

XI. Determinación de Parámetros en la Etapa de Enfriamiento

- **Entienda su Producto**
- **Tiempo de Enfriamiento**
- **Optimización con la Temperatura del Molde**
- **Otros Parámetros que Afectan el Enfriamiento**
- **¿Cómo se Organiza un Experimento?**
- **Resumen**

Moldeo UniversalTM es una disciplina que promueve una estructura de eventos organizados.

- Los equipos auxiliares están propiamente instalados y operando.
- Las temperaturas continúan propiamente ajustadas.
- Los ajustes del barril continúan propiamente programados.
- La fuerza de cierre continúa propiamente ajustada.
- La apertura de las platinas, sus movimientos, velocidades y la protección del molde continúan propiamente ajustadas.
- El tiempo de enfriamiento es más grande de lo requerido, evitando que entorpezca la determinación de otros parámetros.
- La velocidad de inyección ideal ha sido determinada, ajustada y se está llenando cerca de un 95% del llenado requerido por el molde.
- La presión límite de inyección ha sido determinada y ajustada.
- Ha verificado y corregido el balance del llenado.
- La presión y el tiempo de empaque han sido determinadas y ajustadas.
- El tiempo de enfriamiento remanente fue ajustado.

Importante -- solamente personal cualificado que se han leído los manuales operacionales de los equipos y entienden la funcionalidad del equipo debe operar y/o hacer ajustes a los mismos.

Entienda su Producto

La optimización de la etapa de enfriamiento dependerá del tipo de producto. Antes de decidir, hágase las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles efectos busco optimizar en la etapa del enfriamiento?
2. ¿El encogimiento es significativo en el producto?
3. ¿Qué factores o parámetros podrían contribuir al efecto o los efectos térmicos que debo evaluar?

Básicamente hay dos parámetros que optimizar, tiempo y temperatura de enfriamiento. También existen otros parámetros que podrían afectar la remoción de calor y, consecuentemente, las dimensiones térmicas y las propiedades del producto moldeado. Un ejemplo es la temperatura del

fundido; fundido caliente requerirá mayor remoción de calor durante el enfriamiento que un fundido más frío.

La temperatura del fundido recomendada por el fabricante de la resina podría requerir una desviación. Moldes con dificultad de llenado podrían requerir incrementar la temperatura del fundido. Recuerde que cambio en la temperatura del fundido significa cambio en la viscosidad. El llenado de cavidades con paredes delgadas podría requerir mayor energía y menor viscosidad que cavidades con paredes gruesas, aun cuando ambos son llenados con el mismo termoplástico.

Entienda su producto antes de decidir qué parámetros podrían ser significativos en la etapa de enfriamiento. El efecto térmico que busca optimizar podría ser una función de un factor (temperatura del molde), de dos factores (temperatura del molde y el tiempo de enfriamiento) o de tres factores (temperatura del molde, tiempo de enfriamiento, y la temperatura del fundido).

Tiempo de Enfriamiento

Sabemos que ciclos operacionales largos podrían ser costosos, consecuentemente el tiempo de enfriamiento debe reducirse al máximo permitido. Para reducir el tiempo de enfriamiento se recomienda disminuirlo cuidadosamente hasta conseguir el tiempo mínimo capaz de desmoldar unas piezas visualmente aceptables.

Extrema cautela se debe tener durante este proceso; piezas atrapadas dentro del molde pueden ocasionar roturas cuantiosas.

En moldes con colada fría, al momento del desmolde, la colada se podría utilizar de referencia. Normalmente la colada es más gruesa que las partes moldeadas y su desmolde se podría utilizar como referencia para reducir el tiempo de enfriamiento.

Reducir el tiempo de enfriamiento es el primer paso; esto no significa que concluimos su determinación. Es probable que se tenga que modificar para garantizar alguna dimensión o propiedad de las partes moldeadas, inclusive hasta combinarlo con otros parámetros para lograr la optimización del enfriamiento.

