

## A. Anexo A: Propiedades de los materiales para la manufactura de moldes en función de la temperatura.

### A.1 Acero para fabricación de moldes por manufactura aditiva - AM Corrax. 0.03%C -0.3%Si-0.3%Mn-12%Cr-9.2%Ni-1.4%Mo-1.6%Al.

Este material se puede procesar sencilla y eficientemente en la mayoría de los equipos de fabricación aditiva powder bed laser (Uddeholm Tech., 2018). El acero Corrax es un acero de endurecimiento por precipitación con una serie de propiedades únicas que lo hacen ideal para muchas aplicaciones exigentes. Su resistencia superior contra la corrosión, combinada con una dureza de hasta 50HRC y un sencillo tratamiento térmico, hacen de este acero una de las opciones más claras para series de plásticos agresivos a largo plazo como el PVC. Gracias a su composición química, es fácil de procesar por fabricación aditiva. De ahí que también esté disponible en forma de polvo para aplicación del proceso laser powder bed fusión (LPBF) y laser metal deposition (LMD). A continuación, en la Tabla **A.1** sus propiedades a estudiar en el análisis mediante el MEF en función de las temperaturas y sus porcentajes de variación.

**Tabla A.1** Propiedades: a) Mecánicas, b) Térmicas – Dilatación, c) Térmicas – Conductividad para acero AM Corrax para moldes elaborados por manufactura aditiva.

Propiedades mecánicas - Mod.Young			Propiedades térmicas- Dilatación			Propiedades térmicas - Conductividad		
Temperatura °C	MPa-N/mm <sup>2</sup>	% Variación	Temperatura °C	m x 10 <sup>-6</sup>	% Variación	Temperatura °C	W/m°C	% Variación
20	200000		20			20		
200	190000	-5%	200	11.7		200	18	
400	170000	-15%	400	12.3	5%	400	21	17%

a) Módulo de Young

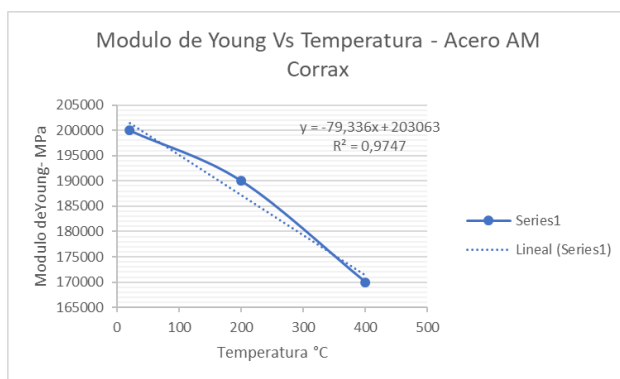
b) Dilatación térmica

c) Conductividad térmica

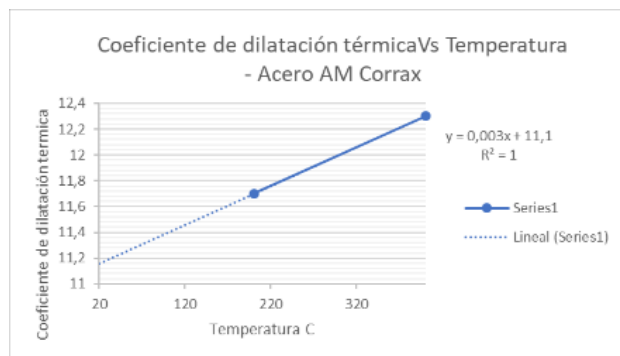
Para este material, los porcentajes de variación para un rango de trabajo de 380°C (20 a 400 °C), en todas las propiedades analizadas, son menores al 20%, para el caso del módulo

de elasticidad la disminución de su módulo a la mayor temperatura es del 15%, para la dilatación térmica aumenta en un 5% y respecto a la conductividad térmica aumenta en un 17% respecto a su valor inicial (a temperaturas de 20°C). En la Fig.A.1 se presentan las gráficas y comportamientos en función de las temperaturas de servicio para el módulo de elasticidad (Fig.A.1a), dilatación térmica (Fig.A.1b) y conductividad térmica (Fig.A.1.c).

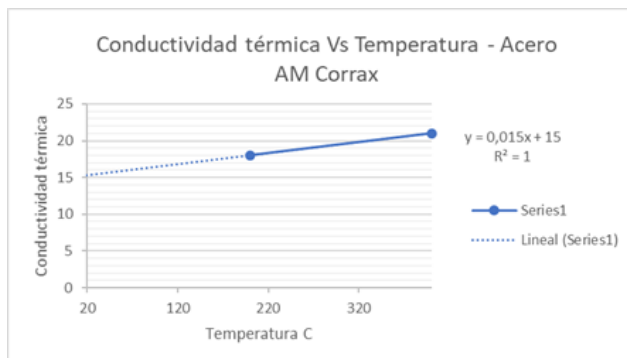
**Fig. A.1** Gráficas de: a) Módulo de elasticidad, b) Dilatación térmica, c) Conductividad térmica en función de la temperatura para acero AM Corrax.



a)



b)



c)

## A.2 Acero para fabricación de moldes por manufactura sustractiva – Impax Supreme. 0.37%C-0.3%Si-1.4%Mn-2%Cr-1%Ni-0.2%Mo.

