

## **Determinación de los parámetros para minimizar el tiempo de soldadura por ultrasonido de la terminal MAK**

Octavio Medina Montenegro <sup>[1]</sup>, Boogar Gómez Aguilar <sup>[2]</sup>

[1] Alumno de Posgrado, [2] Draexlmaier Components Automotive  
[medina.octavio@draexlmaier.de](mailto:medina.octavio@draexlmaier.de), [boogar.gomez@draexlmaier.de](mailto:boogar.gomez@draexlmaier.de)

### **Resumen.**

Con el objetivo de determinar los parámetros para reducir el tiempo de soldadura y alcanzar el valor requerido de fuerza de desprendimiento, se analizó la influencia de tres parámetros: presión neumática en el sonotrodo, porcentaje de la amplitud de oscilación nominal y energía aplicada. La frecuencia de oscilación se definió como un valor constante. El análisis consta de tres etapas: validación de la capacidad del proceso, determinación del grado de influencia de cada parámetro y determinación del valor de tiempo que cumple con la fuerza de desprendimiento. La presión y la amplitud no afectan significativamente el tiempo de soldadura y se ajustaron a su valor máximo, ya que la potencia del generador es un valor constante, el tiempo de soldadura depende de la energía aplicada.

**Palabras clave.** Soldadura, ultrasonido, regresión.

### **Introducción.**

Dentro de los diversos componentes de un automóvil, el arnés eléctrico es clave para el correcto funcionamiento de todos los sistemas. Es considerado como el sistema nervioso del automóvil, tiene la función de conducir las señales y la energía eléctrica en el auto, desde la batería hasta las luces de frenado, pasando por la caja de fusibles, los faros y un sinnúmero de elementos, la figura 1 muestra un arnés eléctrico.

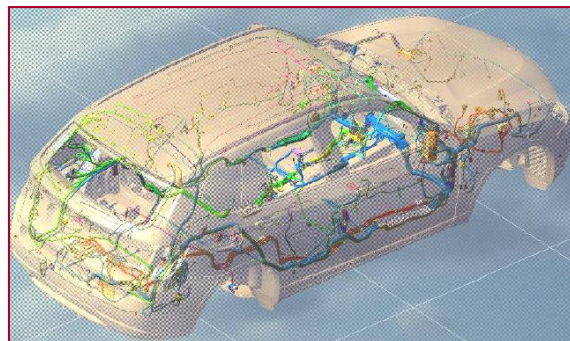


Figura 1. Ubicación del arnés eléctrico dentro del automóvil.

Un arnés eléctrico está construido principalmente por cables de cobre de diferentes calibres, los cuales tienen en sus extremos terminales como se aprecia en la figura 2. El proceso tradicional para unir el cable y la terminal se conoce como crimpado e implica una deformación plástica de la terminal.

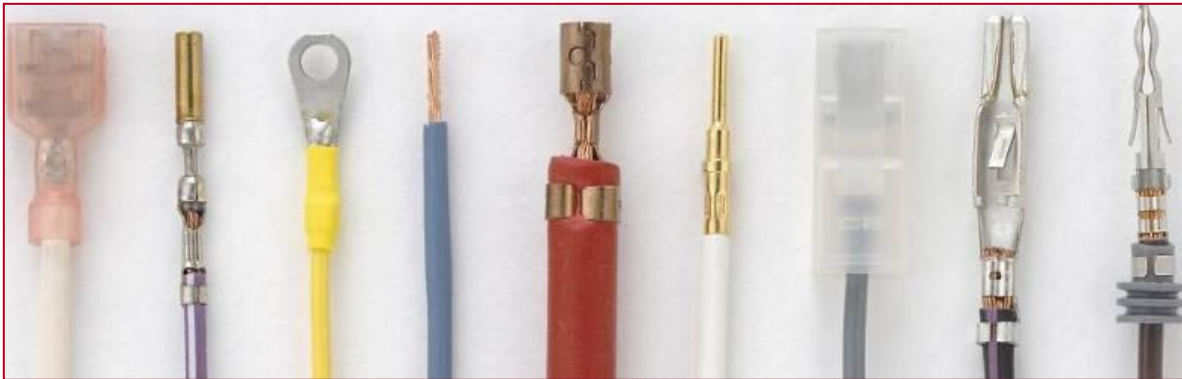


Figura 2. Diferentes tipos de terminales crimpadas

Existen otras técnicas para realizar la unión una de las cuales es la soldadura por ultrasonido utilizada para la terminal MAK12.

