

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA RESISTENCIA DINÁMICA Y LA FUERZA EN LA SOLDADURA A PUNTO POR RESISTENCIA ELÉCTRICA

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING THE DYNAMIC RESISTANCE AND THE FORCE IN THE SPOT WELDING PROCESS

Jair Carlos Dutra, Túlio Fernandes dos Santos, Víctor Vergara Díaz
Moisés Alves de Oliveira, Raul Gohr Junior, Carolina Brum Medeiros

Departamento de Engenharia Mecânica

LABSOLDA–Campus Universitário–C.P. 88040-900–Florianópolis – SC – BRASIL

<http://www.labsolda.ufsc.br>

RESUMEN

El proceso de soldadura a punto por resistencia eléctrica se caracteriza por ser de alta velocidad, fácil operación y adaptable a la automatización. Su mayor área de aplicación está en la industria automovilística. Para caracterizar el proceso es necesario conocer el comportamiento de la resistencia dinámica. Para la obtención de esta variable es necesario la medición de otras dos variables eléctricas: corriente y tensión. Las altas corrientes de soldadura de este proceso son de difícil medición a través de la utilización de instrumentos convencionales, luego es necesario un medidor de corriente especial para tales niveles de corriente. Debido al elevado costo y las limitaciones de este equipamiento en oferta en el mercado, llevó al equipo de ingenieros de LABSOLDA a la utilización de un método alternativo. Este método consiste en utilizar un dispositivo denominado *shunt* resistivo, el cual es obtenido a través del propio porta-electrodo de la máquina. Con respecto a la tensión de soldadura esta es medida entre los dos electrodos. Para permitir la lectura de estos valores, vía microcomputador y en tiempo real, fueron proyectados circuitos amplificadores que amplifican la tensión del *shunt* en 25 o 50 veces y la tensión de soldadura en 2,5 o 5 veces. Este circuito de amplificadores es totalmente adaptado al sistema de adquisición de datos de soldadura.

Palabras Claves: Soldadura a punto por resistencia eléctrica, Resistencia dinámica, Monitoreo.

ABSTRACT

The process of electrical resistance spot welding is typified by its rapidity, ease of operation, and adaptability to automation. At present, it is most widely employed in the automotive industry. It is essential to know the behaviour of *dynamic resistance* within a given welding system in order to properly monitor the process. To obtain this variable, two other variables must be measured, including the *current* and the *tension*. The high currents involved in the welding process are difficult to measure using conventional instruments, and it is thus necessary to employ a special current meter for these current levels. Because of the high cost and limitations of this equipment on the market, the LABSOLDA engineering team established an alternative method for making these measurements. The method chosen employs a device termed a resistive *shunt*, which is incorporated at the electrode clamp of the machine. The tension of the weld is measured between the two electrodes. In order to read the two desired values via microcomputer in real time, amplifier circuits were projected which amplified the tension of the *shunt* by 25 or 50X and the tension of the weld by 2.5 to 5X. This amplifier circuit was completely adaptable to the welding data acquisition system.

Keywords: Spot welding, Dynamic resistance, Monitoring

INTRODUCCIÓN

Se puede decir que uno de los mayores usuarios de este proceso es la industria automovilística, debido a que la soldadura de muchos componentes tales como la carrocería, por ejemplo, requiere de un gran número de puntos de soldadura (Chuko, 2002). Los materiales que normalmente son soldados por este tipo de proceso son los aceros al carbono, considerando los cincados, baja aleación y los aceros inoxidable. Además de estos materiales es posible encontrar algunas aplicaciones en cobre, níquel, aluminio magnesio, titanio y sus aleaciones (Guerra, 1996; Aidun, 1985).

El principio básico de este proceso de soldadura consiste en hacer circular una corriente eléctrica entre dos electrodos no consumibles que comprimen piezas distintas. Como consecuencia, debido a la mayor resistencia presentada por las interfaces en contacto, ocurre la fusión en ese local, formándose la soldadura.

Dentro de los objetivos de este trabajo es mostrar los resultados obtenidos por un sistema desarrollado para monitorear la resistencia dinámica y la fuerza durante la soldadura. Para conseguir esto, se construyeron dispositivos que permitieron la medición simultánea de la tensión, corriente de soldadura y la fuerza aplicada entre los electrodos.

En forma preliminar se levantaron las curvas experimentales para mostrar el efecto del grado de limpieza de las superficies, la presión aplicada en las chapas y temperatura de las chapas. Estos tres factores actúan dinámicamente en el comportamiento total de la resistencia del conjunto lo que da origen al concepto de resistencia dinámica.

También fueron levantadas las curvas de características estáticas de las máquinas utilizadas en este proceso verificando que generalmente los equipos funcionan con imposición de corriente.

REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

1. Principio de funcionamiento. El proceso de soldadura por resistencia ejecuta la unión de piezas metálicas a través de la combinación de un calentamiento, que es causado cuando se hace circular una corriente eléctrica por los materiales que van a ser unidos y una fuerza de compresión (Dickinson, 1980).

Según el esquema presentado en la Figura 1, se puede establecer un modelo para el circuito eléctrico involucrado en la soldadura de chapas.

El calor generado en la soldadura por resistencia puede ser estimado usando la ecuación 1 (efecto Joule).

$$Q = \eta \int_0^t I^2 R dt \quad (1)$$

Donde:

η : Rendimiento térmico

I : Corriente de soldadura (A)

t : Tiempo de aplicación de la corriente (s)

R : Resistencia del conjunto (Ω)

Con respecto a la ecuación 1, el calor generado en la región de soldadura es proporcional al cuadrado de la corriente aplicada, a la resistencia eléctrica del conjunto y al tiempo de aplicación de esta corriente, donde la corriente y el tiempo de aplicación son determinados por el sistema de control de las máquinas de soldadura.

2. La resistencia eléctrica del conjunto. Según Aidun (1985), en este proceso se debe dedicar especial atención al comportamiento de las resistencias eléctricas involucradas, principalmente a la resistencia de contacto entre las chapas R_{c1c2} . (Ver Figura 1).

Básicamente son tres los factores que tienen influencia en la resistencia eléctrica del conjunto a ser soldado:

a) El grado de limpieza de las superficies: Interfiere en la resistencia eléctrica del conjunto debido a la influencia de las capas de óxidos, lubricantes y suciedad, Figura 2.

b) Presión aplicada en las chapas: La presión combinada con el grado de limpieza interfiere en el contacto entre las piezas, influenciando a resistencia eléctrica del conjunto. La Figura 3 muestra el resultado de la medición de la resistencia eléctrica del conjunto