Optimización con la Temperatura del Molde

Este procedimiento es el más simple y probablemente por donde todos deberíamos comenzar.

1. Determine el tiempo de enfriamiento mínimo.

Cuidadosamente y sin alcanzar el tiempo de plastificación, reduzca el tiempo de enfriamiento hasta conseguir el menor tiempo capaz de desmoldar unas piezas visualmente aceptables.

En el evento de que el tiempo de enfriamiento alcance el tiempo de plastificación y el molde/material permitan bajar aún más el tiempo de enfriamiento, deberá tratar de reducir el tiempo de plastificación. Asumiendo que el proceso le permita reducir el tiempo de plastificación aumentando la velocidad de plastificación, hágalo. Después, verifique la temperatura del fundido; es probable que aumentó.

Procedimiento para medir la temperatura del fundido:

1. Asegúrate de que el proceso haya operado normalmente durante al menos diez ciclos.
2. Precalienta un instrumento a 25°C por debajo de la temperatura deseada. Los “mini-blower” digitales son una opción económica para precalentar.
3. Ajusta el instrumento para mantener la temperatura más alta registrada. Esto elimina la subjetividad al buscar la temperatura de estabilización del fundido.
4. Detén el proceso (por ejemplo, cambiando al modo semiautomático). Una vez que el molde se abre, retira la unidad de inyección y purga el fundido. Puedes hacerlo sobre una superficie removible para facilitar el acceso.
5. Sumerge el instrumento en el fundido y agítalo. Cuando notes que la temperatura comienza a disminuir, retira el instrumento y anota la temperatura pico obtenida. Sigue todas las reglas de seguridad.

Nota:

- Utiliza equipos de seguridad como uniformes, guantes y gafas.
- Adapta este protocolo a tus procesos y asegúrate de que todos midan la temperatura del fundido de la misma manera.

Al aumentar la velocidad de plastificación también se aumenta la fricción, resultando en aumento de temperatura y disminución en la viscosidad del fundido. Dos factores que podrían afectar la reología son los parámetros de empaque y el balance del llenado. En otras palabras, afectaría todos los laboratorios efectuados hasta el momento; es por lo que después de aumentar la velocidad de plastificación se debe medir la temperatura del fundido. Si cambió deberá manipular las zonas de calor del barril hasta igualar la temperatura del fundido anterior.

Nuevamente, evite el cierre del molde con piezas dentro; podría ocasionar roturas cuantiosas.

2. Organice y tabule su experimento.

Seleccione un rango de experimentación, por ejemplo, $70 \pm 4^\circ\text{F}$. Este rango se puede obtener de la ficha técnica del material, del fabricante del molde, o de un moldeador de confianza que haya moldeado con este material o con un producto similar. Decida el número de veces que repetirá cada experimento. No sobrecargue el experimento, de tres a cinco repeticiones debería ser suficiente.

En forma de tabla escriba:

- los dos niveles de temperatura
- el número de repeticiones, tres por temperatura
- incluya espacios para el orden aleatorio o al azar que se efectuará cada experimento
- espacios para las dimensiones o el atributo de las partes moldeadas que está examinando
- incluya espacios para el promedio de las medidas.

Temp.	Repetición	Orden al azar	Medida	Promedio
T_{baja}	1	4	M_4	$\frac{M_4 + M_1 + M_6}{3}$
	2	1	M_1	
	3	6	M_6	
T_{alta}	1	3	M_3	$\frac{M_3 + M_2 + M_5}{3}$
	2	2	M_2	
	3	5	M_5	

XI-1. Tabla de experimento de optimización de la temperatura del molde

Si el atributo que está midiendo es un efecto visual y subjetivo, establezca una escala de apreciación. Por ejemplo, seleccione a una persona que sabe al dedillo como evaluar el efecto que se está midiendo y pídale que evalúe el efecto del 1 al 4, donde:

- 1 = sin defecto
- 2 = defecto insignificante
- 3 = defecto notable
- 4 = defecto inaceptable

Aunque le parezca extraño, efectuar los cambios de un experimento al azar es más representativo de la realidad que cambios de temperatura ordenados. Cambios aleatorios disminuyen los errores a consecuencia de la conveniencia humana.