La soldadura Ultrasónica es un proceso de soldadura en estado sólido que suelda por la aplicación de vibraciones de energía de alta frecuencia mientras las piezas están siendo sujetadas a presión.

La soldadura de metales por ultrasonido es un proceso especial de soldadura por presión en frío de conformidad con DIN 8593 y DIN 1910 y por lo tanto se clasifica como una técnica de soldadura en estado sólido, entre la soldadura por presión en frío y soldadura por fricción [1].

Se caracteriza por:

- Altas velocidades de rozamiento de aproximadamente 08 m / s a 20 m / s,
- Baja presión de contacto de aproximadamente 500 N y 2000 N,
- No hay fusión de los materiales,
- Conexión metálica genuina.

En la soldadura ultrasónica, los parámetros de soldadura son:

- Frecuencia del transductor
- La amplitud de la herramienta (sonotrodo)
- Presión de contacto (entre el sonotrodo y el yunque)
- Energía.

## Fundamentos.

El ultrasonido se produce utilizando un generador y un transductor de ultrasonidos. El generador convierte la energía eléctrica de 50/60 Hz en energía eléctrica de 20.000 Hz, por ejemplo. El convertidor convierte la oscilación eléctrica en vibración mecánica. La ingeniería moderna se basa principalmente en métodos electromecánicos para la conversión: transductores de sonido piezoeléctricos y transductores de sonido magneto-restrictivos. [2] El efecto piezoeléctrico directo se refiere a la propiedad que ciertos materiales cristalinos exhiben, de cambiar su tensión superficial eléctrica cuando se someten a presión mecánica. [1]

El proceso de soldadura se puede dividir en tres pasos:

- 1) Contacto físico de las superficies: Las zonas de unión son convergentes por el suavizado de distancia de los picos de rugosidad a través de la deformación plástica causada por las fuerzas de cizallamiento oscilante. Por suavizar la micro-rugosidad y la ondulación, el área de contacto de las piezas a unir se hace más grande y más grande. La convergencia de las zonas de unión continúa hasta el punto de que las fuerzas de enlace físicas tengan efecto [3]. Impurezas perturbadoras, tales como óxido de metal o partículas de polvo se rompen por las fuerzas de cizallamiento oscilante y se eliminan de las áreas de contacto [4]. La fricción y deformación plástica causan un aumento en la temperatura en la zona de contacto que, sin embargo, no es suficiente para producir una fusión de los materiales. La fricción y deformación plástica causan un aumento en la temperatura en la zona de contacto que, sin embargo, no es suficiente para producir una fusión de los materiales [3].

- 2) La activación de las áreas de contacto y la interacción química: A una distancia entre las áreas de contacto en el intervalo de 4 a 5 Å (0.5 nm), una activación de las superficies y un intercambio de electrones se producen. Se crea un enlace metálico sólido [3].

- 3) Los procesos de liberación de esfuerzos en la unión de la soldadura: La deformación plástica de las zonas de unión conduce a una deformación elástica del cristalito que desencadena la tensión elástica interna en el material. La difusión atómica en la red de metal, que es causada por el aumento de temperatura en el área de contacto, así como el esfuerzo cíclico de los materiales, conducen a la reducción de dicha tensión (regeneración cristalina) [3].