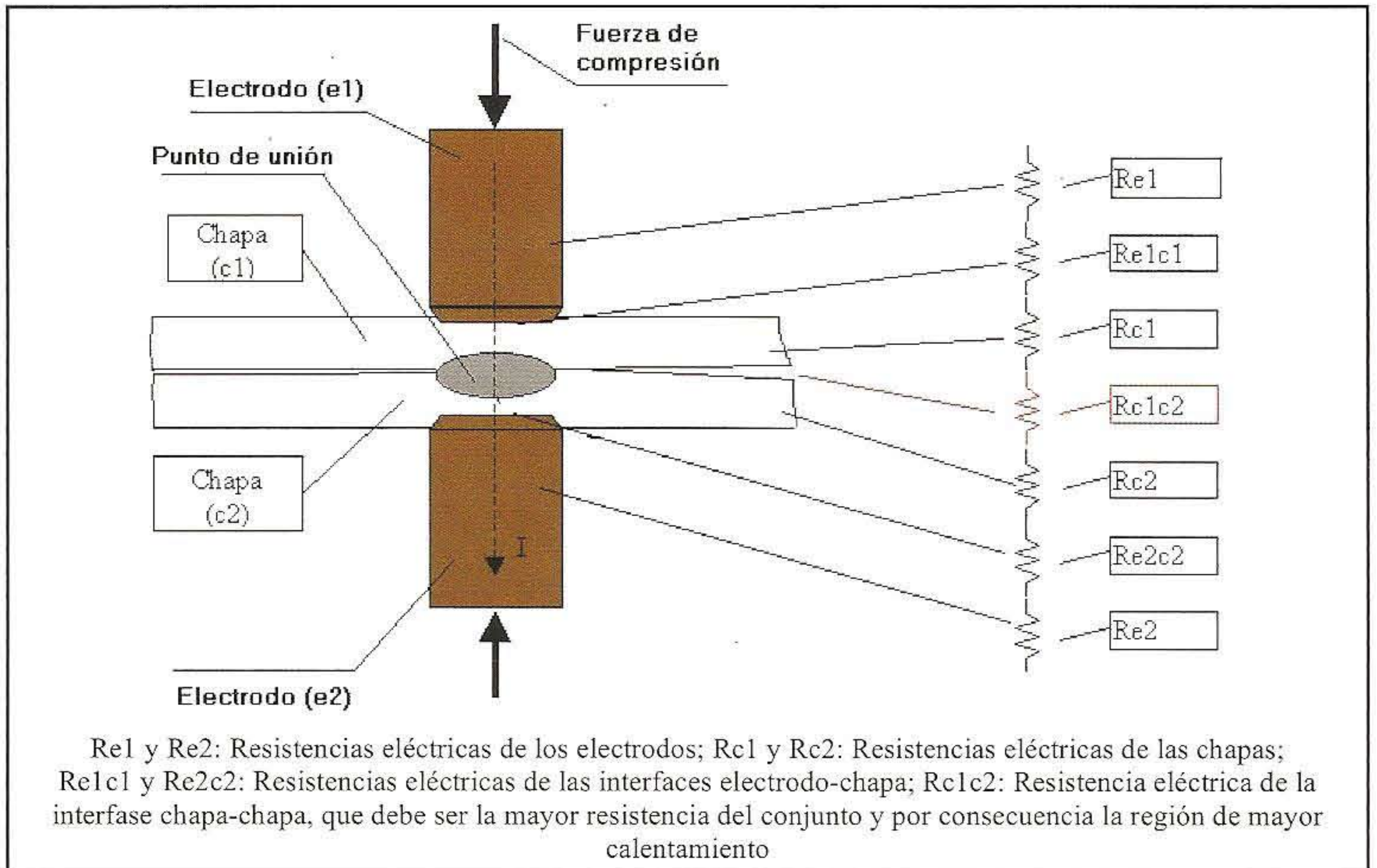


Figura 1 - Esquema del conjunto electrodos/chapas y modelo eléctrico

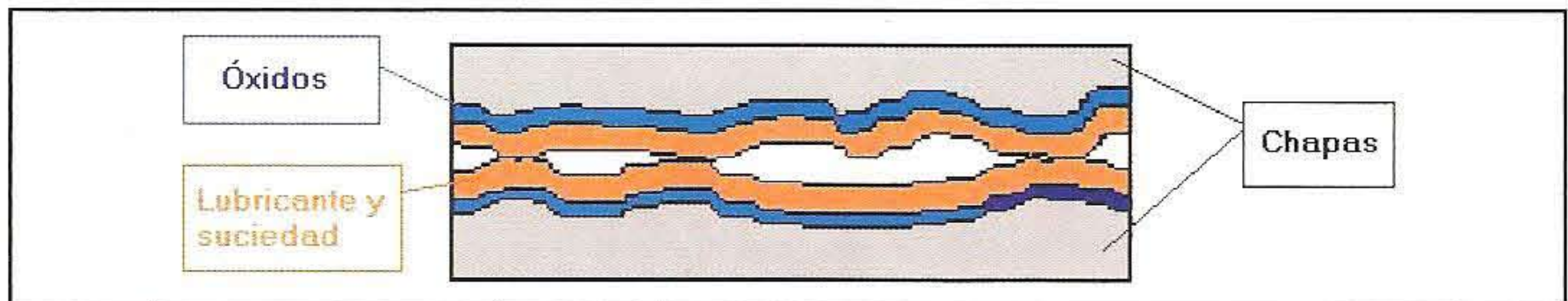


Figura 2 - Esquema de la contaminación de las capas superficiales de las piezas

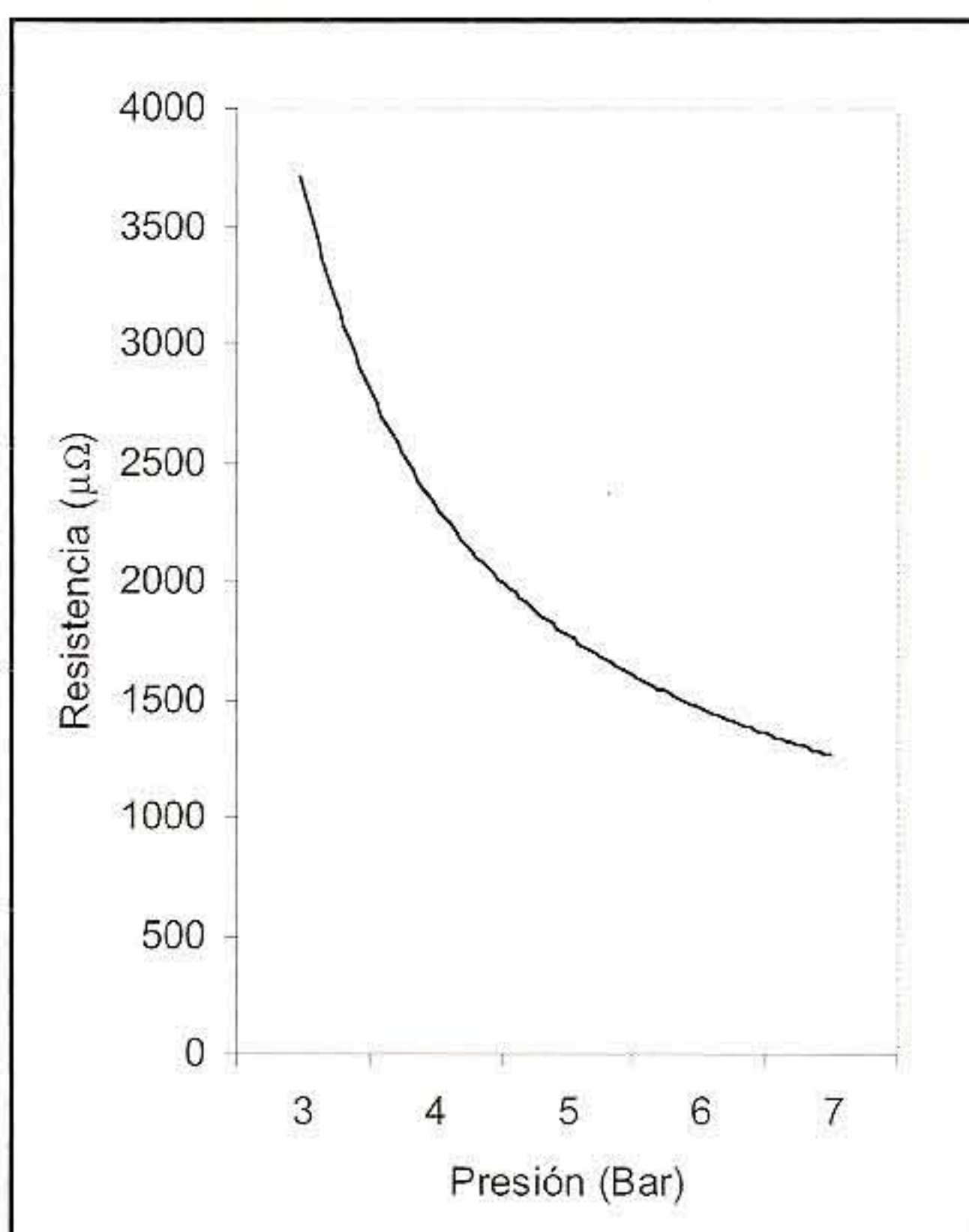


Figura 3 - Influencia de la presión en la resistividad

de dos chapas de acero 1015 laminadas al frío, con un espesor de 1,5 mm, las cuales después de ser retiradas las grasas son sometidas a diferentes presiones aplicadas a través de los electros con punta de 6 mm de diámetro. Curva levantada experimentalmente en el laboratorio LABSOLDA/UFSC.

c) Temperatura de las chapas: Este factor interfiere en la resistividad de los materiales involucrados en la soldadura. La Figura 4 muestra el resultado de la medición de la variación de la resistividad del acero trefilado 1045, en un amplio intervalo de temperatura. Curva levantada experimentalmente en el laboratorio LABSOLDA/UFSC.