Este material ofrece una buena maquinabilidad y homogeneidad, excelente aptitud de pulido y es muy utilizado para la fabricación de moldes mediante manufactura de arranque de viruta – sustractiva de la familia AISI P-20 (Industrial, n.d.; Tech., 1999). Impax Supreme es un acero para moldes pre templados con muy buenas propiedades de pulido y fotograbado. El pre templado aporta las siguientes ventajas: no hay riesgos de endurecimiento, no hay costes de temple, ahorro de tiempo; es decir, no hay tiempos de espera para el tratamiento térmico, menor coste de la herramienta ya que no se producen distorsiones que rectificar entre otras.

Es adecuado para una amplia gama de moldes de inyección, soplado y extrusión para plásticos.

A continuación, en la Tabla **A.2** sus propiedades a estudiar en el análisis MEF en función de las temperaturas y sus porcentajes de variación.

**Tabla A.2.** Propiedades: a) Mecánicas, b) Térmicas – Dilatación, c) Térmicas – Conductividad para acero Impax supreme para moldes elaborados por manufactura sustractiva.

Propiedades mecánicas - Mod.Young		
Temperatura °C	MPa-N/mm <sup>2</sup>	% Variación
20	205000	
200	200000	-2.4%

a)

Propiedades térmicas - Dilatación		
Temperatura °C	(mm/mm/°C) x 10 <sup>-6</sup>	% Variación
20	12.3	
200	12.8	4.1%
540	13.7	11.4%

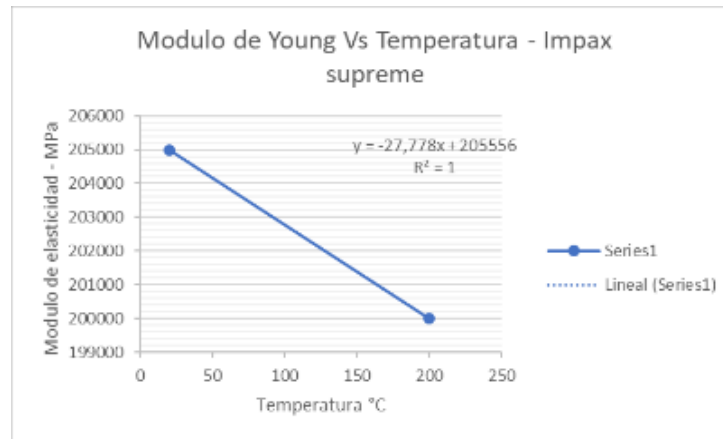
b)

Propiedades térmicas - Conductividad		
Temperatura °C	W/m°C	% Variación
20		
95		
200	28	

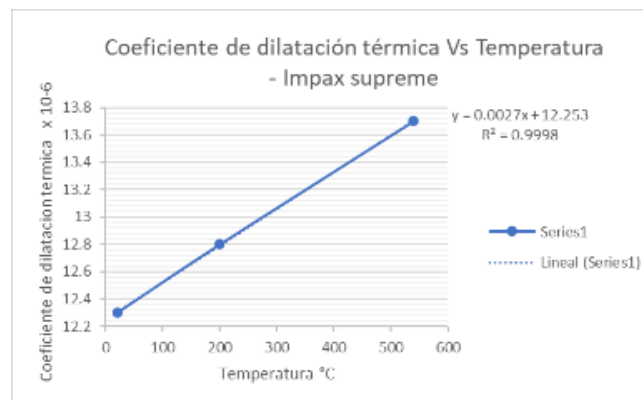
c)

Las variaciones en el módulo de Young del material fueron mínimas para un rango de temperaturas de 180°C (20 a 200 °C), su módulo de elasticidad disminuyó en un 2.4%; respecto a las variaciones, por dilatación térmica, son mínimas para altos rangos de temperatura, se presenta un aumento del 11.4% en un rango de 340 °C. Se muestra el comportamiento de las propiedades de módulo de elasticidad, dilatación y conductividad térmicas en función de la temperatura en la Fig. **A.2 a b, y c**, respectivamente.