3. Escriba un protocolo de cómo efectuar el laboratorio.

Reduzca cualquier objetividad escribiendo procedimientos específicos que todos deben seguir.

Ejemplo de un simple protocolo:

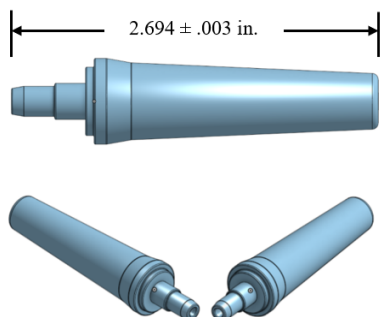
- a) Verifique que la fuente del agua de enfriamiento (*chiller* o torre de enfriamiento) que supe al control de temperatura de agua del molde esté por lo menos 5°C más fría que la temperatura más baja que espera programar.
- b) Determine límites de temperatura de agua que correspondan a los límites de temperatura del molde. Recuerde que la temperatura del agua al molde es normalmente distinta a la temperatura del metal en las cavidades.

- c) Entre experimentos, detenga la máquina hasta alcanzar la temperatura ajustada.
 - d) Una vez la temperatura es alcanzada y la máquina está operando normal, espere 10 ciclos para tomar la muestra.
 - e) Las medidas serán efectuadas por una misma persona en el laboratorio de metrología con un instrumento calibrado.
 - f) Las medidas serán efectuadas en orden, por ejemplo, dos horas después del desmolde.
4. Efectúe el laboratorio y complete la tabla con los resultados.
Siguiendo los procedimientos del protocolo aprobado efectúe sus experimentos, complete la tabla, y calcule los promedios correspondientes.
 5. Evalúe los resultados.
Evalúe los resultados, y seleccione un rango de temperatura que garantice las medidas de las piezas o el efecto que anda buscando.
 6. Corrobore los rangos de temperatura escogidos.
Tome múltiples muestras, a distintos periodos, dentro de los límites de temperatura seleccionados y corrobore que los resultados cumplen con la predicción del efecto siendo estudiado.

Ejemplo:

Este ejercicio fue efectuado por estudiantes de la Universidad de Puerto Rico, recinto de Mayagüez. El material utilizado es polietileno de baja densidad (LDPE) con un molde de dos cavidades.

El laboratorio se efectuó con el propósito de medir el efecto de la temperatura del molde en el encogimiento. Los estudiantes declararon medida crítica:



XI-2. Ejemplo de piezas de un molde de dos cavidades

La ficha técnica del fabricante de la resina especificaba un rango de temperatura de molde entre 70°F y 90°F.

Protocolo del experimento:

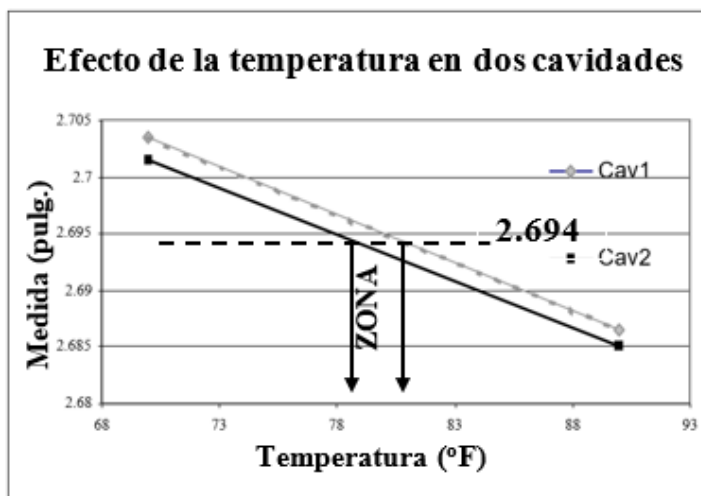
- Hay dos niveles de temperatura, 70°F y 90°F.
- Hay tres repeticiones por nivel de temperatura.
- Cada experimento se hará al azar.
- El tiempo de enfriamiento se fijará a 18 segundos.
- Entre experimentos se detendrá la máquina hasta alcanzar la temperatura ajustada.
- Una vez operando se tomará la muestra después del ciclo 10.
- Las medidas se efectuarán en orden dos horas después del desmolde.
- Una misma persona tomará las medidas seleccionadas.
- Un operador permanecerá fijamente atento evitando el cierre del molde con piezas atascadas en las cavidades durante todo el experimento.

