

Proyecto de Diseño

Bryan Aburto¹, Nicolás Díaz ¹, Hector Sepulveda¹, and Benjamin Raposo¹

¹Universidad de La Frontera, Chile

June 20, 2018

Abstract

En este estudio, se evaluara la producción de acero SAE 1020 con películas de plástico de polietileno, adheridos con adhesivo en una de sus superficies, para esto el proceso de unión se realizara con láser, que proporcionara un flujo de calor constante y uniforme durante un periodo de tiempo específico, esto es para que la película se adhiera, este proceso debe curarse a más de 95°C por 12 segundos, tener en cuenta que el polietileno se degrada a más de 190°C, y con el fin de maximizar la producción, se hicieron cálculos, para estimar el mínimo intervalo de tiempo de la aplicación del láser, para un adecuado proceso de curado.

Palabras claves:

Transferencia de calor, convección, flujo de calor, radiación, conducción .

Introducción

El conocimiento de la transferencia de calor, nos permite modelar distintos fenómenos, ya sean naturales o no, en este caso, para poder adherir una película de plástico polietileno a láminas de acero, se debe entregar calor a un adhesivo, de tal forma que este no se degrade, debido a una alta temperatura. Este proceso, al igual que muchos más, puede ser modelado mediante distintos cálculos termodinámicos, en los cuales, la transferencia de calor juega un rol fundamental, debido a que nos permite estimar de manera muy aproximada, el comportamiento real de este proceso, de tal forma que podamos hacerlo más eficiente

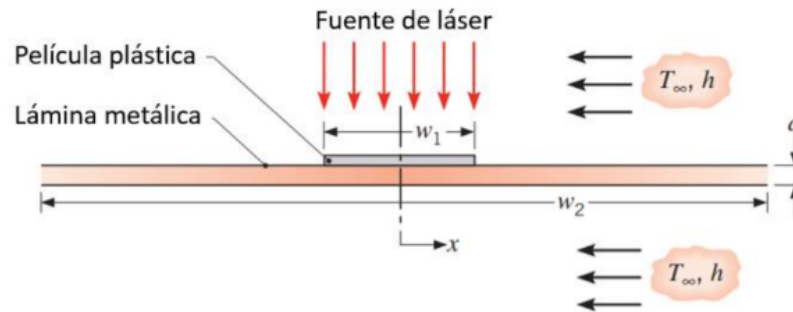
nomenclatura

| | |
|-----------------|--|
| T_{∞} | Temperatura ambiente, °C |
| T_s | Temperatura de la superficie, °C |
| u_{∞} | Velocidad del aire, $m s^{-1}$ |
| h | Coefficiente de convección, $W m^{-2}K^{-1}$ |
| Nu | Número de Nusselt |
| \overline{Nu} | Número de Nusselt promedio |
| Re | Número de Reynolds |
| ρ | Densidad, $kg m^{-3}$ |
| C_p | Calor específico, $kJ kg^{-1}K^{-1}$ |
| ν | viscosidad cinemática, m^2s^{-1} |
| k | Conductividad Térmica, $W m^{-1}K^{-1}$ |
| Pr | Número de Prandtl |

Figure 1: Nomenclatura

Proceso de curado

La figura 2, muestra el un diagrama general del proceso, junto a las características y datos conocidos.



| Datos entregados | Valor |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Espesor de la lámina | $d = 1.25 \text{ mm}$ |
| Ancho de la lámina | $W = 500 \text{ mm}$ |
| Largo de la lámina | $w_2 = 500 \text{ mm}$ |
| Espesor de la película de polietileno | $d = 0.12 \text{ mm}$ |
| Ancho de la película de polietileno | $w = 400 \text{ mm}$ |
| Largo de la película de polietileno | $l = 42 \text{ mm}$ |
| Velocidad del aire | $u_{\infty} = 12 \text{ m/s}$ |
| Temperatura ambiente | $u_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ |
| Flujo de calor constante del laser | $q''_o = 90000 \text{ W/m}^2$ |