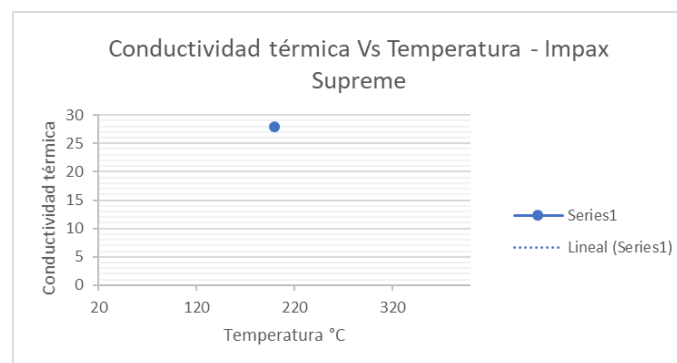
**Fig. A.2** Gráficas de: a) Módulo de elasticidad, b) Dilatación térmica, c) Conductividad térmica en función de la temperatura para acero Impax Supreme.



a)



b)



c)

### A.3 Acero para fabricación de moldes por manufactura sustractiva – Calmax. 0.6%C -0.35%Si-0.8%Mn-4.5%Cr-0.5%Mo-0.2%Va.

Calmax es un acero robusto para trabajos en frio, principalmente aleado al cromo-molibdeno-vanadio y se caracteriza por ofrecer una buena maquinabilidad, tenacidad, estabilidad dimensional, buenas propiedades para el tratamiento térmico de templado, buena pulibilidad, buena capacidad de soldadura, buena aptitud de temple a la llama y alta resistencia al desgaste. Es un acero muy utilizado y recomendado para la fabricación de moldes mediante manufactura de arranque de viruta – sustractiva (Uddeholm Tech., 2010).

La excelente combinación de tenacidad y resistencia al desgaste hacen del acero Calmax un material especialmente adecuado para distintas aplicaciones en moldeo de plásticos. Los moldes realizados con este tipo de acero contarán con una buena resistencia a la abrasión y una vida de producción larga y fiable. Las áreas típicas de aplicación del acero calmax abarcan los moldes para largas series de producción, moldes para plásticos reforzados y moldes para moldeo por compresión.

A continuación, en la Tabla **A.3** sus propiedades a estudiar en el análisis MEF en función de las temperaturas y sus porcentajes de variación.

**Tabla A.3** Propiedades: a) Mecánicas, b) Térmicas – Dilatación, c) Térmicas – Conductividad para acero Calmax para moldes elaborados por manufactura sustractiva.

Propiedades mecánicas - Mod. Young			Propiedades térmicas-dilatación			Propiedades térmicas-conductividad		
Temperatura °C	MPa-N/mm <sup>2</sup>	% Variación	Temperatura °C	m x 10 <sup>-6</sup>	% Variación	Temperatura °C	W/m°C	% Variación
20	194000		100	11.7		20		
200	188000	-3.1%	200	12	2.6%	200	27	
400	178000	-8.2%	400	13	11.1%	400	32	18.5%

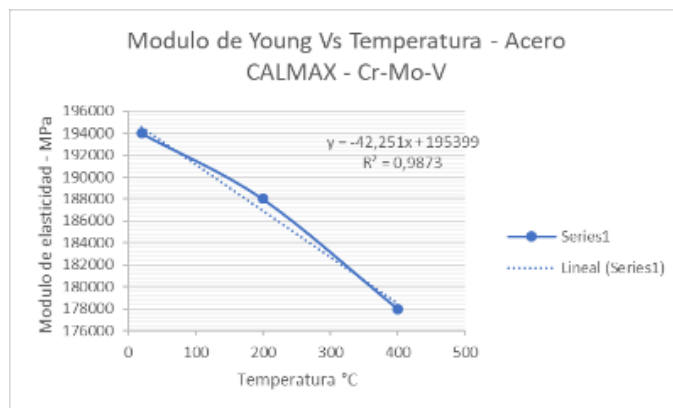
a)

b)

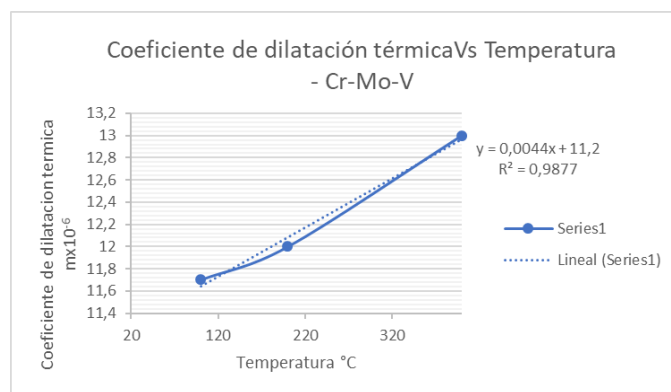
c)

Para el acero Calmax las variaciones en su módulo de Young disminuyen en un 8.2% en una variación de aumento de temperatura de 380°C; la dilatación aumenta en un 11.1% y la conductividad térmica aumenta en un 18.5% para el mismo rango de temperaturas enunciado. En la Fig. **A.3 a b y c**, se muestra el comportamiento de las propiedades módulo de elasticidad, dilatación y conductividad térmica en función de distintas temperaturas, respectivamente, para el acero Calmax.

