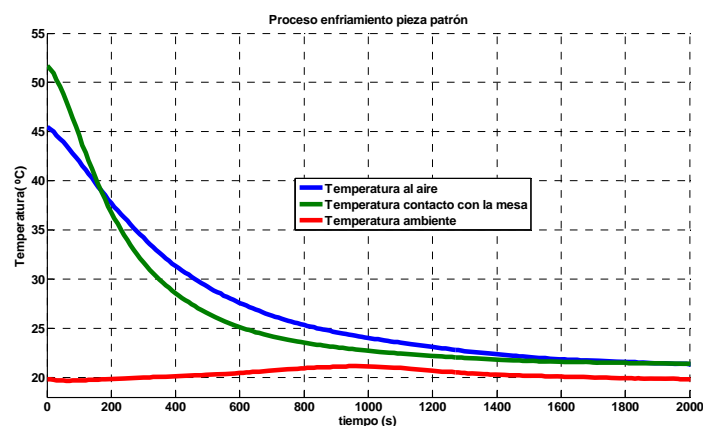


Figura 4. Evolución temperaturas

La temperatura de partida de la pieza que permanecerá en contacto con la mesa al entrar en el laboratorio son 51.72 °C y la temperatura final son 21.3 °C tras 45 minutos en ambiente de temperatura cte.

Con esto, la constante de tiempo son los segundos que tarda en descender el 63 % .

$$(51.72-21.33) \times 0.37 = 11,24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Siendo su temperatura en ese momento de: 11.24 +21.33= 32.57 ° C

La intersección de la gráfica de temperatura de la figura 4 con estos 32.57 °C nos determina una constante RC=280 segundos. Para la temperatura medida en la pieza en contacto con la mesa. Lo que garantiza una máxima transferencia de calor, lo cual representaría una resistencia menor en el símil eléctrico.

En la ecuación 2 vemos que tanto la tensión como la corriente tienen una evolución exponencial:

$$V(t) = V_0 e^{-t/RC} \text{ y } I(t) = - \frac{V_0}{R} e^{-t/RC} \tag{2}$$

El tiempo de estabilización será  $(5 \cdot 280) / 60 = \mathbf{23 \text{ minutos}}$  , lo cual según se ha explicado garantiza el 95 % del valor final de temperatura en el caso de la pieza sin contacto con la mesa

En el caso de la pieza sin contacto con la mesa la temperatura a la que se introduce en el laboratorio son 45.46 °C siendo la temperatura final igualmente 21.3°C

Por lo cual nuestra constante de tiempo son los segundos que tarda descender el 67% de su descenso de temperatura total:

$$(45.46-21.2) \times 0.37 = 8,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Lo cual implica una temperatura tras esa cte. de tiempo de : 11.24 +21.2= 30.17 ° C

Buscando la intersección de la temperatura con los 30.17 °C en la gráfica de la figura 4 RC=450 segundos. Para la temperatura medida en la pieza sin con la mesa. Al tener el aire menos inercia térmica la transferencia de calor será menor por lo que la resistencia al enfriamiento será mayor.

En este caso en tiempo de estabilización necesario para alcanzar el 95% de la temperatura final , es decir 5 veces su constante de tiempo RC será :

$(5 \cdot 450) / 60 = \mathbf{37,5 \text{ minutos}}$  . En el caso de la pieza sin contacto con la mesa se observa que tarda mucho más en alcanzar su temperatura deseada de medición por la menor transferencia de calor que se produce con el aire.

Representando los valores de tensión del símil eléctrico junto con los valores reales de temperatura.

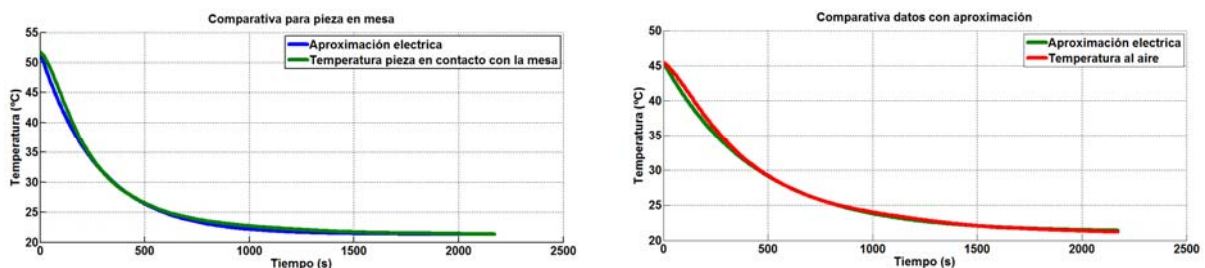


Figura 5 .Comparativa temperatura pieza con y sin contacto con mesa y símil eléctrico

Como se observa en la figura 5, encajan casi a la perfección los valores reales de temperatura con los calculados siguiendo el símil eléctrico.