Estos tres factores actúan dinámicamente en el comportamiento de la resistencia total del conjunto y la observación de esta variación a lo largo de la soldadura de los materiales originó el concepto de resistencia

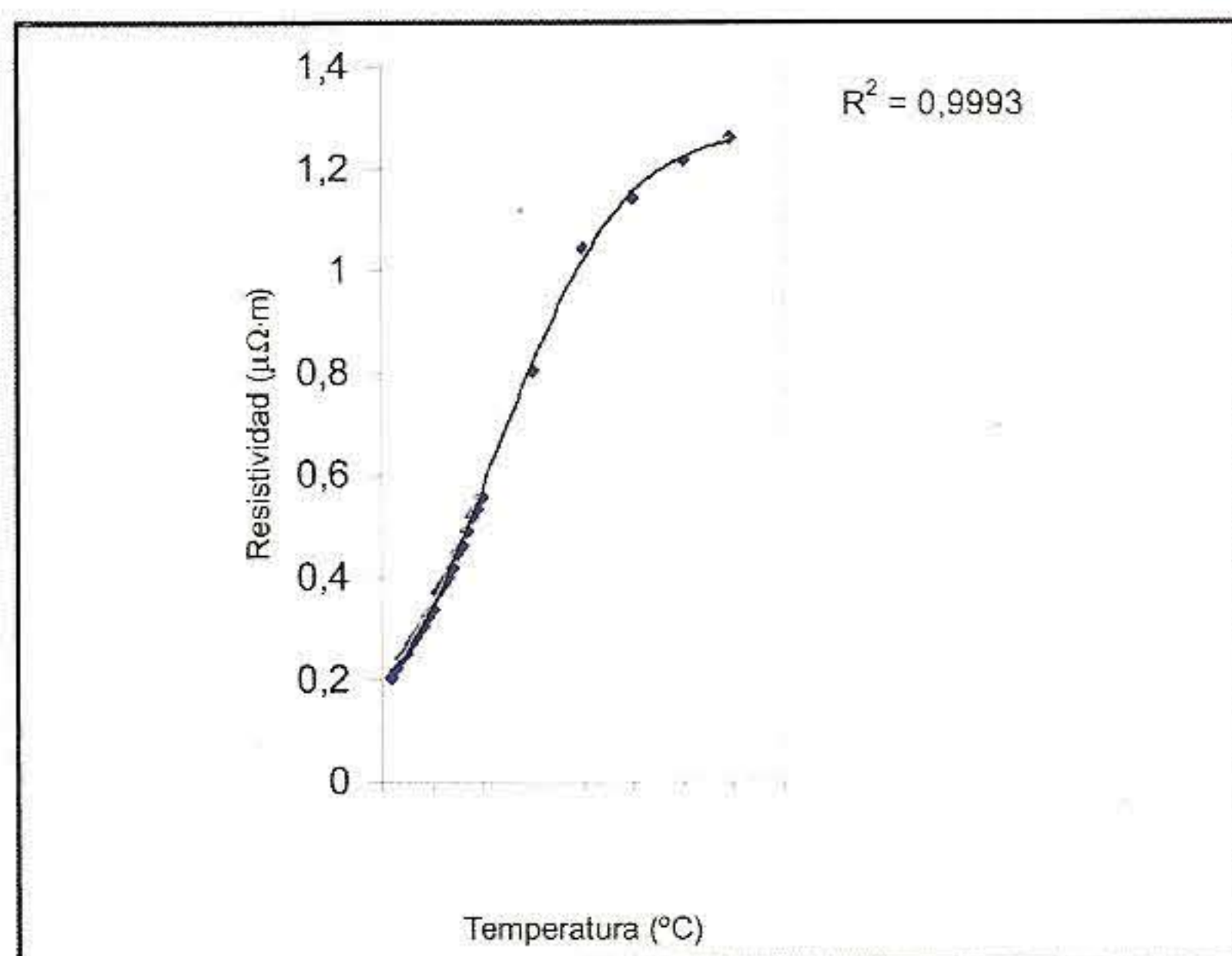


Figura 4 - Influencia de la temperatura en la resistividad

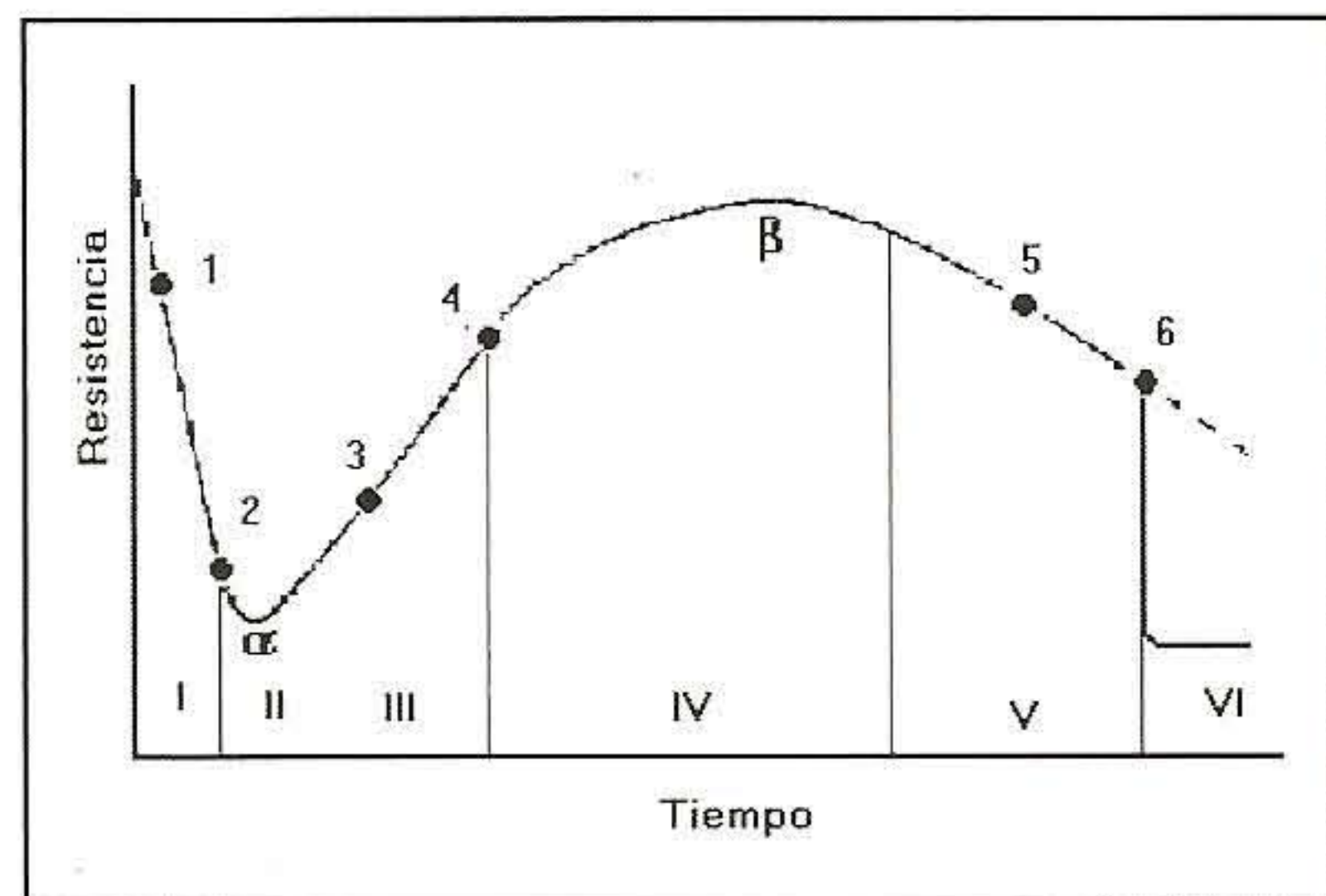


Figura 5 - Resistencia dinámica en el proceso de soldadura por resistencia (Dickinson, 1980)

dinámica. Esta resistencia agrupa las consecuencias de la generación de calor y de los cambios en las características de los materiales a través del proceso de unión.