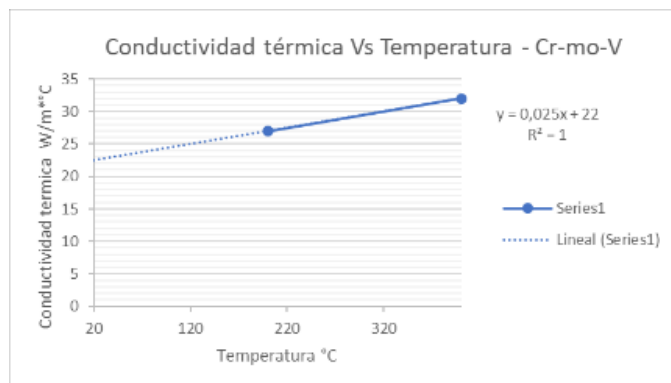
**Fig. A.3** Gráficas de: a) Módulo de elasticidad, b) Dilatación térmica, c) Conductividad térmica en función de la temperatura para acero Calmax.



a)



b)



c)

**A.4 Acero para fabricación de moldes por manufactura sustractiva – Stavax ESR. 0.38%C -0.9%Si-0.5%Mn-13.6%Cr-0.3%Va.**

Este es un acero recomendado para todo tipo de moldeo, especialmente para moldeo de materiales corrosivos y para moldes expuestos a condiciones de trabajo a altas temperaturas, esfuerzos mecánicos cíclicos (Bohler Uddeholm US, 2013). También es usado para moldes de plásticos resistentes a la corrosión de endurecimiento continuo con muy buena capacidad de pulido y larga duración. Como ventajas de este material se presenta un bajo mantenimiento del molde debido a la resistencia a la corrosión; las superficies conservan su acabado original, menor producción durante el almacenamiento y el funcionamiento en condiciones húmedas. La eficiencia de enfriamiento es constante durante toda la vida útil del molde, lo que garantiza tiempos de ciclo constantes.

A continuación, en la Tabla **A.4** sus propiedades a estudiar en el análisis MEF en función de las temperaturas y sus porcentajes de variación.

**Tabla A.4** Propiedades: a) Mecánicas, b) Térmicas – Dilatación, c) Térmicas – Conductividad para acero Stavax ESR para moldes elaborados por manufactura sustractiva.

Propiedades mecánicas - Mod.Young		
Temperatura °C	MPa- N/mm <sup>2</sup>	% Variación
20	200000	
200	190000	-5.0%
400	180000	-10.0%

a)

Propiedades térmicas- Dilatación		
Temperatura °C	/°C x 10 <sup>-6</sup>	% Variación
20		
200	11	
400	11.4	3.6%

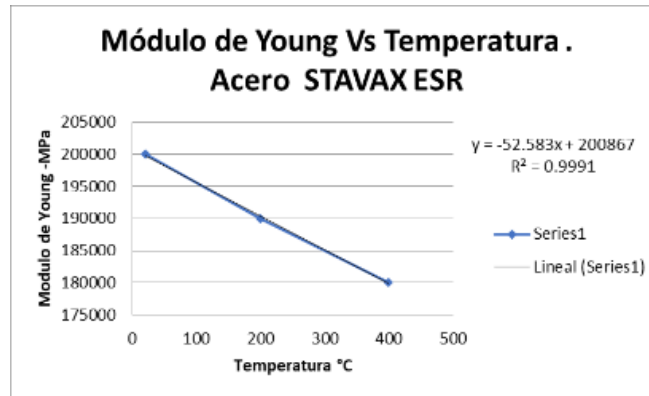
b)

Propiedades térmicas - Conductividad		
Temperatura °C	W/m°C	% Variación
20	16	
200	20	25%
400	24	50%

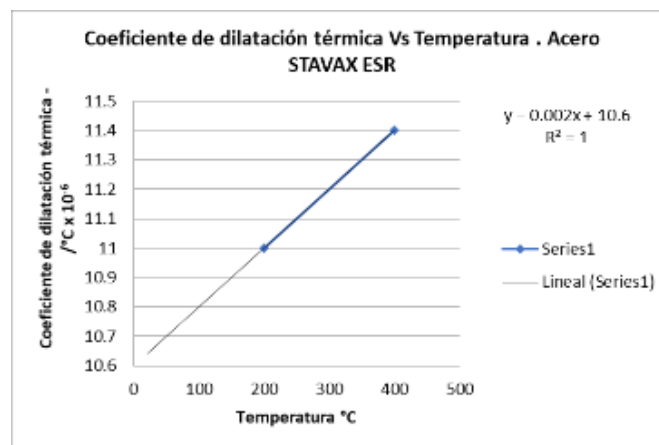
c)