Resultados del experimento:

Temperatura de molde (°F)	Largo promedio (pulgadas)	
	Cavidad 1	Cavidad 2
70	2.7035	2.7015
90	2.6865	2.6850

XI-3. Tabla con resultados de temperatura del molde en medida crítica

Para entender el efecto, gráficas de temperatura contra dimensión son creadas, una por cada cavidad.

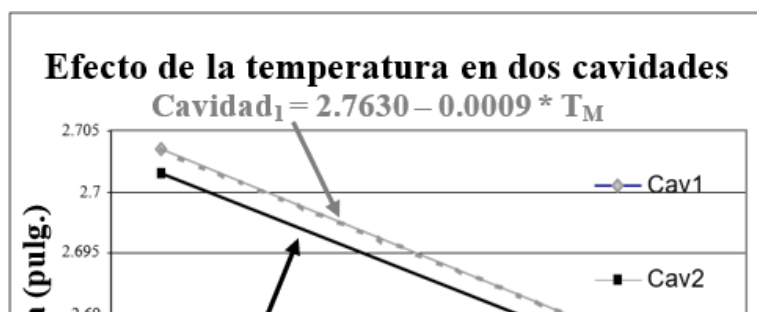


XI-4. Gráfica del efecto de la temperatura de molde en medidas críticas

La gráfica de largo contra temperatura revela un claro efecto de la temperatura en el largo de las piezas. Trazando una línea al largo promedio de 2.694 pulgadas, podemos predecir que la Cavidad 2 debería estar algo sobre 78°F, y la Cavidad 1 debería estar algo cerca de 80°F para garantizar el largo promedio.

Con una ecuación de predicción por cavidad se puede simplificar la selección de un rango de temperatura aceptable. En este ejemplo la ecuación es simple, ya que es la ecuación de una línea, $Y = Y_o + MX$, donde Y es la medida de la pieza, Y_o es el intercepto en la coordenada de medición, M es la pendiente y X es la temperatura del molde. El valor de estas constantes se puede encontrar usando matemáticas simples o con Excel.

Por lo regular dos puntos son suficiente, pero si se sospecha que el resultado no es lineal, se pueden utilizar puntos intermedios.



XI-5. Gráfica de ecuaciones lineales de temperaturas de molde en medida crítica de dos piezas

Resolviendo las ecuaciones por la temperatura, obtenemos:

$$T_{M1} = (2.7630 - \text{largo cavidad}_1) / 0.0009$$

$$T_{M2} = (2.7592 - \text{largo cavidad}_2) / 0.0008$$

Sustituyendo los límites de distancia (2.694 ± 0.003) de 2.697 pulgadas y 2.691 pulgadas en ambas ecuaciones, obtenemos:

	Dimensión alta 2.697 pulg.	Dimensión baja 2.691 pulg.
Temperatura cavidad 1	73 °F	80 °F
Temperatura cavidad 2	78 °F	85 °F
Rango	78 °F	80 °F

XI-6. Tabla con límites de temperaturas de molde en medida crítica de dos piezas

Evaluemos los resultados: si la temperatura del molde se ajusta a 73°F se saca de dimensiones a la cavidad 2, ya que su mínimo es 78°F; si la temperatura es ajustada a 85°F se saca de dimensiones la cavidad 1 ya que máximo es 80°F. El rango operacional entonces sería entre 78°F y 80°F.