Fundamentalmente la resistencia dinámica es la razón entre la tensión eficaz y la corriente eficaz a lo largo del proceso. Un modelo de la curva de resistencia dinámica es posible ser observado en la Figura 5 (Dickinson, 1980). En esta Figura, la resistencia varía en el tiempo mostrando seis etapas distintas: I, II, III, IV, V y VI que dependen de la forma en que se procesa la formación de la lente de soldadura o en otras palabras, como es la variación de la resistencia durante la circulación de la corriente eléctrica.

Etapa I – Rompimiento de la capa superficial. Inicialmente la resistencia es alta debido principalmente a la presencia de impurezas en la superficie y debido también a que el área de contacto es pequeña, resultado de las rugosidades de las superficies de las chapas. Cuando se aplica la corriente existe un aumento de la temperatura de una forma concentrada en las superficies de contacto, lo que resulta en la expulsión de impurezas, derivando en la disminución de la resistencia eléctrica.

Etapa II – Ablandamiento de las impurezas. Debido al calentamiento progresivo causado por la circulación de la corriente eléctrica a través de las rugosidades de las superficies en contacto, ocurre el ablandamiento de estas rugosidades dando como consecuencia una reducción en la resistencia eléctrica. Debido a este calentamiento progresivo, se acentúa el

aumento de la resistividad del material, provocando un aumento en la resistencia. Estos dos mecanismos con consecuencias contrarias compiten entre sí, dando como resultado una región característica con un punto mínimo α .

Etapa III – Aumento de la temperatura. Después del ablandamiento de las asperezas el aumento progresivo de la temperatura causa un aumento proporcional de la resistividad del material, hasta que ocurre el inicio de la fusión de las rugosidades.

Etapa IV – Primera fusión. En esta etapa se inicia la fusión de las superficies, apareciendo un punto máximo β , causado por la interacción de dos mecanismos:

- El aumento progresivo de la temperatura de la pieza, que provoca el aumento de la resistividad del material y de la resistencia eléctrica.
- La fusión progresiva de las superficies, causada por el calentamiento generado, que aumenta el área transversal disponible al flujo de corriente haciendo que la resistencia eléctrica disminuya.

Etapas V y VI – Crecimiento del punto (de forma lenticular) y colapso mecánico. El crecimiento progresivo de la “lente” fundida causa la reducción de la resistencia mecánica de la región que sobre presión de compresión de los electrodos resulta en un colapso mecánico con expulsión de material de las piezas y penetración de los electrodos en la región ablandada. El resultado de la reducción de la distancia entre los

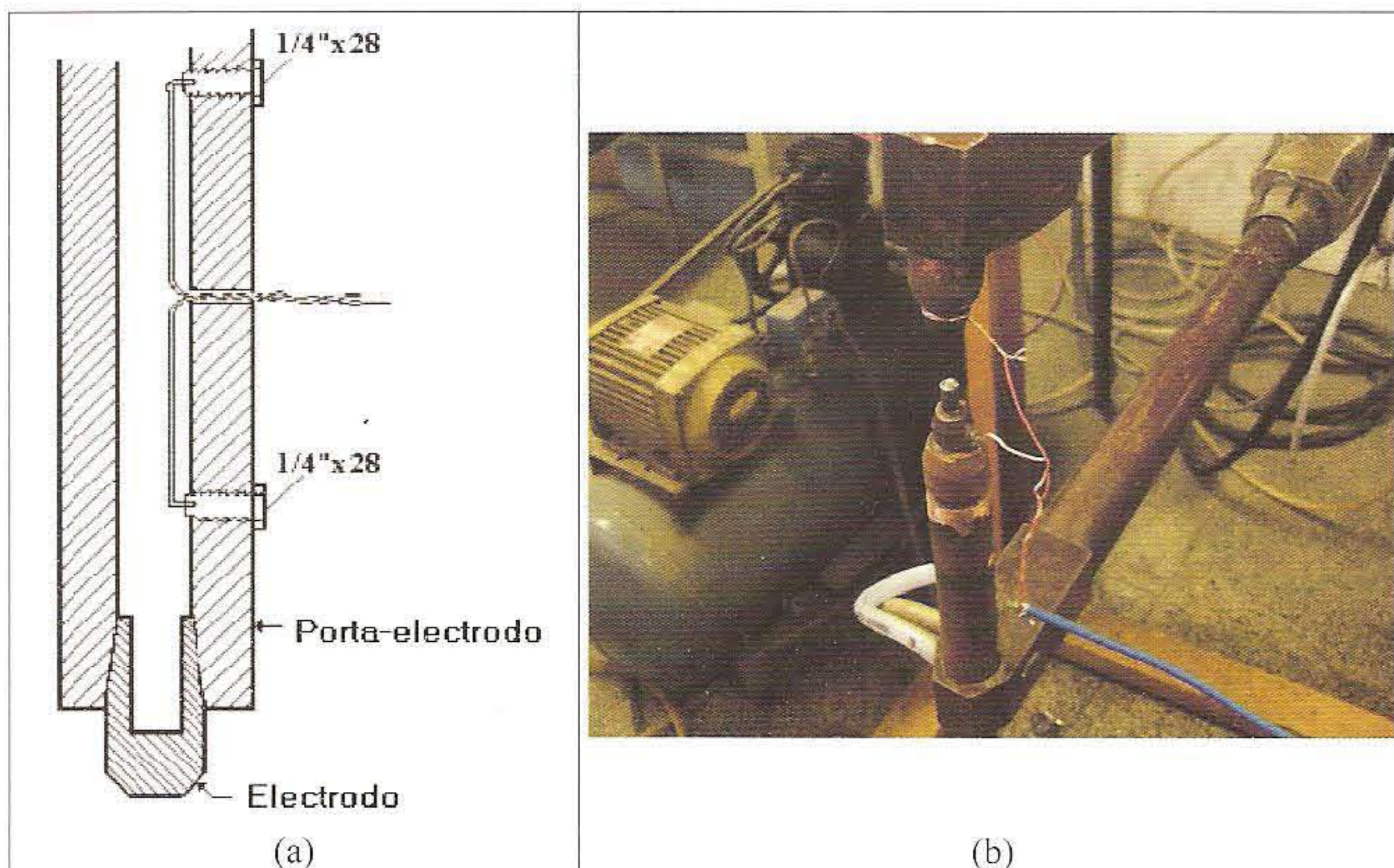


Figura 6 - a) Sección transversal del porta-electrodo mostrando las modificaciones (Gedeon, 1987);
 b) Fotografía del porta-electrodo con los cables para medir tensión y corriente (LABSOLDA).

electrodos provoca una caída brusca de la resistencia eléctrica, debido a la reducción del camino para el paso de la corriente eléctrica.

La obtención de la curva de resistencia dinámica depende de la medición de dos valores eléctricos que son: corriente y tensión. Sin embargo, las elevadas corrientes necesarias en este proceso de soldadura producen ruidos que pueden enmascarar las señales eléctricas cuando estas son monitoreadas. El desarrollo de algunas técnicas descritas en la bibliografía especializada puede minimizar los valores de ruido o en algunas ocasiones eliminarlos. Una de estas técnicas es la del par trenzado (Dickinson, 1980), que consiste en trenzar los alambres que son usados para llevar la señal para el sistema de adquisición.