Es posible considerar este valor independiente de la temperatura puesto que solo depende de la constante del circuito térmico, pero teniendo en cuenta que dependiendo de las temperaturas inicial y final de la pieza el diferencial respecto a la final puede variar.

Podemos concluir que la pieza se comporta térmicamente como un circuito eléctrico RC cuya constante térmica depende de las características físicas de la pieza, principalmente tamaño y material, así como del tipo de contacto que realice con la mesa de medición con una altísima inercia térmica.

**10. RÉGIMEN PERMANENTE.**

Cuando debido a las limitaciones intrínsecas del sistema de acondicionamiento térmico del laboratorio se producen oscilaciones en la temperatura de la sala, estas pueden llegar a afectar a la medición de la pieza debido principalmente a dos parámetros, la cuantía de estas variaciones (temperatura pico a pico) y la frecuencia de esta variación. La variación de temperatura depende fundamentalmente de los umbrales de disparo del sistema de refrigeración y calentamiento siendo estos configurables. La frecuencia está también relacionada con la calidad del aislamiento de la sala así como de la presencia de personas trabajando y ordenadores en funcionamiento.

**11. Símil eléctrico.**

Un filtro RC paso bajo es un circuito formado por una resistencia y un condensador conectados en serie. El filtro paso bajo permite sólo el paso de frecuencias por debajo de una frecuencia en particular llamada frecuencia de corte (Fc) y elimina las frecuencias por encima de esta frecuencia.

La frecuencia de corte es aquella donde la amplitud de la señal entrante cae hasta un 70.7 % de su valor máximo. Y esto ocurre cuando  $X_c = R$  (reactancia capacitiva = resistencia)

Si  $X_c = R$ , la frecuencia de corte será la indicada en la ecuación 3.

$$F_c = \frac{1}{(2 \pi RC)} \tag{3}$$

**12. Análisis de datos para régimen permanente.**

Se han tomado mediciones mediante tres sondas. Una sonda al aire cercana a la mesa de medición y las otras dos adheridas a sendas piezas patrón. Una en contacto a la mesa de medición y la otra separada de ella mediante un material polímero de baja conductividad térmica.

El la figura 6 se puede observar la función de transferencia del sistema dónde la entrada es la temperatura de la sala y las salidas son las piezas al aire (Figura 6a) y sobre mesa (Figura 6b) .

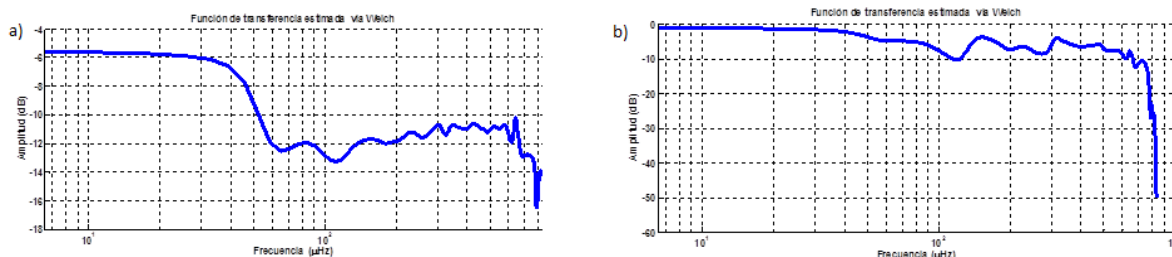


Figura 6. Función de transferencia pieza al aire (a) y en contacto con la mesa (b)

En nuestro caso con el ensayo de enfriamiento, también denominado régimen transitorio, hemos determinado la cte. temporal RC.

Para el caso de la pieza sobre la mesa de granito de la máquina nos encontramos con una frecuencia de corte de 50  $\mu$ Hercios. Es decir un periodo de corte de 333 minutos en los cuales las variaciones de temperatura son enormemente atenuadas (para periodos inferiores).

En el caso de la pieza al aire, lógicamente al tener esta una menor inercia térmica la frecuencia de corte son 800  $\mu$ Hercios lo que supone un periodo de corte de 21 minutos a partir del cual las oscilaciones de temperatura están ampliamente atenuadas.

### 13. ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE DILATACIÓN LINEAL PARA CADA EJE.

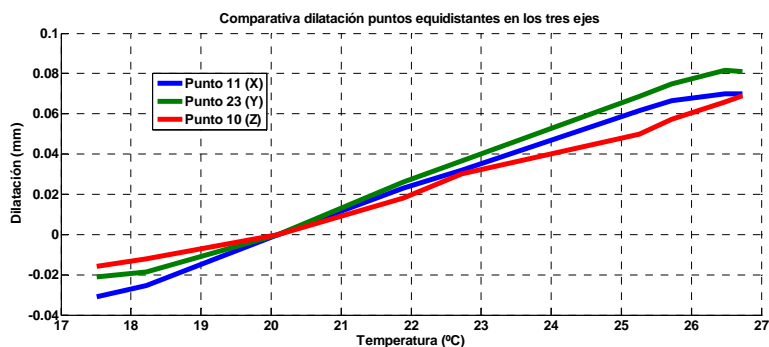


Figura 7. Dilatación en los puntos más alejados de cada eje.