Para el acero Stavax ESR las variaciones en su módulo de Young disminuye en un 10% en una variación de aumento de temperatura de 380°C; la dilatación aumenta en un 3.6% y la conductividad térmica aumenta en un 50% para el mismo rango de temperaturas enunciado. Este material presenta una mayor variación en respuesta del aumento de la temperatura para la conductividad térmica, lo cual lo hace un material susceptible para implementar en el mismo el problema de compensación térmica debido a respuestas notables en la conductividad con aumentos de la temperatura. En la Fig. **A.4** se muestra el comportamiento de las propiedades en función de distintas temperaturas para el acero Stavax ESR, para el módulo de elasticidad (Fig.**A.4a**), dilatación térmica (Fig.**A.4b**) y conductividad (Fig. **A.4c**).

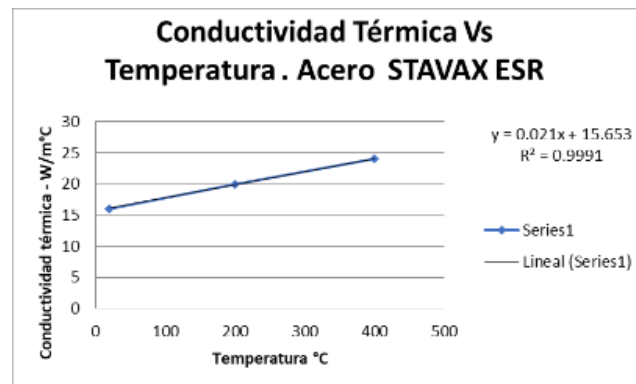
**Fig. A.4** Gráficas de: a) Módulo de elasticidad, b) Dilatación térmica, c) Conductividad térmica en función de la temperatura para acero Stavax ESR.



a)



b)



c)



## A.5 Aluminio para fabricación de moldes por manufactura sustractiva – Al 7075-T6 (Duraluminio)- 6% Zn-2.4%Mg-1.6%Cu-90%Al.

Este material no ferroso, tenido en cuenta en el desarrollo de este proyecto (Capítulo 2-objetivo 1), muy utilizado para moldes de inyección y soplado de termoplásticos. Respecto a los otros materiales analizados sus propiedades son menores, pero para aplicaciones de moldes para inyección de termoplásticos es una gran alternativa por su facilidad de mecanización, costos, y disponibilidad en el comercio (Asteco, 2018). Detallando un poco más la descripción del duraluminio es una aleación de aluminio con cobre, manganeso y silicio. Perteneciente a la familia de aleaciones ligeras. Sus principales propiedades son la alta resistencia a la tracción, elevada resistencia mecánica a temperatura ambiente, buena dureza con valores de hasta 130 HB, alta resistencia a la fatiga y buena resistencia a la corrosión. Sus principales aplicaciones se pueden encontrar principalmente en moldes para inyección de plásticos, porta utillaje de corte, conjuntos mecánicos. Termoformado, proceso usado en vulcanizado, fabricación de piezas y repuestos mecánicos tales como poleas y piñones.

A continuación, en la Tabla **A.5** sus propiedades a estudiar en el análisis MEF en función de las temperaturas y sus porcentajes de variación.

**Tabla A.5** Propiedades: a) Mecánicas, b) Térmicas – Dilatación, c) Térmicas – Conductividad para Duraluminio para moldes elaborados por manufactura sustractiva.

Propiedades mecánicas - Mod. Young			Propiedades térmicas - Dilatación			Propiedades térmicas - Conductividad		
Temperatura °C	Módulo de Young MPa	% Variación	Temperatura °C	um/m-°C	% Variación	Temperatura °C	W/m°C	% Variación
20-50	71700		0-20	21.6		0-100	153	
100	71000	-0.98%	20-100	23.4	8.33%	200	163	6.54%
150	68000	-5.16%	20-100	23.6	9.26%	400	186	21.57%
200	63000	-12.13%	20-200	24.3	12.50%	600	186	21.57%
250	61000	-14.92%	20-300	25.2	16.67%			

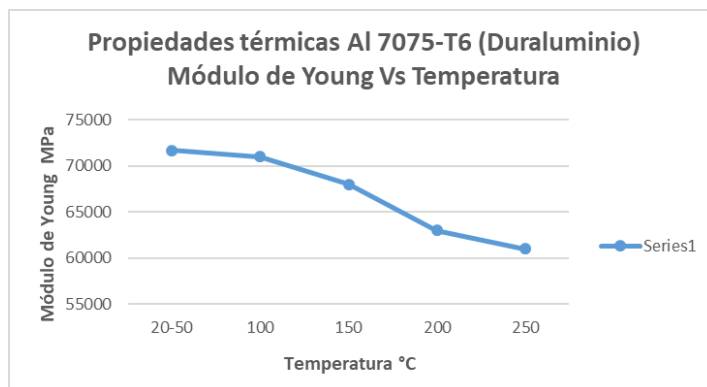
a)

b)