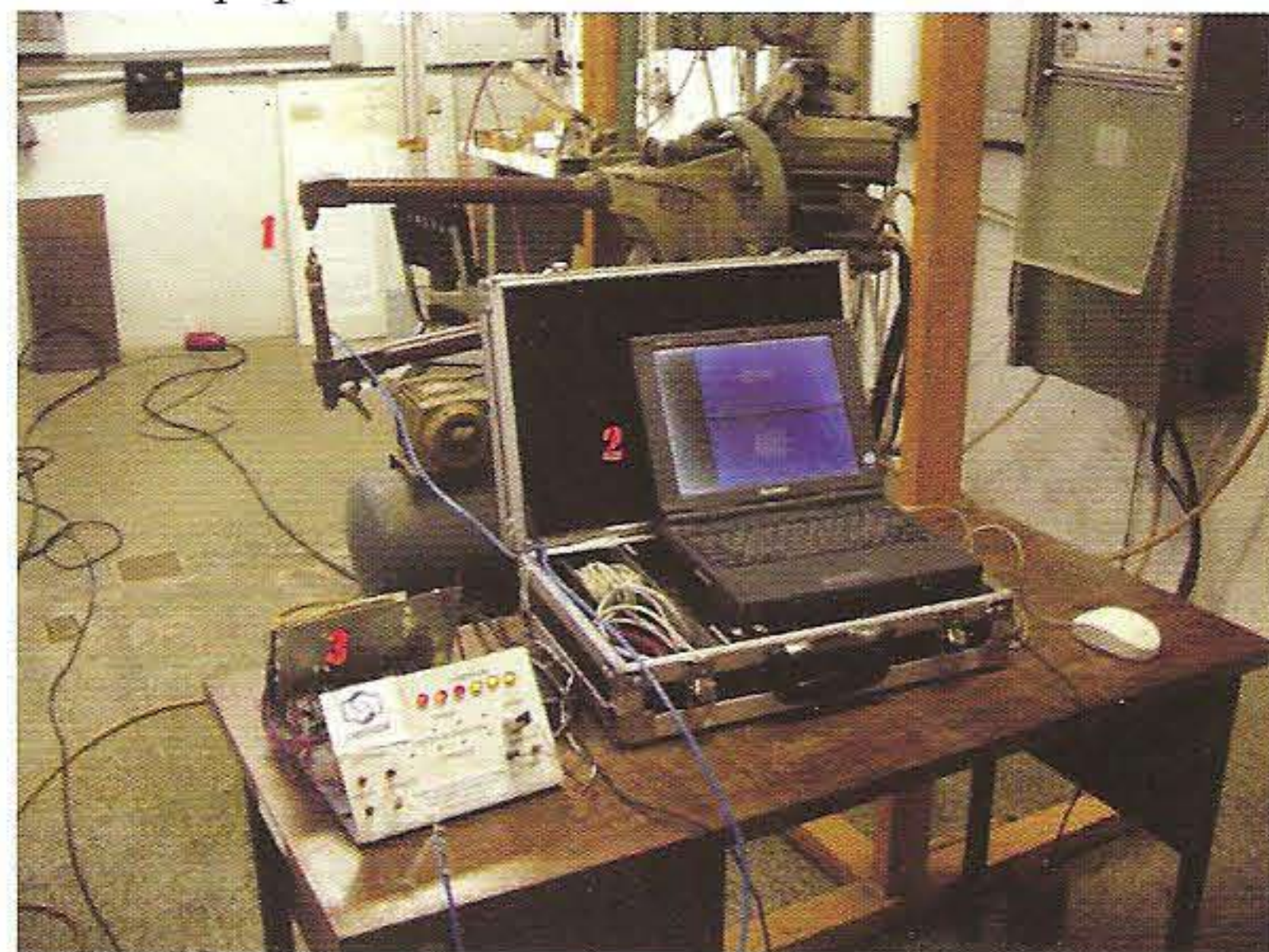
Para la medición de la corriente de soldadura, Gedeon (1987) desarrollaron un dispositivo denominado de *shunt* resistivo (Figura 6). Para minimizar ruidos en la señal se usa el porta-electrodo como *shunt*, pasando los cables que transmiten la señal por el interior. Antes de usar el porta-electrodo como *shunt* este debe ser previamente calibrado para determinar el valor de su resistencia. Se hacen pasar valores de corriente conocidos y se mide su respectivo valor de tensión. Cuando estos valores son graficados se determina su resistencia. Como la resistencia es conocida, solo basta

monitorear la tensión entre los terminales durante el proceso de soldadura y luego el cálculo de corriente de soldadura es realizado a través de la conocida ley de Ohm: $I=V/R$.

MATERIALES Y METODOS

Banco de ensayos

La Figura 7 muestra el banco de ensayos utilizando equipamientos e instrumentos de monitoreo.



1-Máquina de soldar 2-Sistema de adquisición de datos (OSCILOS) 3-Prototipo amplificador de señales

Figura 7 - Banco de ensayos para el proceso de soldadura por resistencia

- **OSCILOS.** Programa totalmente desarrollado en el laboratorio de soldadura, LABSOLDA/UFSC, el cual sufrió algunas modificaciones para poder ser utilizado en este proceso. Actualmente existe este programa para analizar la transferencia metálica y evaluar la estabilidad del proceso, principalmente útil para el proceso MIG/MAG. LABSOLDA dispone de un equipamiento de adquisición que se ha transformado en un producto comercial, ideal para hacer inspecciones en la línea de montaje.

- **MÁQUINA DE SOLDAR.** Marca ARO, transformador de 25 kVA

Materiales

- **Cuerpos de prueba.** Chapas de acero 1015, laminada al frío, con espesor de 1,5 mm las cuales fueron limpiadas con acetona para retirar toda grasa o suciedad. Acero trefilado 1045, diámetro de 6,35 mm.
- **Electrodos.** Los electrodos utilizados fueron seleccionados según la norma R.W.M.A. (Resistance Welder Manufacturers Association), con un diámetro en la punta de 6 mm.

RESULTADOS

Calibración del porta-electrodo

La Figura 8 muestra el gráfico de calibración del *shunt* resistivo. El resultado de la regresión lineal aplicada a los puntos entregó un valor de 5,098($\mu\Omega$) que corresponde a la resistencia del *shunt*. El coeficiente de correlación fue de 0,99.

Obtención de la curva estática de la máquina

La corriente, aunque sea una de las variables de mayor influencia, no siempre es mantenida por la máquina, siendo generalmente afectada por la resistencia del sistema.

Se verificó que los equipos normalmente operan con imposición de tensión, o sea, cuando se establece una condición de soldadura la tensión permanece prácticamente constante, por otro lado la corriente varía conforme a la resistencia del conjunto al ser soldado. Figura 9.