Se entiende el Diseño de Experimentos como "una metodología para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación". Más técnicamente,

consiste en realizar una serie de pruebas en las que se inducen cambios deliberados en las variables de un proceso de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida elegida.

El DOE es altamente efectivo para aquellos procesos, que su rendimiento se ve afectado por varios factores. Con esta técnica se puede conseguir entre otras cosas, mejorar el rendimiento de un proceso, reducir su variabilidad o los costos de producción. Todos los tipos de industria se pueden beneficiar de la aplicación del DOE, incluso aquellas de servicio [5].

Existen tres enfoques más populares del Diseño de Experimentos: Clásico, Taguchi y Shainin. A pesar de ellos, no es sencillo entender las diferencias entre ellos y decidir correctamente que enfoque es más conveniente. La respuesta a estas preguntas está fuertemente influenciada por el conocimiento y la experiencia que se posee sobre cada enfoque del DOE. Cada uno de los enfoques tiene sus partidarios y detractores, por lo que el debate entre ellos fue durante muchos años muy fuerte y generalmente poco constructivo.

En la práctica a menudo se requiere resolver problemas que implican conjuntos de variables de las cuales se sabe que tienen alguna relación inherente entre sí. Por ejemplo, en una situación industrial quizá se sepa que el contenido de alquitrán en el flujo de salida de un proceso químico está relacionado con la temperatura en la entrada. Podría ser de interés desarrollar un método de pronóstico, es decir, un procedimiento que permita estimar el contenido de alquitrán para varios niveles de temperatura de entrada a partir de información experimental. Desde luego, es muy probable que para muchos ejemplos concretos en los que la temperatura de entrada sea la misma, por ejemplo 130°C, el contenido de alquitrán de salida no sea el mismo. Esto es muy similar a lo que ocurre cuando se estudian varios automóviles con un motor del mismo volumen; no todos tienen el mismo rendimiento de combustible. No todas las casas ubicadas en la misma zona del país, con la misma superficie de construcción, se venden al mismo precio. El contenido de alquitrán, el rendimiento del combustible (en millas por galón) y el precio de las casas (en miles de dólares) son variables dependientes naturales o respuestas en los tres escenarios. La temperatura en la entrada, el volumen del motor (pies cúbicos) y los metros cuadrados de superficie de construcción son, respectivamente, variables independientes naturales o regresores. Una forma razonable de relación entre la respuesta  $Y$  y el regresor  $x$  es la relación lineal,

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x,$$

Ecuación 1. Relación lineal.

en la que, por supuesto,  $\beta_0$  es la intersección y  $\beta_1$  es la pendiente. Esta relación se ilustra en la Figura 3.

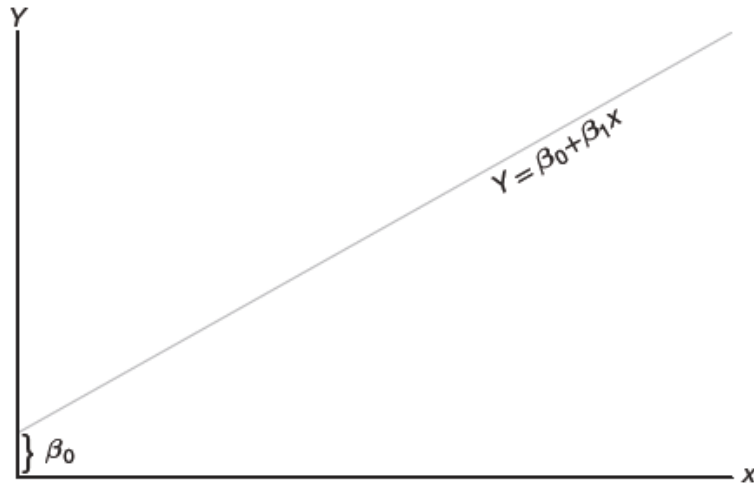


Figura 3. Una relación lineal;  $\beta_0$ : intersección;  $\beta_1$ : pendiente.