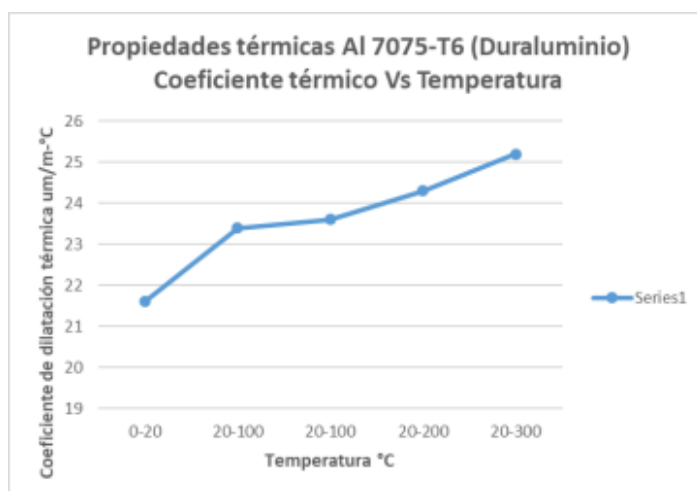
c)

El módulo de Young presenta una disminución del 14.92% en un rango de trabajo de 230 °C; la dilatación térmica aumenta en un 16.67 % en un rango un poco mayor (20-300°C) y un 21.57% de aumento de la conductividad térmica para rangos más altos de servicio entre 100 y 600°C. En la Fig. **A.5 a, b y c** se puede ver el comportamiento de estas propiedades a ciertos incrementos de temperatura.

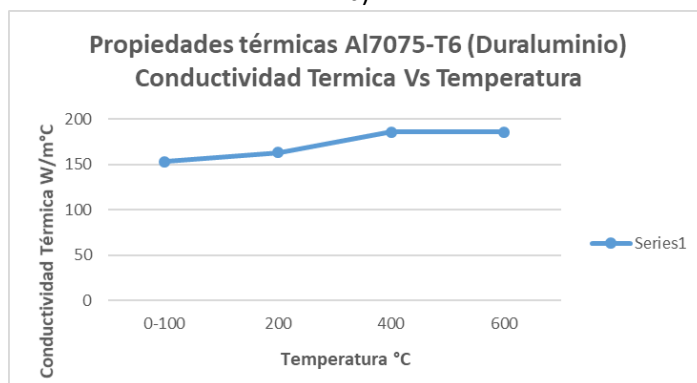
**Fig. A.5** Gráficas de: a) Módulo de elasticidad, b) Dilatación térmica, c) Conductividad térmica en función de la temperatura para Duraluminio.



a)



b)



c)

## A.6 Acero para inyección y fundición de metales Orvar Supreme 0.39%C -1%Si-0.4%Mn-5.2%Cr-1.4%Mo-0,9%V.

Este acero es de gran pureza y estructura muy fina, especial para utillajes sometidas a altas tensiones mecánicas y térmicas como los moldes para fundición inyectada de metales (Uddeholm, 2013). Este es un acero para trabajo en caliente aleado en cromo-molibdeno-vanadio para fabricación de piezas o herramientas; con alta resistencia al desgaste abrasivo y a la fatiga térmica. Como beneficios en el uso de este tipo de aceros se presenta una disminución de costos de mantenimiento, mayor vida útil de los componentes o piezas, una máxima resistencia al desgaste abrasivo y fatiga térmica, además de un ahorro significativo en herramientas o piezas cuando el desgaste obedece a altas temperaturas. Entre las diversas aplicaciones de este tipo de acero se presentan los utillajes para fundición inyectada: piezas para moldes tales como insertos, machos, núcleos, piezas de canales de colada, boquillas, pistones, manguitos; moldes para componentes de automóviles, moldes para piezas ópticas-médicas, moldes para piezas eléctricas, moldes para materiales gran tamaño entre otros.

A continuación, en la Tabla **A.6** se muestran sus propiedades a estudiar en el análisis MEF en función de las temperaturas y sus porcentajes de variación.

**Tabla A.6** Propiedades: a) Mecánicas, b) Térmicas – Dilatación, c) Térmicas – Conductividad para acero Orvar Supreme para moldes de inyección de metales MIM.