En la figura 7 podemos observar que existe disparidad entre la dilatación de las piezas según el eje de la máquina en el que han sido fabricadas [1]. Se ha utilizado la definición de coeficiente de dilatación de la ecuación 4 para calcular un coeficiente según la temperatura para cada eje y que se puede observar en la figura 8.

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} \tag{4}$$

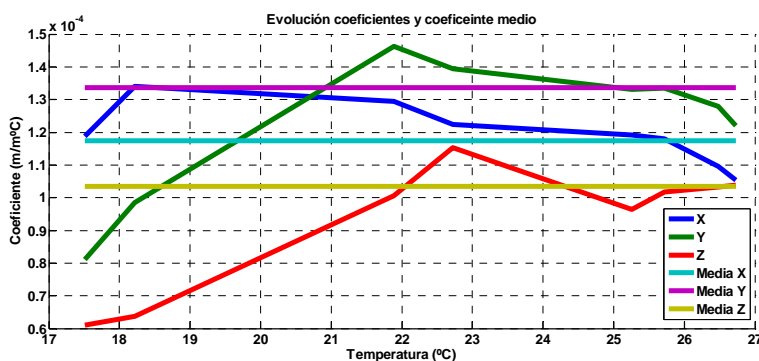


Figura 8. Coeficientes para cada eje según la temperatura y coeficientes medios

Con las mediciones realizadas se ha determinado un coeficiente de dilatación medio entre 20 y 27 °C

	Media X	Media Y	Media Z
$\alpha_L$	$117 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$133 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$103 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Tabla 1. Coeficientes de dilatación lineal

#### 14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES OPERATIVAS.

Para evitar errores de medición debidos a la dilatación de las piezas es indispensable cumplir unos requisitos mínimos de estabilización térmica de la pieza que son directamente dependientes de las características físicas de la pieza así como de las condiciones en las cuales la pieza es introducida en el laboratorio de medición.

No solo hay que tener en cuenta la pieza sino también las características del laboratorio y de su sistema de climatización el cual puede hacer que se produzcan variaciones en las mediciones.

Se recomienda un tiempo de estabilización de la pieza superior a cinco veces la constante de tiempo experimental calculada para una condiciones de reposo en el laboratorio. En todos los casos estudiados este tiempo es inferior a las 24 horas que se suele utilizar por defecto para las piezas metálicas que habitualmente son sometidas al proceso de control geométrico y dimensional en el laboratorio [8].

Se debe calcular en función de la incertidumbre permitida debido a dilataciones el gradiente máximo de temperatura así como las velocidades de enfriamiento y calentamiento. En épocas que la temperatura exterior es superior a los 20 ° C nominales la temperatura la velocidad de enfriamiento es resultado de la eficacia del sistema de climatización mientras que las velocidades de calentamiento se deben a unos correctos sistemas de aislamiento.

#### 15. REFERENCIAS

- [1] F. Xu, H.T. Loh, Y.S. Wong. *Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems* Rapid Prototyping J., 5 (2) (1999), pp. 54–60
- [2] X. Yang . *Environmental effects on the dimensions of SL5195 resin* ,Rapid Prototyping Journal; 2003; 9, 2; ABI/INFORM Global
- [3] J.B. Bryan. *A simple method for testing measuring machines, and machine tools. Part 1, Principles, and applications*, Precision Eng, 4 (1982), pp. 61–68
- [4] J.B. Bryan ,*A simple method for testing measuring machines, and machine tools. Part 2. Construction details*, Precision Eng, 4 (1982), pp. 125–138
- [5] M. Burdekin, J. Park. *Contisure a computer aided system for assessing the contouring accuracy of NC machine tools*, Proceedings of the 27th international MATADOR conference (1998), pp. 1–7
- [6] M. Burdekin, W. Jywe. *Application of CONTISURE for the verification of the contouring performance of precision machines*, Proceedings of the sixth international precision engineering seminar, Braunschweig, Germany (1991), pp. 107–123
- [7] Wim van Drongelen. *Introduction to Filters: The RC Circuit*, Signal Processing for Neuroscientists, 2007, Pages 169-175
- [8] John Clayton Rawlins. *Chapter 10 - RC and RL Time Constants*, Basic AC Circuits (Second Edition), Elsevier Inc. 2000