Figure 2: Diagrama del proceso junto con sus datos conocidos

Propiedades de los materiales

Tenemos que conocer ciertas características de los materiales, específicamente, la conductividad térmica, de tal manera tenemos las propiedades que se observan en la figura 3

| <i>propiedades / materiales</i> | SAE 1020 | Polietileno |
|---|----------|-------------|
| Largo [mm] | 500 | 42 |
| Ancho [mm] | 500 | 400 |
| Espesor [mm] | 1,2 | 0,12 |
| Conductividad térmica [$\frac{W}{K \cdot m}$] | 47 | 0,43 |
| Calor específico [$\frac{J}{Kg \cdot K}$] | 460 | 1900 |

Figure 3: Propiedades de los materiales

Suposiciones

Debido a que los sistemas reales, pueden ser muy complejos, se hicieron las siguientes suposiciones de tal manera que el problema se pueda resolver de una forma determinada, sin alejarse tanto de su realidad, las cuales son:

- La película de plástico es transparente, por lo tanto no refleja ni absorbe la radiación entregada por el láser.
- Las propiedades de los materiales son constantes.
- La temperatura inicial de los componentes esta a temperatura ambiente.
- El flujo de calor entregado por el láser sera uniforme sobre la superficie de polietileno.
- Calor transferido unidireccionalmente.

Coeficiente de transferencia de calor por convección (h)

Para obtener el h calcularemos el coeficiente local de convección adimensional el cual se conoce como número local de Nusselt

$$Nu = \frac{hl}{k_f} = f_4(x, Re_L, Pr)$$

Entonces, el número de Nusselt es una función del Reynolds y Prandtl y la relación funcional se determina para cada geometría de forma analítica, numérica o experimental. Para una placa plana, la funcional toma la forma

$$Nu_x = C Re_x^m Pr^n$$

Donde m y n dependen de la condición del problema .

El primer paso entonces sera determinar si el flujo es laminar o turbulento, para ello calcularemos el numero de Reynolds recordando que si toma un valor menor a 5×10^5 entonces hablaremos de un flujo laminar.

$$Re_L = \frac{u_{\infty} L}{\nu} < 5 \times 10^5 \quad \text{implica flujo laminar}$$

Como el valor de la viscosidad (ν) depende de la temperatura del fluido, y esta varia con el tiempo, realizaremos este calculo para diferentes temperaturas entre un rango de 25 a 190 , ya que 25 es el valor minimo de temperatura que el enfriante puede conseguir, 190 es el maximo valor que podemos utilizar sin salirnos de los parametros del problema. Ahora como se utiliza una temperatura promedio T_{oo} y T_s obtenemos como el rango de temperaturas desde 0 a 82.5 donde obtendremos los valores de sus propiedades en la tabla de la figura 4:

| T (°C) | ρ (kg/m ³) | c_p (kJ/kg·K) | $\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²) | $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s) | $k \cdot 10^3$ (W/m·K) | $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s) | Pr |
|-----------|--------------------------------|--------------------|---|---|---------------------------|--|--------|
| 0 | 1.292 | 1.006 | 17.29 | 13.38 | 23.64 | 18.17 | 0.7362 |
| 5 | 1.269 | 1.006 | 17.54 | 13.82 | 24.01 | 18.80 | 0.7350 |
| 10 | 1.247 | 1.006 | 17.78 | 14.26 | 24.39 | 19.44 | 0.7336 |
| 15 | 1.225 | 1.007 | 18.02 | 14.71 | 24.76 | 20.08 | 0.7323 |
| 20 | 1.204 | 1.007 | 18.25 | 15.16 | 25.14 | 20.74 | 0.7309 |
| 25 | 1.184 | 1.007 | 18.49 | 15.61 | 25.51 | 21.40 | 0.7296 |
| 30 | 1.164 | 1.007 | 18.72 | 16.08 | 25.88 | 22.08 | 0.7282 |
| 35 | 1.146 | 1.007 | 18.95 | 16.54 | 26.25 | 22.76 | 0.7268 |
| 40 | 1.117 | 1.007 | 19.18 | 17.02 | 26.62 | 23.45 | 0.7255 |
| 45 | 1.110 | 1.007 | 19.41 | 17.49 | 26.99 | 24.16 | 0.7241 |
| 50 | 1.092 | 1.007 | 19.63 | 17.97 | 27.35 | 24.87 | 0.7228 |
| 55 | 1.076 | 1.007 | 19.86 | 18.46 | 27.72 | 25.59 | 0.7215 |
| 60 | 1.060 | 1.007 | 20.08 | 18.95 | 28.08 | 26.31 | 0.7202 |
| 65 | 1.044 | 1.007 | 20.30 | 19.45 | 28.45 | 27.05 | 0.7190 |
| 70 | 1.029 | 1.007 | 20.52 | 19.95 | 28.81 | 27.79 | 0.7177 |
| 75 | 1.014 | 1.008 | 20.74 | 20.45 | 29.17 | 28.55 | 0.7166 |
| 80 | 0.999 | 1.008 | 20.96 | 20.97 | 29.53 | 29.31 | 0.7154 |
| 85 | 0.986 | 1.008 | 21.17 | 21.48 | 29.88 | 30.07 | 0.7143 |

Figure 4: Propiedades del aire atmosférico (1atm)

| T promedio (°C) | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Re * 10 ⁵ (-) | 4,484 | 4,342 | 4,208 | 4,079 | 3,958 | 3,844 | 3,731 | 3,628 | 3,525 | 3,431 | 3,339 | 3,25 | 3,166 | 3,085 | 3,008 | 2,934 | 2,861 | 2,793 |

Figure 5: Valores del numero de Reynolds

Como se aprecia en la figura 5 los valores obtenidos del numero re Reynolds no exceden el valor de 5×10^5 por lo tanto se puede concluir que según las características del problema, el flujo permanecerá laminar.

Sabiendo que el flujo es laminar y el problema se puede aproximar como una placa plana podemos calcular el numero de Nusselt promedio como :

$$Nu_x = 0.664 Re_x^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{para } 0.6 < Pr < 50$$

Utilizando el mismo rango de temperaturas promedio para el calculo del numero de Reynolds, obtenemos el numero de Nusselt y el coeficiente de convección promedio:

| T promedio (°C) | Reynolds (-) | Pr (-) | Nusselt (-) | h (W/m² K) |
|----------------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|
| 0 | 448430,49 | 0,74 | 401,5 | 18,98 |
| 5 | 434153,4 | 0,74 | 394,84 | 18,96 |
| 10 | 420757,36 | 0,73 | 388,45 | 18,95 |
| 15 | 407885,79 | 0,73 | 382,24 | 18,93 |
| 20 | 395778,36 | 0,73 | 376,28 | 18,92 |
| 25 | 384368,99 | 0,73 | 370,6 | 18,91 |
| 30 | 373134,33 | 0,73 | 364,91 | 18,89 |
| 35 | 362756,95 | 0,73 | 359,57 | 18,88 |
| 40 | 352526,44 | 0,73 | 354,25 | 18,86 |
| 45 | 343053,17 | 0,72 | 349,23 | 18,85 |
| 50 | 333889,82 | 0,72 | 344,33 | 18,83 |
| 55 | 325027,09 | 0,72 | 339,53 | 18,82 |
| 60 | 316622,69 | 0,72 | 334,91 | 18,81 |
| 65 | 308483,29 | 0,72 | 330,39 | 18,8 |
| 70 | 300751,88 | 0,72 | 326,03 | 18,79 |
| 75 | 293398,53 | 0,72 | 321,85 | 18,78 |
| 80 | 286123,03 | 0,72 | 317,66 | 18,76 |
| 85 | 279329,61 | 0,71 | 313,7 | 18,75 |

Figure 6: Tabla de las propiedades del aire a 1 atm de presión

Se puede apreciar que los valor de h permanece casi constante, por lo que podemos aproximar lo como $h=18.85 \text{ w/m}^2\text{K}$ con un error del 0.6522 % .