Otros Parámetros que Afectan el Enfriamiento

Aunque los parámetros de control durante la etapa de enfriamiento son el tiempo de enfriamiento y la temperatura del molde, hay que reconocer que la temperatura del fundido contribuye de igual manera.

Imaginemos un producto donde, después de haber efectuado el laboratorio de temperatura de molde anterior, se necesite de un control de dimensiones térmicas más controlado. Se decide optimizar estas dimensiones térmicas, evaluando la contribución de tres factores:

$$T_M = \text{temperatura del molde}$$

t = tiempo de enfriamiento
 T_F = temperatura del fundido

Las dimensiones críticas se podrían representar con la siguiente ecuación lineal:

$$\text{Dimensión crítica, } D_C = \bar{D}_C + \beta_0 T_M + \beta_1 t + \beta_2 T_F + \beta_3 T_M t + \beta_4 T_M T_F + \beta_5 t T_F + \beta_6 T_M T_F t$$

donde:

\bar{D}_C = promedio de las medidas

$\beta_0 T_M$ = efecto de la temperatura del molde

$\beta_1 t$ = efecto del tiempo de enfriamiento

$\beta_2 T_F$ = efecto de la temperatura del fundido

$\beta_3 T_M t \dots \dots \beta_6 T_M T_F t$ = efectos combinados

y los símbolos β_0 a β_6 son constantes.

En este tipo de ejercicios se presume que el comportamiento es lineal. Si el laboratorio de **Moldeo UniversalTM** es efectuado en el orden recomendado, los ejecutantes quienes tienen un buen entendimiento de la morfología de termoplásticos, de las dimensiones térmicas, y de las dimensiones de masa podrán seleccionar rangos experimentales razonables para cada factor.

Si los rangos de experimentación son muy grandes, por ejemplo $\pm 10^\circ\text{F}$ de temperatura del fundido, con seguridad los resultados serían no lineales y se requeriría de una ecuación más compleja.

La selección de los factores es importante, adjudicar un efecto a múltiples factores, como por ejemplo temperatura del molde, tiempo de enfriamiento, temperatura del fundido, y presión de empaque, sin fundamentos complicaría y encarecería el laboratorio. La mayoría de los efectos se corrigen experimentando con un solo parámetro. Por ejemplo, una dimensión crítica en un material semi-cristalino es probable que se pueda controlar con la temperatura del molde. Evite complicar el laboratorio de enfriamiento.

Veamos otro ejemplo donde se sospecha que la presión de empaque tiene un efecto significativo en las dimensiones del producto. En este laboratorio se presume que las dimensiones críticas, además de ser función térmica, son función de cantidad de material (dimensiones de masa) y se consideran dos factores:

T_M = temperatura del molde

P = presión de empaque

$$\text{Dimensión crítica, } D_C = \bar{D}_C + \beta_0 T_M + \beta_1 P + \beta_2 T_M P$$

Donde:

\bar{D}_C = promedio de las medidas

$\beta_0 T_M$ = efecto de la temperatura del molde

$\beta_1 P$ = efecto de la presión de empaque

$\beta_2 T_M P$ = efecto combinado

El efecto combinado es cuando dos o más factores, o parámetros, se combinan afectando el efecto que se está evaluando. Un ejemplo hipotético: dos empleados trabajan por separado, efectuando la misma labor. Su trabajo es empacar productos moldeados en cajas, y cada uno empaca 50 cajas al día. Un día deciden trabajar en equipo; uno arma las cajas y las llena de producto, el otro las sella y las estiba. Al final del día, empacaron 120 cajas. El efecto combinado fue empacar 20 cajas más por día. De igual manera sucede cuando dos parámetros se combinan, creando un efecto en el producto moldeado.

¿Cómo se Organiza un Experimento de Enfriamiento?