Si la relación es exacta y no contiene ningún componente aleatorio o probabilístico, entonces se trata de una relación determinista entre dos variables científicas. Sin embargo, en los ejemplos que se mencionaron, así como en muchos otros fenómenos científicos y de ingeniería, la relación no es determinista, es decir, una  $x$  dada no siempre produce el mismo valor de  $Y$ . Como resultado, los problemas importantes en este caso son de naturaleza probabilística, toda vez que la relación anterior no puede considerarse exacta. El concepto de análisis de regresión se refiere a encontrar la mejor relación entre  $Y$  y  $x$  cuantificando la fuerza de esa relación, y empleando métodos que permitan predecir los valores de la respuesta dados los valores del regresor  $x$ .

### Procedimiento

Determinación de la capacidad del proceso: A fin de comprobar que, a partir de parámetros definidos, el equipo es capaz de producir piezas con una fuerza de desprendimiento constante, se realizó un estudio de capacidad del equipo, se analizaron 50 muestras.

Diseño de experimentos para fuerza de desprendimiento y tiempo de soldadura. Mediante el diseño de experimentos se determinó el grado de influencia de cada parámetro del proceso: presión neumática aplicada al sonotrodo, porcentaje de la amplitud de oscilación nominal, energía aplicada en el proceso.

Análisis de regresión. Una vez definida la variable a controlar en el proceso, se realizó el análisis de regresión para determinar de qué forma se relacionan la dicha variable y la salida del sistema.

### Resultados y análisis de resultados

Para aceptar como estable el proceso se definió un valor mínimo de 1.67 en el estudio de capacidad, el análisis mostro que el proceso tiene una salida estable y se acepta que el proceso es capaz de dar una salida estable.

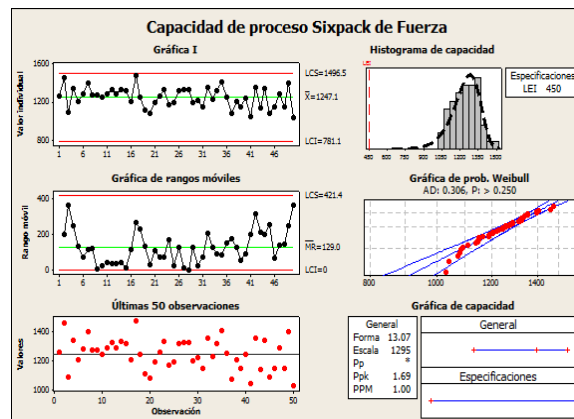


Figura 4. Análisis de capacidad para la fuerza de desprendimiento

En el diseño de experimentos realizado para evaluar la influencia de los tres factores se encontro que la amplitud y la presión son inversamente proporcionales al tiempo de soldadura, mientras que la energía es directamente proporcional al tiempo.