Ademas, con este valor aproximado de h podemos validar el método de resistencia interna despreciable mediante el numero de Biot

$$Biot = \frac{hL}{k} = \frac{18.85 \cdot 0.5}{47} = 0.2011 > 1$$

se afirma la suposición de resistencia interna despreciable

Calentamiento de la placa

Usando el programa SolidWorks, se pudo obtener la distribución de temperaturas, y obtener el promedio de la temperatura en la zona del pegamento, que se representa en el siguiente gráfico (figura 7):

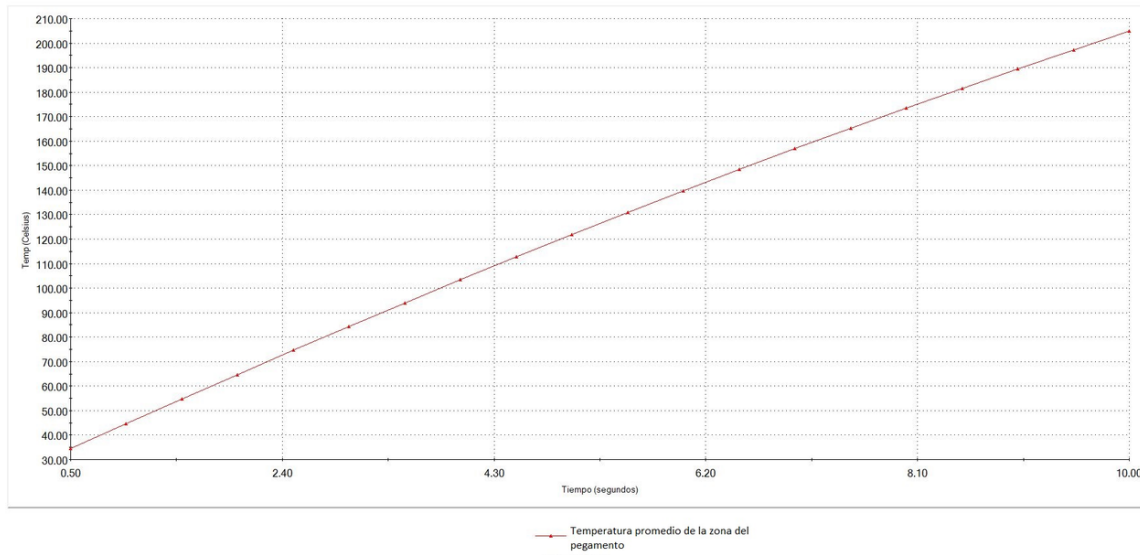


Figure 7: Temperatura de la zona del pegamento con respecto al tiempo para el calentamiento

Y también podemos observar la distribución de temperaturas en la placa (figura 8)