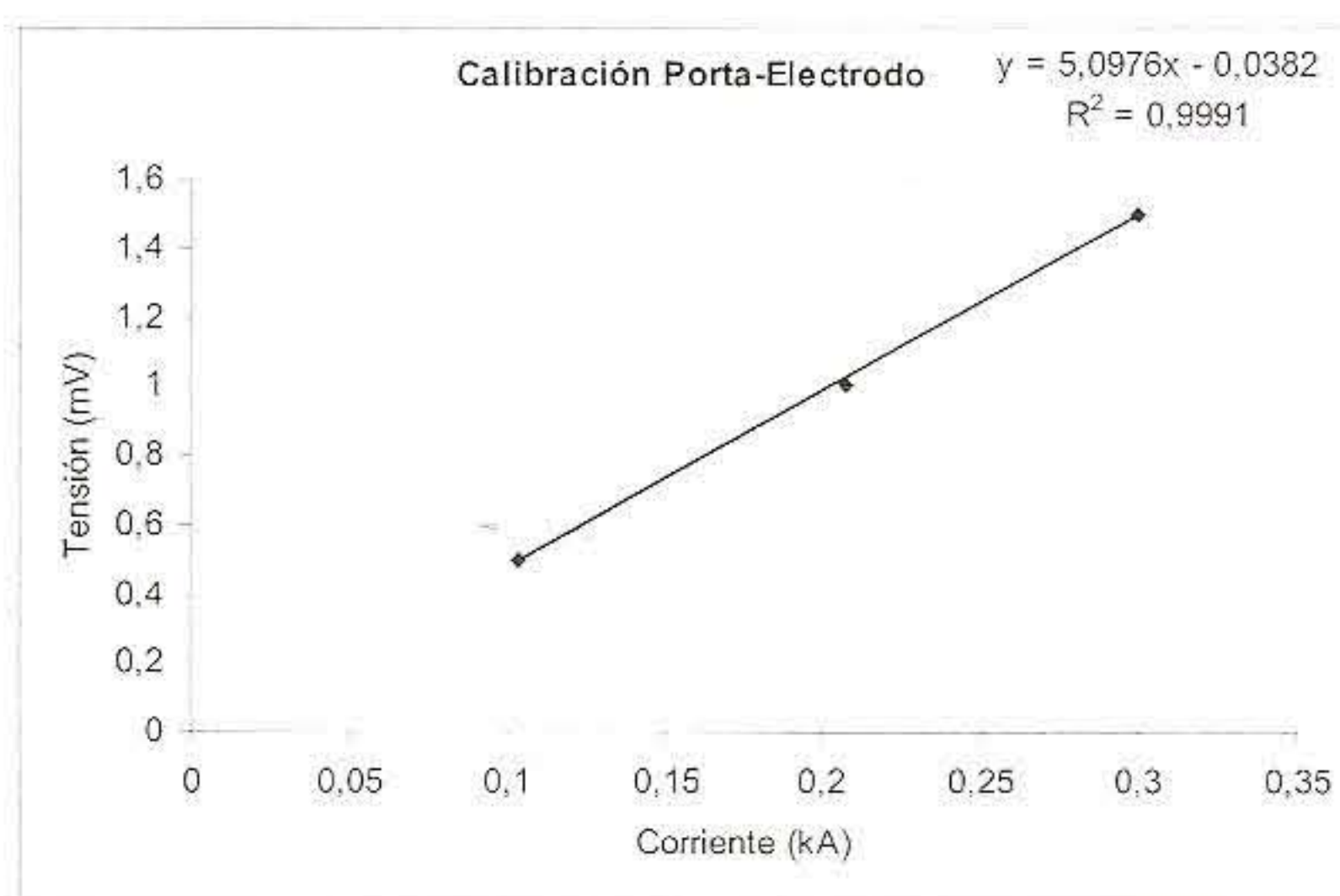


Figura 8 - Gráfico de calibración del porta-electrodo (shunt resistivo)

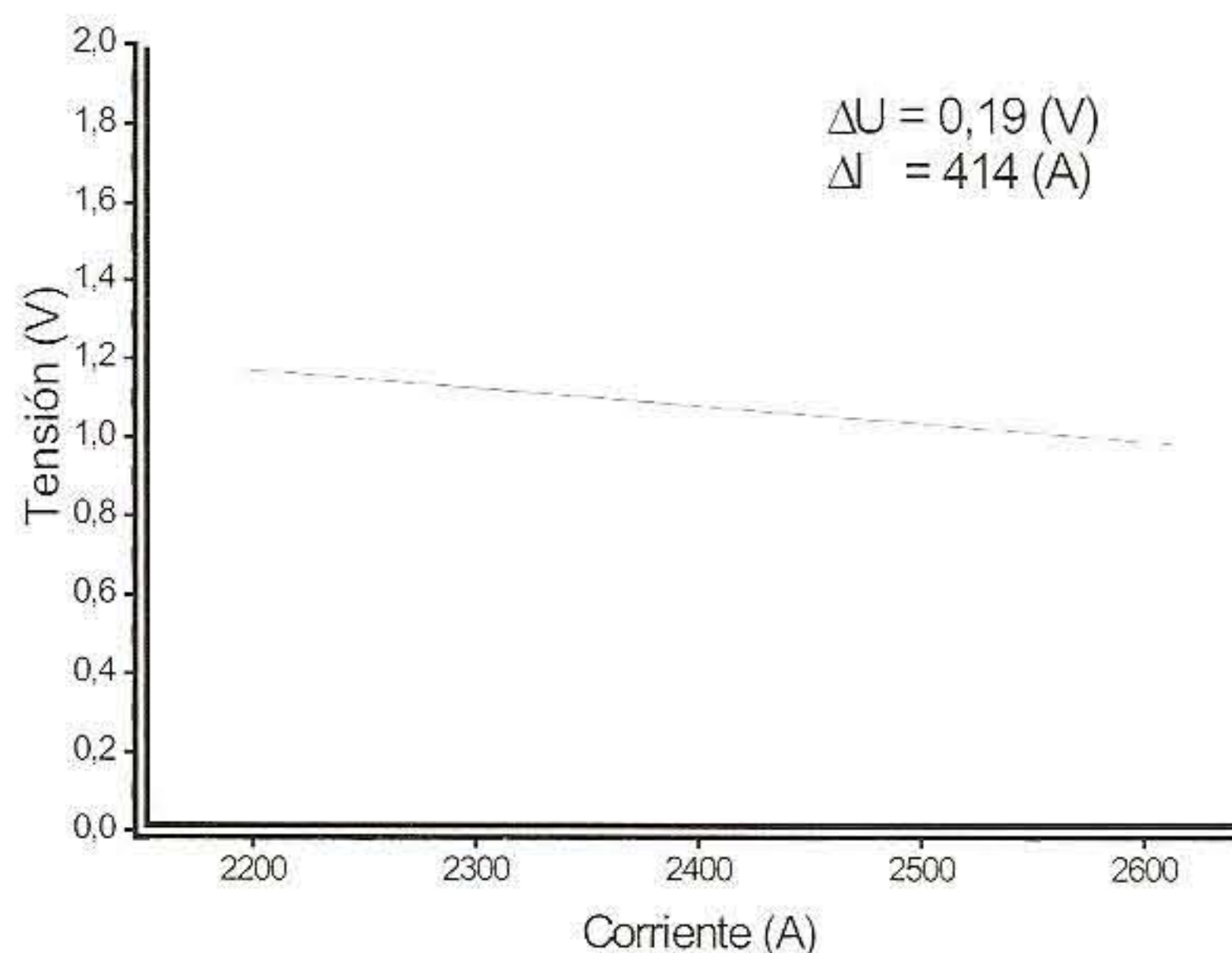


Figura 9 - Característica estática de una máquina de tensión constante

Obtención de las curvas de corriente y presión en un ciclo de soldadura

En la mayoría de los equipos, todos los tiempos de las fases de soldadura, que componen el ciclo de soldadura, en corriente alterna son determinados por ciclos, los cuales no deben ser confundidos con ciclos de soldadura. O sea, al especificar un intervalo de 30 ciclos en un equipo operando con frecuencia de 60 Hz, el intervalo especificado corresponde a 0,5 segundos.

Las fases que componen el ciclo de soldadura son básicamente: Aproximación de los electrodos, compresión y asentamiento de los materiales, soldadura, mantención y finalmente tratamiento térmico.

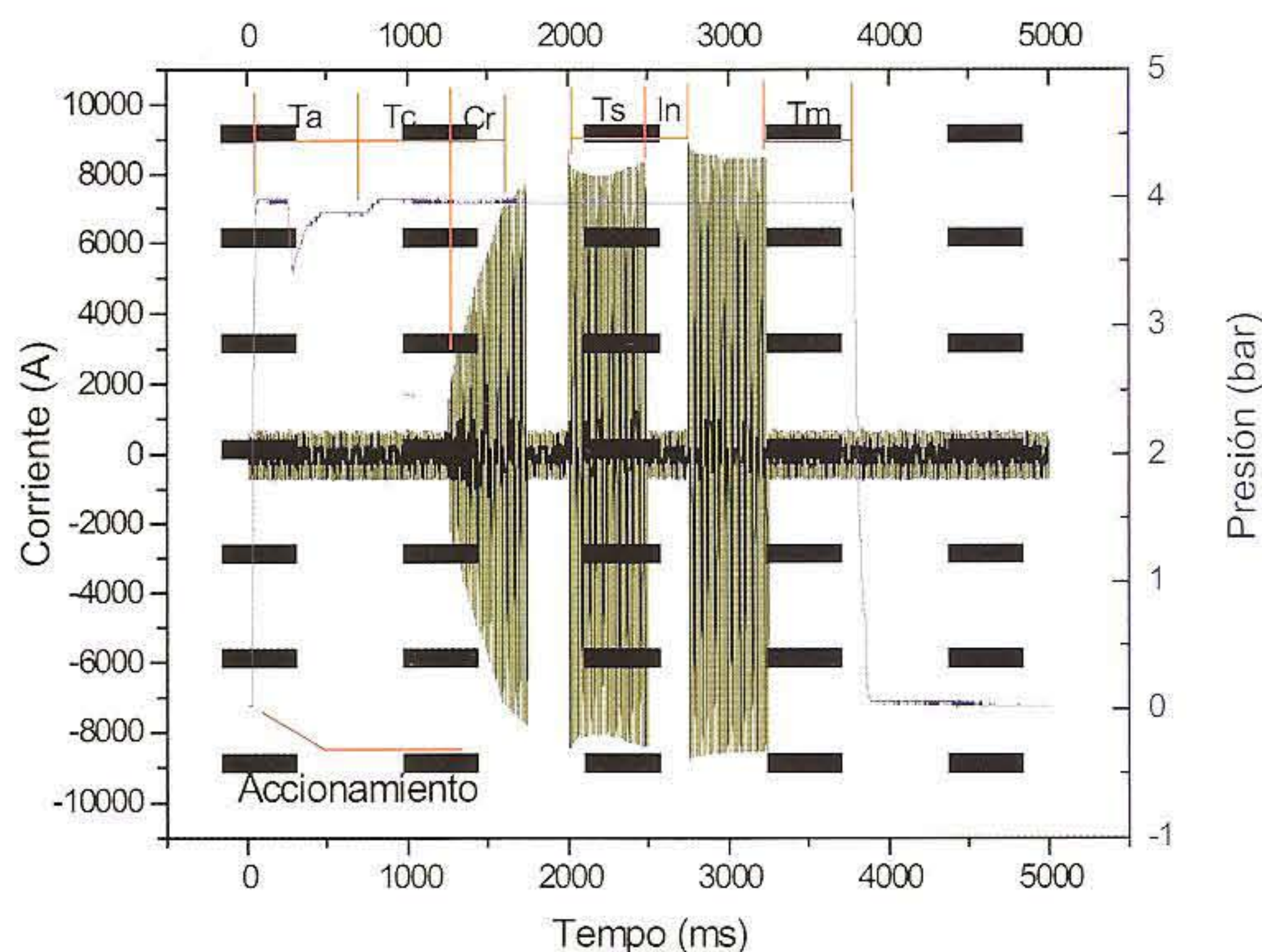
La Figura 10, presenta un ciclo de soldadura realizado con el equipamiento tiristorizado de 25 KVA.