1. Establezca el objetivo y el, o los efectos, que se van a medir.
2. Identificar cuáles factores (parámetros) se presume tienen algún efecto y cómo están relacionados con el efecto que se va a examinar. La selección de factores es probablemente la parte más delicada del proceso. Incluya únicamente factores con alta probabilidad de afectar el efecto evaluado en el producto moldeado. Un ejercicio de más de un parámetro o factor consume tiempo y recursos; sea cuidadoso con su diseño o podría terminar con

resultados inconclusos. La mayoría de los laboratorios de enfriamiento se efectúan con un solo factor, temperatura del molde.

3. Seleccione los límites, o rangos, de cada factor. Aquí se debe ser bastante juicioso; un rango demasiado grande podría crear resultados no lineales, crear resultados inconclusos y complicar el experimento. Un rango muy pequeño podría revelar no contribución al efecto y sí podría existir.
4. Tabule el experimento; escriba espacios para las variables de los efectos y sus combinaciones, espacios para los números de repeticiones, y números del experimento.

	Factores del proceso		Repeticiones		
	T_M (°C)	t (s)	I	II	III
1	20	4	1	2	3
2	20	12	4	5	6
3	25	4	7	8	9
4	25	12	10	11	12

XI-7. Tabla de parámetros (temperatura y tiempo de enfriamiento), con sus combinaciones y sus repeticiones

5. Escriba un protocolo de cómo efectuar el laboratorio.
6. Efectúe el laboratorio, y tome sus muestras según es indicado en el protocolo escrito.
7. Evalúe los datos y obtenga resultados. Si el laboratorio es de dos factores (ej. tiempo de enfriamiento y temperatura de molde) con un molde de pocas cavidades (4 o menos), el análisis de la data se podría hacer con Excel. Ahora, cuando hay más de dos variables y más de 4 cavidades, utilice un programa estadístico.

Los resultados deben revelar los factores significativos y no significativos, las interacciones significativas y no significativas.

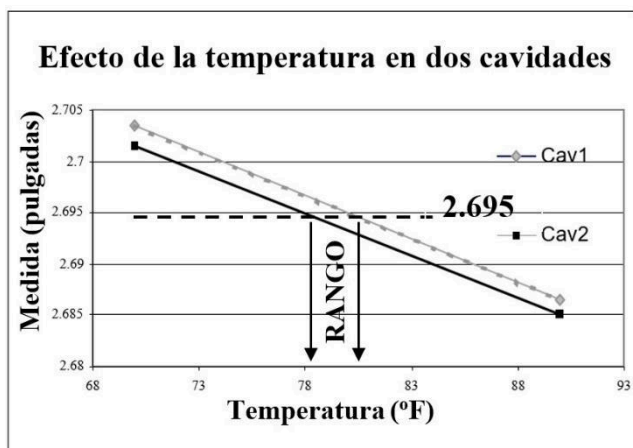
Resumen

- Inicie la optimización de la etapa de enfriamiento encontrando el tiempo de enfriamiento mínimo que produce piezas desmoldables y visualmente aceptables.
- El primer laboratorio que se debe efectuar es únicamente con la temperatura del molde.
- Se considerará un segundo factor solamente cuando no consiguió optimizar la etapa de enfriamiento con la temperatura del molde.
- Cuando el efecto es un atributo, por ejemplo, un defecto visual o físico, seleccione a una sola persona que sepa evaluar el efecto y establezca algún sistema numérico de evaluación que represente el criterio de aceptación.
- Reduzca la objetividad del laboratorio escribiendo un protocolo de cómo efectuar el mismo.
- Laboratorio de dos factores (ej. tiempo de enfriamiento y temperatura de molde) con un molde de pocas cavidades (4 o menos), el análisis de la data se podría hacer con Excel. Si hay más de dos factores y más de 4 cavidades, utilice un programa estadístico.