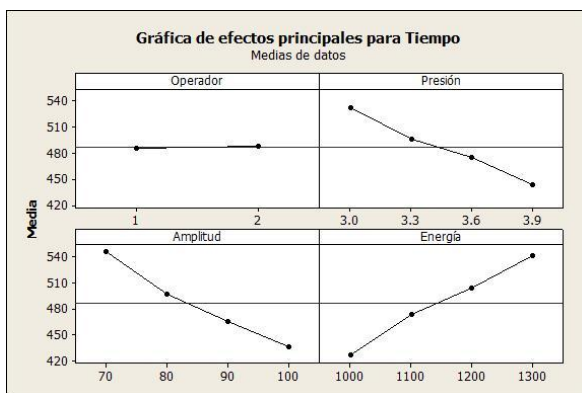


Figura 5. Gráfica de efectos principales para el tiempo

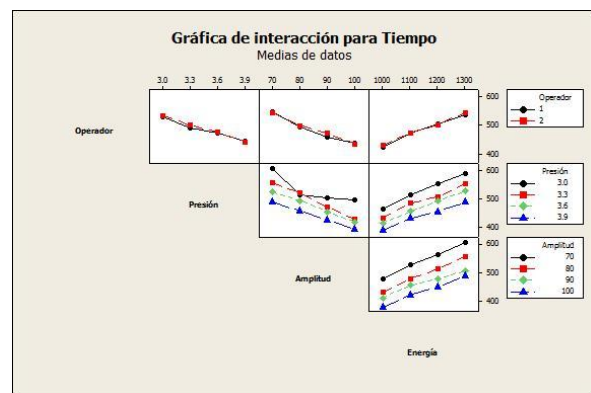


Figura 6. Gráfica de interacción de los factores para tiempo

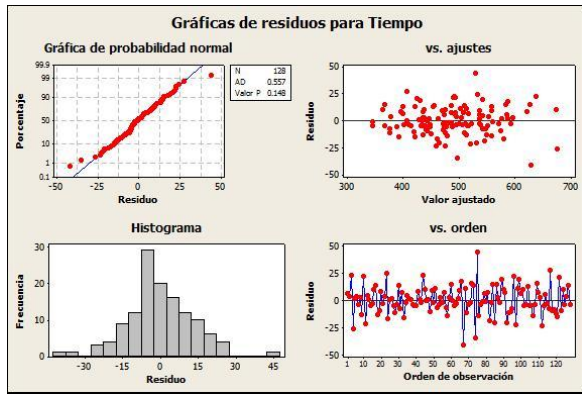


Figura 7. Gráfica de residuos para tiempo.

Al analizar el diseño de experimentos de para la fuerza de desprendimiento, se determina que el factor con mayor influencia es la energía, siendo que la fuerza de desprendimiento es directamente proporcional a los tres factores. Se determina que la presión y la amplitud se fijaron al valor que minimiza el tiempo. En ambos estudios se encontro que el operador del equipo no tiene influencia en el resultado.

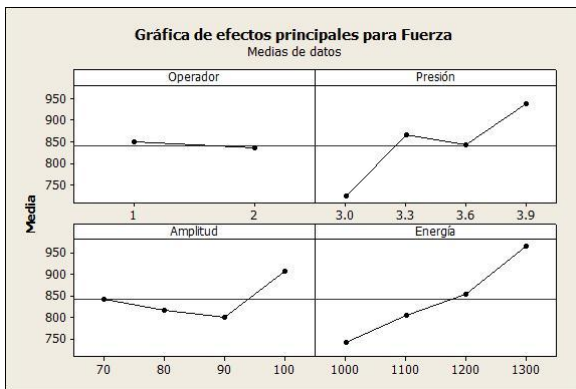


Figura 8. Gráfica de efectos principales para la fuerza de desprendimiento

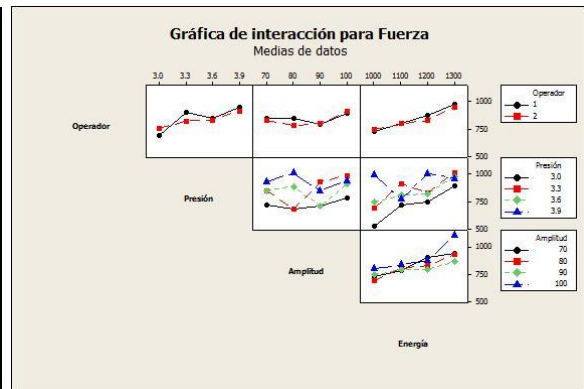


Figura 9. Gráfica de interacción de los factores para la fuerza de desprendimiento

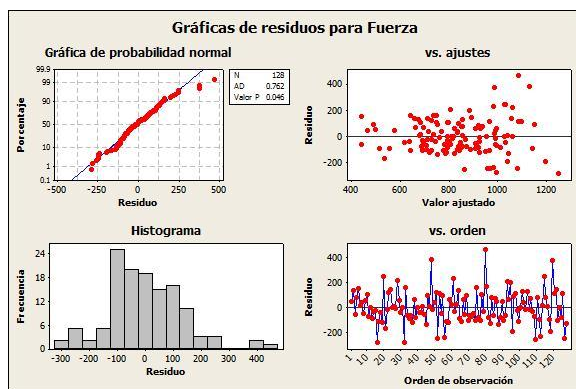


Figura 10. Gráfica de residuos para la fuerza de desprendimiento.