La Tabla 1 muestra las condiciones con las cuales el ensayo fue realizado.

Obtención de la curva de Resistencia Dinámica

Las Figuras 11 y 12 muestran los gráficos de corriente y tensión obtenidos por el sistema de adquisición desarrollado por LABSOLDA. En estos gráficos es posible ver que la tensión está en fase con la corriente. Al dividir los valores de *peak* que corresponden a la tensión y a la corriente y luego interpolando una curva entre los puntos se llega a la obtención de la curva de resistencia dinámica. Figura 13.

Los resultados son los esperados cuando se compara esta curva con la de la Figura 5 que es la teórica. Todas las etapas pueden ser visualizadas en forma experimental, demostrando que todos los puntos fueron desarrollados, luego no existe fusión incompleta de las superficies.



Ta: Tiempo de aproximación; Tc: Tiempo de compresión; Ts: Tiempo de soldadura; In: Intervalo entre pulsos

Figura 10 - Oscilograma de corriente y de presión en un ciclo de soldadura

Tabla 1. Valores de las variables involucradas en un ciclo

Ta (ciclos)	Tc (ciclos)	Ts (ciclos)	In (ciclos)	Tm (ciclos)	Np (ciclos)	Cr (ciclos)	P (ciclos)
45	30	30	15	30	3	20	50

Ta: Tiempo de aproximación; Tc: Tiempo de compresión; Ts: Tiempo de soldadura; In: Intervalo entre pulsos; Tm: Tiempo de mantención; Np: Número de pulsos; Cr: Rampla de corriente; P: Fracción de potencia aplicada