Preguntas

- 1) Durante la optimización de la etapa de enfriamiento,
 - a. el tiempo de enfriamiento se ajusta igual al tiempo de empaque.
 - b. la presión y el tiempo de empaque han sido determinadas y ajustadas.
 - c. la temperatura del fundido, dado a que no afecta la remoción de calor y ni las dimensiones térmicas, se mantiene fija.
- 2) Cuando se organiza un experimento de optimización de temperatura del molde, incluya más de diez repeticiones por experimento y obtendrá resultados más certeros.
 - a. Cierto, el experimento mejora cuando se incrementan el número de repeticiones.
 - b. Falso, no sobrecargue el experimento; de tres a cinco repeticiones debería ser suficiente.
- 3) Seleccione todas las correctas. Durante la optimización de la etapa de enfriamiento,
 - a. ciclos operacionales largos podrían ser costosos, consecuentemente el tiempo de enfriamiento debe reducirse al mínimo, garantizando desmolde y calidad de pieza.
 - b. se debe tener extrema cautela durante la optimización de la etapa de enfriamiento, piezas atrapadas dentro del molde pueden ocasionar roturas cuantiosas.
 - c. durante la optimización del tiempo de enfriamiento, en un moldeo convencional, garantice que este sea siempre mayor que el tiempo de plastificación.
 - d. todas las anteriores.
- 4) En un experimento de optimización de enfriamiento, los ajustes de parámetros durante la compilación de datos se efectúan al azar (aleatorios).
 - a. Cierto, ya que cambios aleatorios disminuyen los errores a consecuencia de la conveniencia humana.
 - b. Falso, ya que cambios aleatorios complican el laboratorio y no contribuyen al experimento.

- 5) Seleccione todas las correctas. En un experimento de optimización de enfriamiento:
- la fuente del agua de enfriamiento (“*chiller*” o torre de enfriamiento) que suple al control de temperatura de agua del molde debe estar por lo menos 5°C (9°F) más fría que la temperatura más baja que espera programar.
 - la temperatura del agua al molde es normalmente igual a la temperatura del metal en las cavidades.
 - corrobore los resultados, con valores fuera de los rangos operacionales obtenidos del experimento.
- 6) La gráfica muestra el efecto de la temperatura de molde en una dimensión de las piezas moldeadas. Para una dimensión de 2.695 pulgadas, ¿cuál sería la temperatura más recomendada?



- 80°F
 - 83°F
 - 73°F
- 7) Si se decide optimizar dimensiones evaluando la contribución de tres factores,
- un laboratorio de tres parámetros o factores consume tiempo y recursos, sea cuidadoso en su diseño o podría terminar con resultados inconclusos.
 - cuando uno de los factores es la presión de empaque, se presume que la dimensión evaluada es función de dimensiones de masa.

- c. cuando uno de los factores es la temperatura del fundido, se presume que la dimensión evaluada es función de dimensiones de masa.
- d. Las selecciones a y b son correctas.

8) En un experimento de dos factores, temperatura del molde (T_M) y temperatura del fundido (T_F):

$$\text{Dimensión crítica, } D_C = \bar{D}_C + \beta_0 T_M + \beta_1 T_F + \beta_3 T_M T_F$$

Se descubrió que la temperatura del molde (T_M) y la temperatura del fundido (T_F) son significativas y el efecto combinado no era significativo. Entonces la ecuación se reduciría a:

a. $D_C = \bar{D}_C + \beta_1 T_F + \beta_3 T_M T_F$

b. $D_C = \bar{D}_C + \beta_0 T_M + \beta_1 T_F$

c. $D_C = \beta_0 T_M + \beta_1 T_F$

9) En un experimento con tres factores, temperatura del molde (T_M), temperatura del fundido (T_F) y tiempo de enfriamiento (t), se utiliza la siguiente ecuación lineal:

$$\bar{D}_C + \beta_0 T_M + \beta_1 t + \beta_2 T_F + \beta_3 T_M t + \beta_4 T_M T_F + \beta_5 t T_F + \beta_6 T_M T_F t$$

() () () () ()

Escriba el número de cada definición debajo de su correspondiente componente de la ecuación.

1. promedio de las medidas
2. efecto del tiempo de enfriamiento
3. efectos combinados
4. efecto de la temperatura del fundido

5. efecto de la temperatura del molde