Propiedades mecánicas - Mod.Young			Propiedades térmicas- Dilatación			Propiedades térmicas - Conductividad		
Temperatura °C	MPa-N/mm <sup>2</sup>	% Variación	Temperatura °C	/°C x 10 <sup>-6</sup>	% Variación	Temperatura °C	W/m°C	% Variación
20	210000		20			20	25	
400	180000	-14,3%	400	12,6		400	29	16%
600	140000	-33,3%	600	13,2	4,8%	600	30	20%

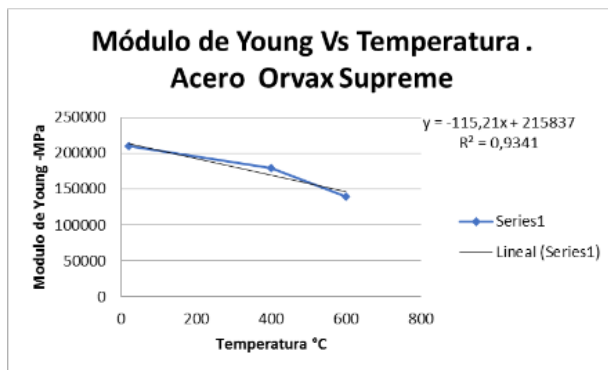
a)

b)

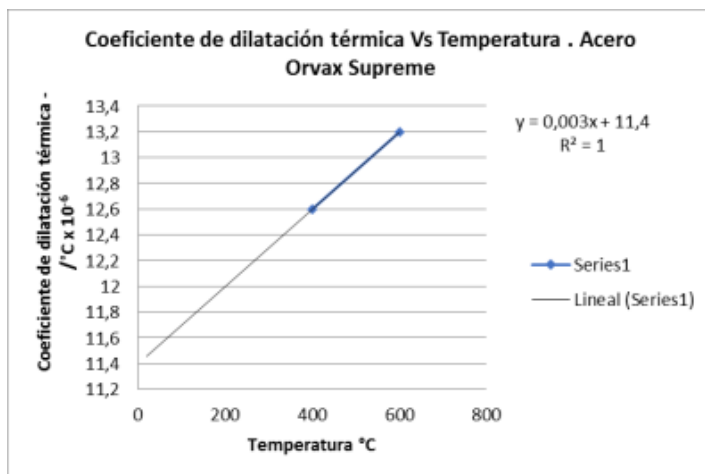
c)

Se observa una reducción del módulo de Young en una tercera parte desde su valor inicial a temperatura ambiente (33.3 %) en un rango de temperaturas que alcanza los 600°C, esto significa en una diferencia o rango de 580 °C; para este mismo rango de temperaturas, se presenta un aumento del 4.8% y del 20% en la dilatación y conductividad térmica, respectivamente, lo cual muestra variaciones mínimas para un alto rango de temperaturas. En la Fig. **A.6 a, b y c** se puede observar el comportamiento de estas propiedades a estos incrementos de temperatura.

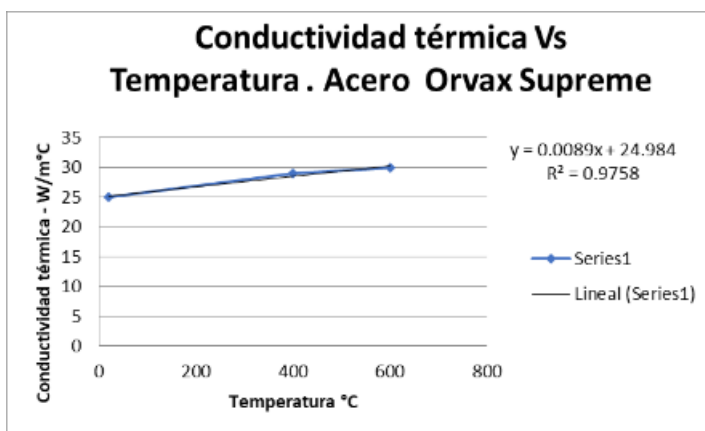
**Fig. A.6** Gráficas de: a) Módulo de elasticidad, b) Dilatación térmica, c) Conductividad térmica en función de la temperatura para acero Orvar Supreme para moldes de inyección de metales MIM.



a)



b)



c)

## A.7 Acero para inyección y fundición de metales AISI SAE 1045 (0.43-0.5) %C –(0.6%-0.9) Mn-0.04%P-0.05%S-(0.2-0.4) %Si.

El acero AISI SAE 1045 es un acero grado ingeniería de aplicación universal que proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo con respecto a los aceros de baja aleación. Es ampliamente utilizado en la industria automotriz (productos forjados y estampados). Se usa en partes de máquinas que requieren dureza y tenacidad como los moldes de inyección, manivelas, chavetas, pernos, engranajes de baja velocidad, cigüeñales, ejes de maquinaria entre otros.

Este acero tiene buen desempeño a temperaturas altas, cargas cíclicas térmicas y mecánicas, además de que es bastante comercializado a costos moderados por lo cual su adquisición es fácil (Aceros, 2013). Este acero amerita su estudio de propiedades térmicas y mecánicas para ser potencialmente utilizado en el desarrollo de moldes de inyección.