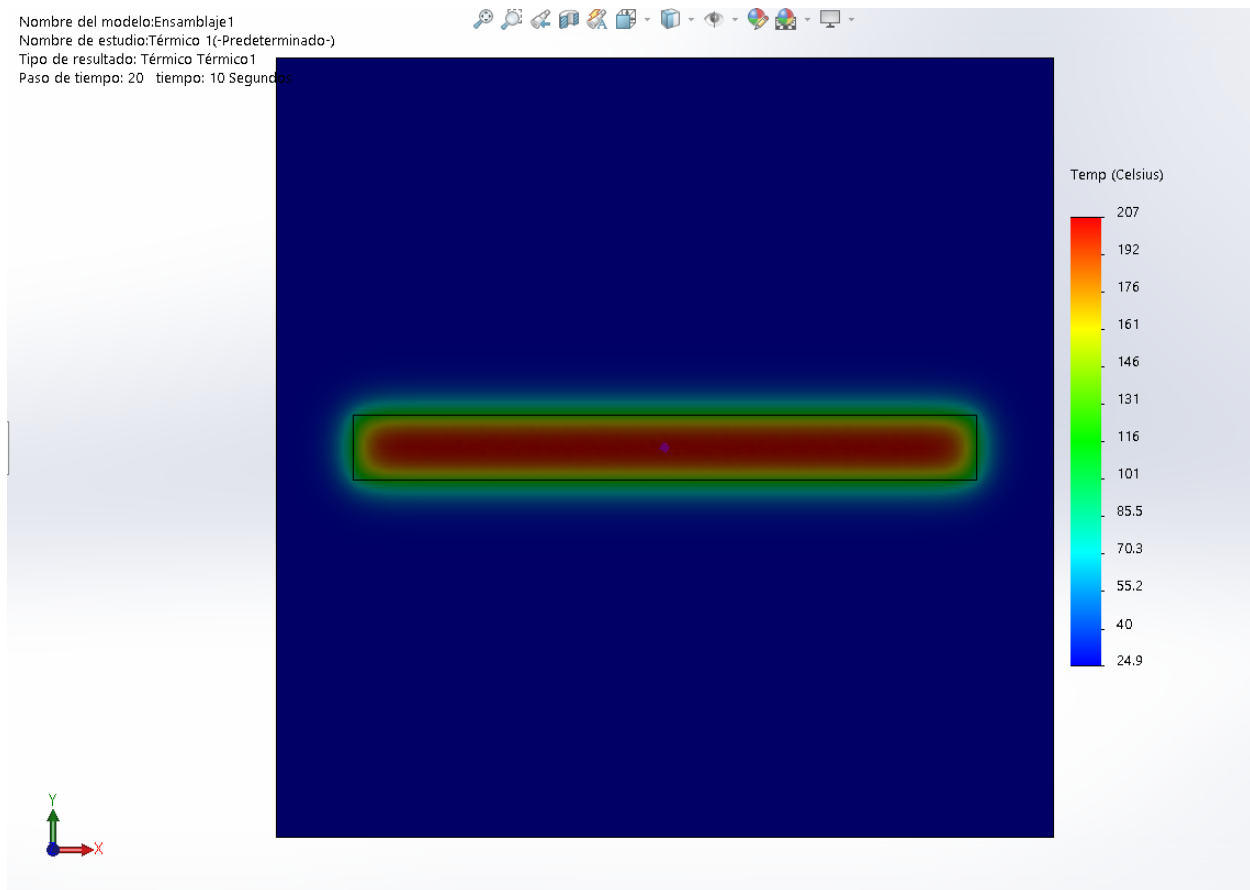


Figure 8: Distribucion de temperaturas en el sistema.

Enfriamiento

Si consideramos que calentamos la zona del pegamento y esta se calentó hasta alrededor de 180°C , podemos obtener un gráfico de enfriamiento de esta zona que se visualiza en la figura 9:

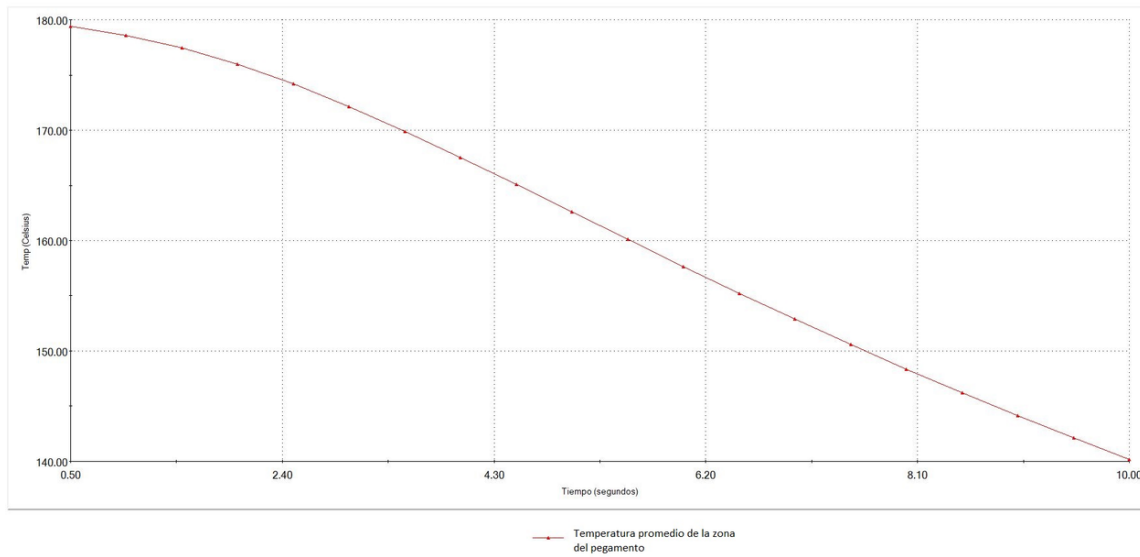


Figure 9: Temperatura de la zona del pegamento con respecto al tiempo para el enfriamiento

El gráfico de la figura 9 nos ayuda a analizar el comportamiento de la temperatura promedio del pegamento luego de ser calentada por el láser, y apagar este, estando esta enfriándose mediante la convección natural, y la emisión de radiación de la placa.

Análisis

Con la gráfica de la figura 7 podemos observar que se necesitan 3.40 segundos para alcanzar la temperatura mínima requerida para el curado (95°C), ahora tomaremos una temperatura de referencia menor a la limite (190°C), para de este punto empezar a realizar un enfriamiento, y esta temperatura será de 140°C , el enfriamiento se producirá en el instante en que apaguemos el láser y esto será cuando lleguemos a la temperatura indicada anteriormente, siendo hasta ese instante el tiempo que llevamos de curado de 2.7 segundos.

Ahora con el gráfico de la figura 9 podemos obtener una relación la cual es aproximada, pero nos servirá para la simplificación de nuestro problema, esto será tomar un descenso de 40°C para un lapso de tiempo de 10 segundos, siendo este caso uno de los más desfavorables, debido a que esta información se obtuvo enfriando la placa cercana a la temperatura límite, por lo tanto una temperatura más alta, teniendo que el intercambio de calor se realiza de manera más rápida, debido a que el gradiente de temperatura entre la placa y el ambiente es mayor.

Entonces lo que se tiene hasta el momento es que la pieza se calienta con el láser encendido por una cantidad de 6.1 segundos, esto para llegar a la temperatura de 140°C luego de esto se apagara el láser y se dejara la pieza enfriando con el ambiente, recalcar que hasta aquí se llevaría un tiempo de curado de 2.7 segundo lo cual lo complementaremos con el enfriamiento, para esto ocuparemos la relación mencionada en el párrafo anterior, con ello obtenemos un descenso hasta los 100°C con un tiempo total de 16.1 segundos y un tiempo de curado de 12.7 los cuales (temperatura-tiempo) están dentro de los tiempo permitidos.

Conclusiones

Según todos los cálculos representados en los gráficos, podemos analizar que un tiempo de 6 segundos aproximadamente de uso de láser será suficiente para que el proceso de curado se mantenga en su rango de valores de temperatura óptimos durante 12 segundos.

El análisis para este proceso se hizo bajo ciertas suposiciones, las cuales hacen que el problema sea mas simple pero a la vez alejado de su realidad (no del todo), por lo tanto, ciertas consideraciones se hicieron en los cálculos de tal manera de agregar cierto factor de seguridad, con tal de que cualquier error esté contemplado y que el proceso funcione de manera optima.

Bibliografía

Incropera, F (1981). *Fundamentos de transferencia de calor* (3^a ed.). México, México: Pearson.

Authorea, (sf), Templates international journal of heat and mass transfer recuperado de <https://www.authorea.com/templates/international-journal-of-heat-and-mass-transfer>