Utilizando el software Minitab®, se realiza el análisis de regresión para determinar la relación entre la energía aplicada y la fuerza de desprendimiento, dando como resultado una ecuación de segundo grado:

$$F = -1039 + 2.88 E - 0.000703 E^2$$

Ecuación 2. Ecuación polinomial para la fuerza

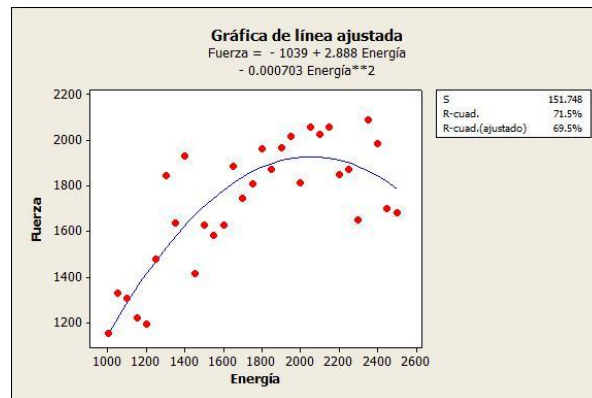


Figura 11. Gráfica de fuerza de desprendimiento.

Partiendo de esta ecuación es posible determinar el rango de ajuste que tendrá esta variable, para que la soldadura cumpla con los valores de fuerza de desprendimiento. El valor mínimo requerido es de 1300 N, se ajustan los parámetros para que el resultado este entre 1500 y 1800 N.

$$-0.000703 E^2 + 2.888 E - 1039 = 1500$$

$$E = 1274 \text{ Ws}$$

Ecuación 3. Fuerza mínima

$$-0.000703 E^2 + 2.888 E - 1039 = 1800$$

$$E = 1628 \text{ Ws}$$

Ecuación 4. Fuerza máxima.

El rango de ajuste para la energía se definió entre 1274 y 1828 Ws.

## Conclusiones

Es posible reducir el tiempo de soldadura aplicando la energía necesaria para cumplir con la fuerza de desprendimiento especificada.



Dado que la fuerza de desprendimiento depende de la energía aplicada, los valores de presión y amplitud se deben fijar a un valor definido, por lo tanto los parámetros de ajuste de la máquina se reducen de tres a uno.

La determinación matemática de los parámetros simplifica el proceso de ajuste del equipo de soldadura y permite reducir el tiempo y la energía en el proceso, dando como resultados: menor tiempo muerto por ajuste, mayor producción por hora y mayor vida útil de los herramientas.

### **Referencias bibliográficas**

- [1] GREWELL D., BENART A., PARK L. A. *Plastics and Composites welding Handbook*, Cincinnati: Hanser Gardner, 2003. 141-188 p.
- [2] RAJAGOPAL K., *Text Book of Engineering Physics – Part I*, New Delhi, PHI Learning Private Limited, 2008. 1-31 p.
- [3] ZHANG C., LI L. 2009 A Finite Element Based Study of Dynamic Processes in Ultrasonic Welding, *Trends in Welding Research International Conference*, 2009. 254-257 p.
- [4] EDMONS P. *Methods of Experimental Physics, Volume 19 Ultrasonics*, New York: Academic Press Inc., 1981. 29-61, 348-350 p.
- [5] TANCO M., VILES E., POZUELA L., Comparing different approaches for Design of Experiments (DoE), in *Advances in Electrical Engineering and Computational Science*, Netherlands: Springer, 2009. 611-622 p.