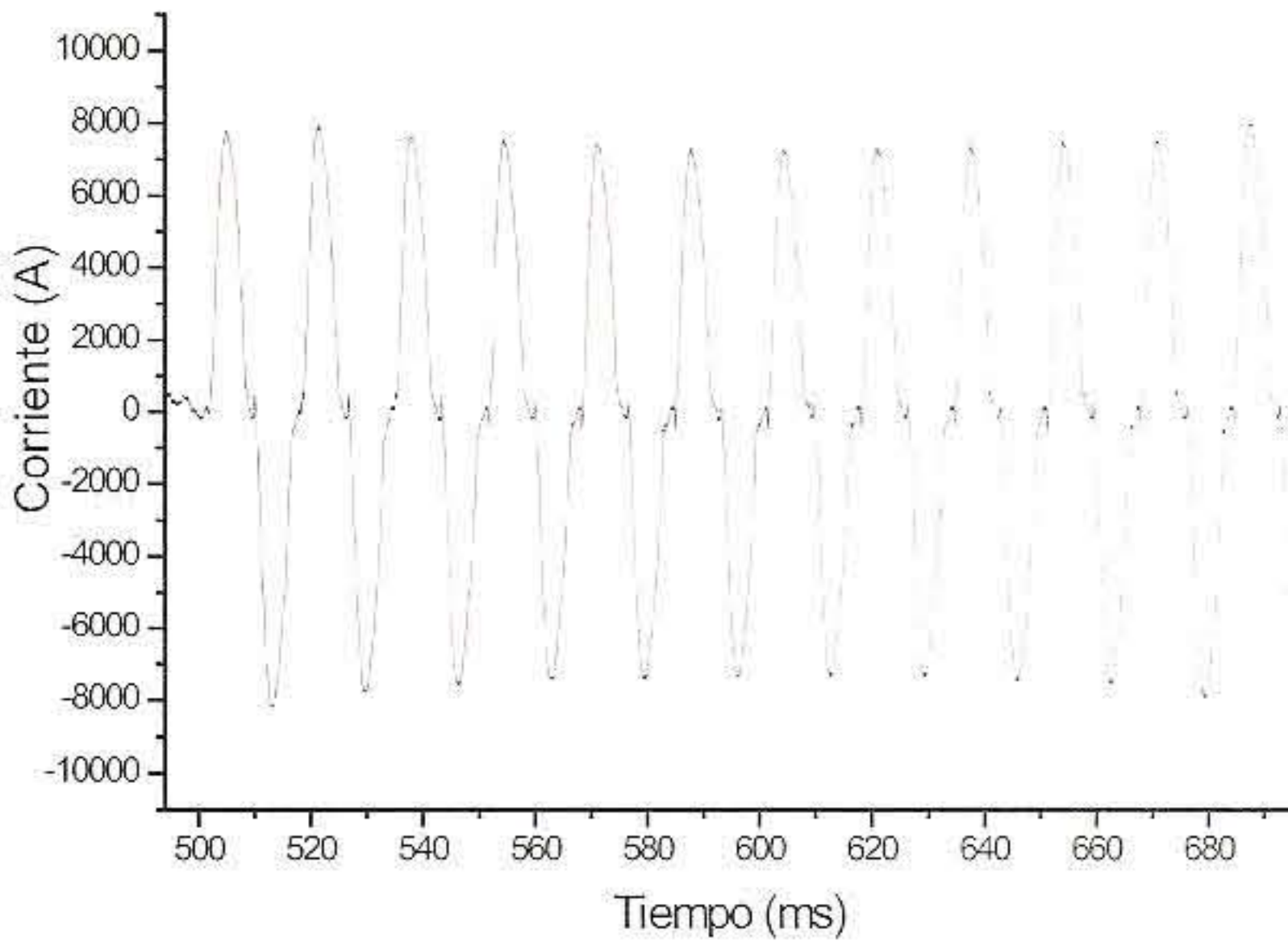


Figura 11 - Oscilograma de corriente

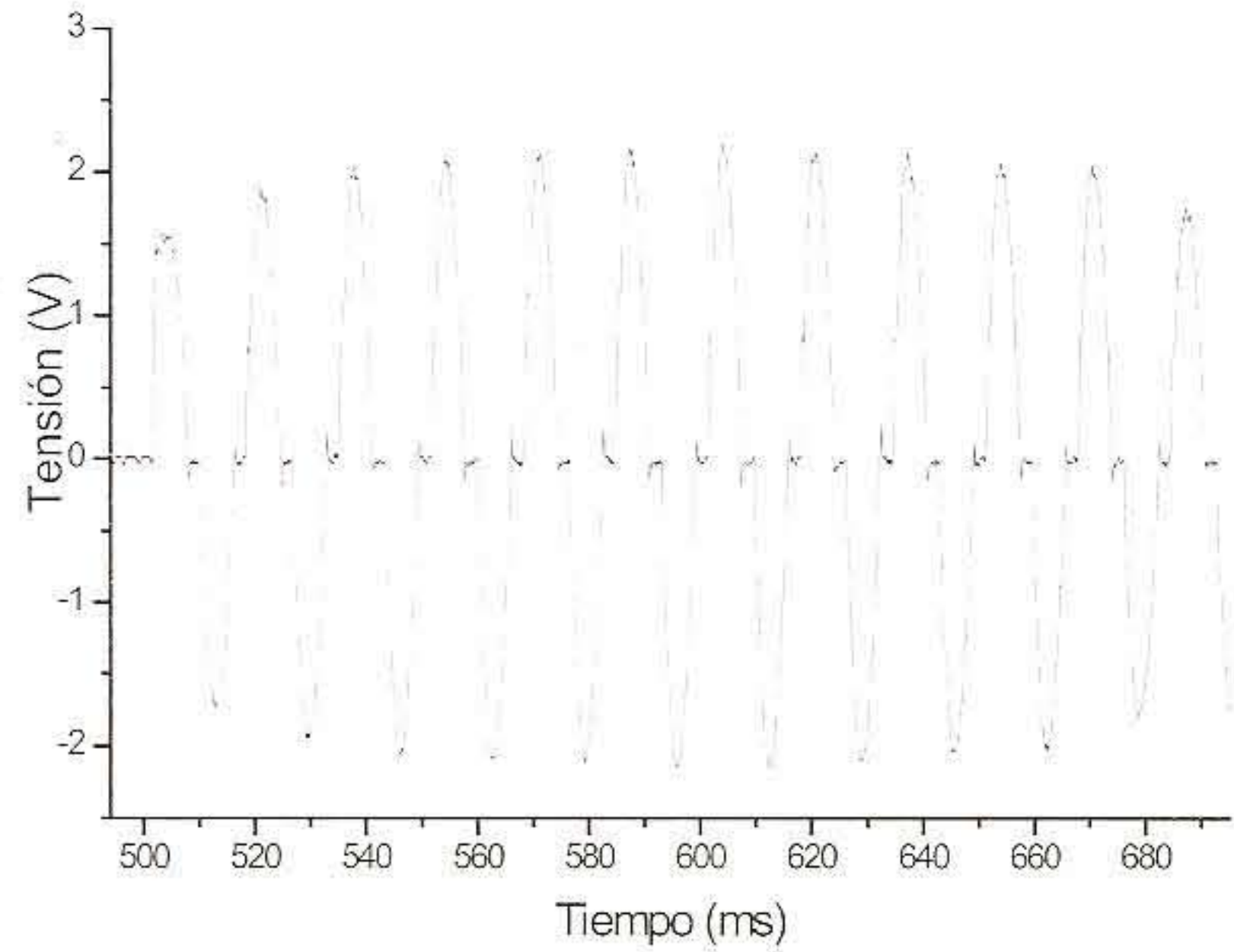


Figura 12 - Oscilograma de tensión

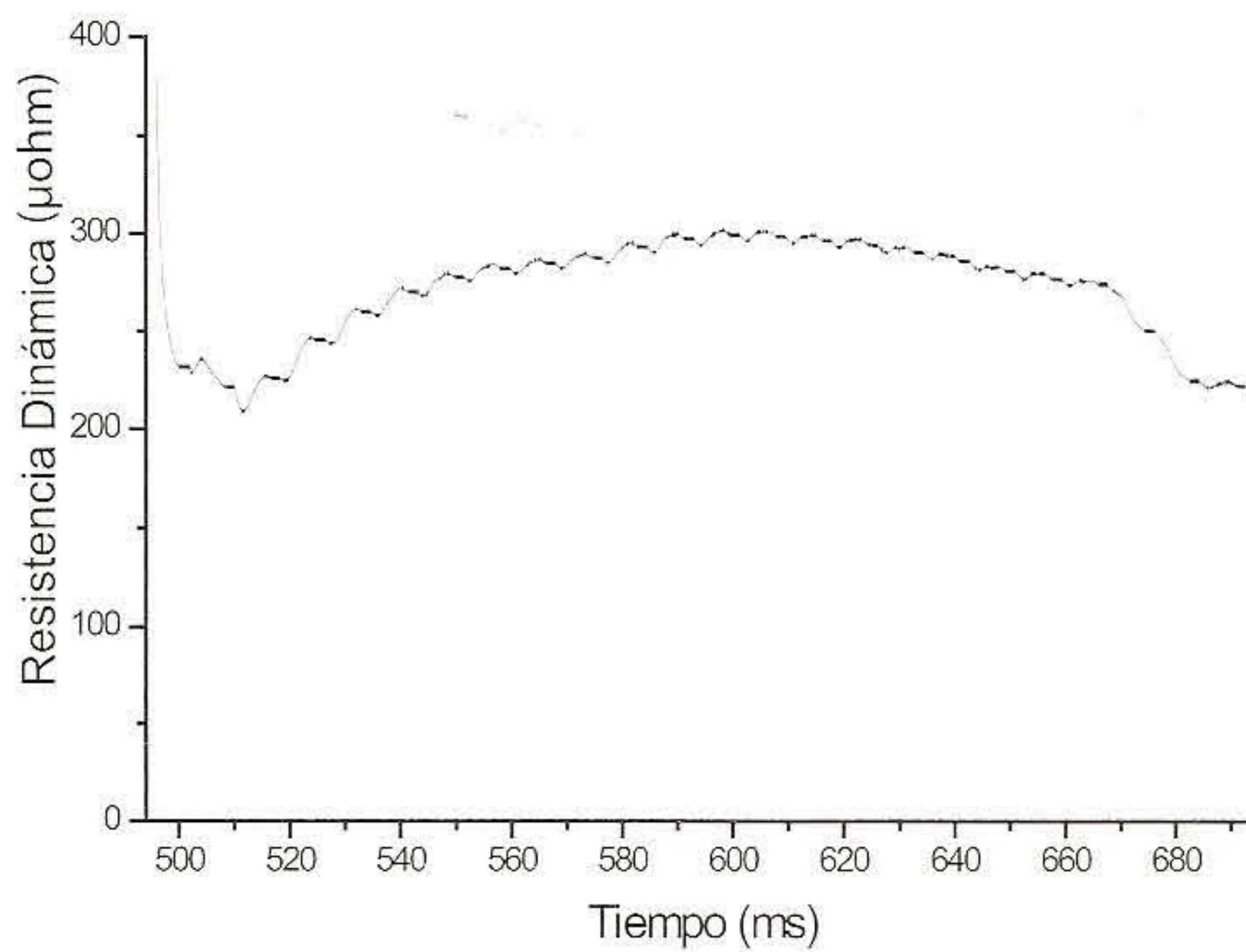


Figura 13 - Resistencia dinámica

CONCLUSIONES

- Dentro de los objetivos principales de este trabajo está la caracterización del proceso de soldadura por resistencia. Para conseguir los objetivos propuestos fue necesario el desarrollo de nuevos equipamientos de monitoreo en función de la modificación del programa OSCILOS, el cual fue adaptado para este proceso en particular, y la construcción de un equipamiento capaz de amplificar las señales.
- En un principio, las señales adquiridas directamente del porta-electrodo mostraban ruidos, problema que fue eliminado usando el procedimiento de perforar el porta-electrodo y hacer pasar los cables de medición de la señal por el interior. Una vez solucionado estos problemas el sistema de monitoreo desarrollado permitió visualizar todas las etapas que suceden cuando el punto de soldadura es formado a través de la adquisición en tiempo real de la curva de resistencia dinámica.
- La fuerza juega un papel importante en este proceso, ya que en función de esta variable es posible evitar: expulsión de material, penetración excesiva de los electrodos en las chapas y la eliminación del defecto rechupe.

REFERENCIAS

- CHUKO W. L., Development of Appropriate Resistance Spot Welding Practice for Transformation-Hardened Steels, *Welding Journal*, Vol. 81, 1-7 (2002).
- GUERRA, M. I. Soldagem e Técnicas Conexas: Processos, 1o Ed.; editado por el autor: Porto Alegre (1996).
- GEDEON, S. A., Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds, *Welding Journal*, Vol. 66, 378-385 (1987).
- AIDUN D. K., Effect of Resistance Welding Variables on the Strength of Spot Welded 6061-T6 Aluminum Alloy, *Welding Journal*, Vol. 64, 15-25 (1985).
- DICKINSON D. W., Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring, *Welding Journal*, 59, 170-176 (1980).