A continuación, en la Tabla **A.7** se muestran sus propiedades a estudiar en el análisis MEF en función de las temperaturas y sus porcentajes de variación.

**Tabla A.7** Propiedades: a) Mecánicas, b) Térmicas – Dilatación, c) Térmicas – Conductividad para acero AISI SAE 1045 para moldes de inyección de metales MIM.

Propiedades mecánicas - Mod.Young			Propiedades térmicas- Dilatación			Propiedades térmicas - Conductividad		
Temperatura °C	MPa-N/mm <sup>2</sup>	% Variación	Temperatura °C	/°C x 10 <sup>-6</sup>	% Variación	Temperatura °C	W/m°C	% Variación
100	200000		100	12,3		20-100	52	-
200	195000	-3%	200	12,7	3%			
400	190000	-5%	400	13,7	11%			

a)

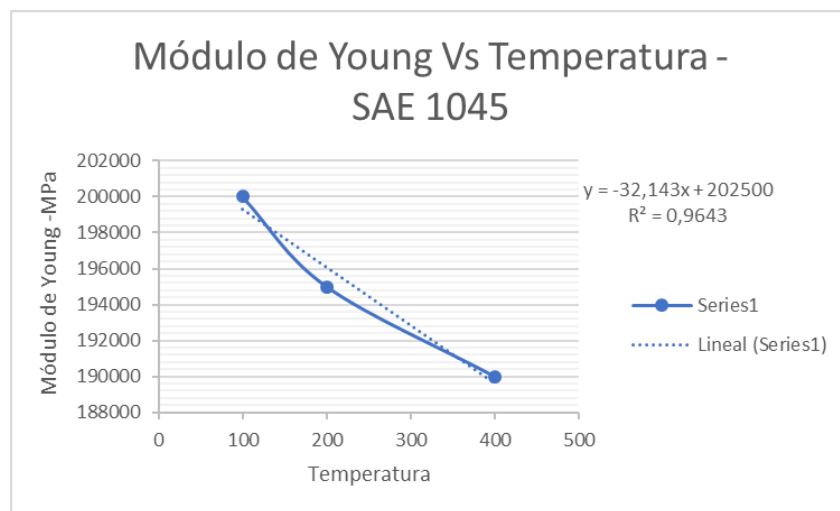
b)

c)

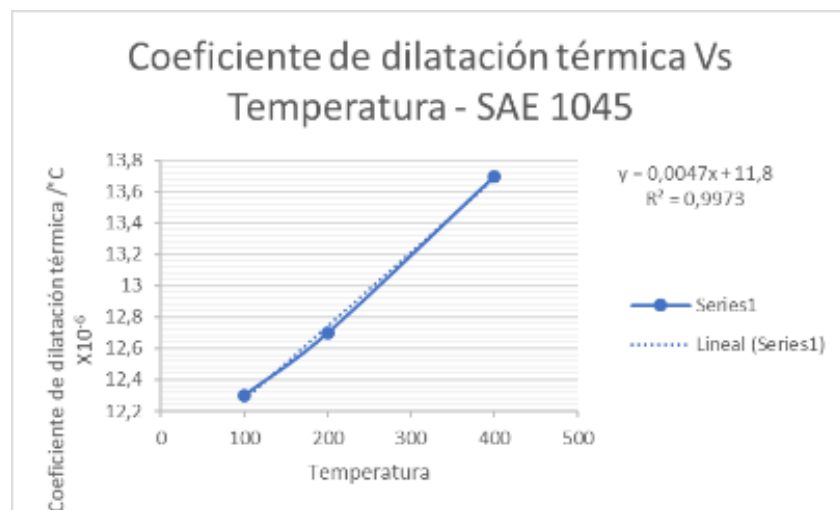
Se observa una reducción del módulo de Young del 5% en un rango de temperaturas de 300 °C; es una de las menores variaciones o disminuciones en el módulo de Young respecto a los otros materiales analizados, esto lo hace ser uno de los materiales más rígidos con menor pérdida de propiedades mecánicas en función del aumento de la temperatura.

Para este mismo rango de temperaturas, se presenta un aumento del 8% en dilatación térmica, lo cual muestra variaciones mínimas para un alto rango de temperaturas. En la Fig.**A.7a** se presenta el comportamiento del módulo de Young, y en la Fig. **A.7b** se muestra el comportamiento de la dilatación térmica en función de los incrementos de temperatura.

**Fig. A.7** Gráficas de: a) Módulo de elasticidad, b) Dilatación térmica en función de la temperatura para acero AISI SAE 1045 para moldes de inyección de metales MIM.



a)



b)

En la Tabla **3.4** del capítulo 3, se presentan los cambios por temperaturas en las propiedades térmicas y mecánicas para los materiales estudiados en este anexo, consolidando los resultados de dichos materiales generalmente utilizados en herramentales o moldes para plásticos y metales.