



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

DETERMINACIÓN DE DIAGRAMAS DE CONFORMABILIDAD
LÍMITE DE RECUBRIMIENTOS DE ZINALCO Y ALUMINIO
APLICADOS SOBRE ACERO SAE 1018

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MÉCANICO
QUE PRESENTAN:

ANTONIO ADOLFO NAVARRETE REYES
EDUARDO ROMAN MERCADO LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO



CIUDAD UNIVERSITARIA

2005



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicado con cariño y agradecimiento a todos los seres que me dieron amistad, educación, amor y la existencia misma.

Eduardo Mercado.

A mis padres

Les debo todo. Saber y sentir que siempre estuvieron para mi, me impulso a alcanzar esta meta. Gracias por su apoyo y por su amor.

A mis hermanos

Día con día fueron mis compañeros, mis amigos y mis cómplices en la laboriosa tarea de crecer. Gracias por sus consejos, su aliento y sus risas.

A Karla

Mi complemento perfecto. La persona que ha sido mi más grande inspiración y el motivo que todo hombre busca para seguir creciendo y avanzando. Gracias por acompañarme ayer, hoy y siempre, por tu amor y sobre todo por insistir. Te amo.

A mis maestros

Desde preescolar hasta la universidad. Gracias por sus enseñanzas y su ejemplo.

Antonio Navarrete.

Índice.

	Pag.
Introducción	3
Capítulo 1. Recubrimientos metálicos	6
1.1 <u>Recubrimientos en general</u>	6
1.1.1 Metalización por proyección térmica	7
1.1.2 Recubrimientos por electrodeposición	7
1.1.3 Recubrimientos por conversión	10
1.1.4 Recubrimientos por deposición física a partir de la fase vapor	15
1.1.5 Recubrimiento por deposición química a partir de la fase vapor	20
1.1.6 Chapeado	22
1.1.7 Cementación	22
1.1.8 Inmersión en caliente	22
1.2 <u>Aluminizado</u>	23
1.2.1 Preparación	24
1.2.2 Técnica de inmersión	26
1.2.3 Procesos de post-aluminizado	26
1.2.4 Tratamientos mecánicos	27
1.3 <u>Zinalquizado</u>	28
Capítulo 2. Conformabilidad	29
2.1 <u>Procesos de conformado volumétrico</u>	29
2.1.1 Laminado	30
2.1.2 Forjado	31
2.1.3 Extrusión	32
2.1.4 Estirado de alambre y barras	35
2.2 <u>Procesos de conformado plano</u>	36
2.2.1 Doblado	36
2.2.2 Embutido	39
2.2.3 Estirado de lámina	40
2.3 <u>Ensayos de conformabilidad de productos planos</u>	41

2.3.1	Ensayo de tracción	41
2.3.2	Ensayo de dureza	43
2.3.3	Ensayos de doblado	43
2.3.4	Ensayos de estirado	44
2.3.5	Ensayos de embutido	45
Capítulo 3. Problemas del conformado de lámina y diagrama límite		48
3.1	<u>Problemas del conformado de lámina</u>	48
3.1.1	Fracturas	48
3.1.2	Ondulaciones y pliegues	48
3.1.3	Distorsión de la forma	49
3.1.4	Pérdida del metal	49
3.1.5	Texturas superficiales indeseables	49
3.2	<u>Método y técnicas del diagrama de conformabilidad límite</u>	49
3.2.1	Técnica del mallado circular	51
3.2.2	Diagrama de conformabilidad límite	53
Capítulo 4. Desarrollo experimental, evaluación y análisis de resultados		58
4.1	<u>Técnicas</u>	58
4.1.1.	Recubrimiento con zinco	58
4.1.2.	Ensayo de tracción	60
4.1.3.	Diagrama de conformabilidad límite	62
4.2	<u>Resultados</u>	65
4.3	<u>Análisis de resultados</u>	103
Capítulo 5. Conclusiones.		115
Referencias Bibliográficas.		117

INTRODUCCIÓN.

Desde la antigüedad, el hombre ha hecho uso de los metales para resolver muchas de sus necesidades materiales, inicialmente en su forma pura y después en forma de aleación. Esto último tal vez de manera accidental en un principio, pero posteriormente la búsqueda sistemática de nuevos metales y aleaciones así como de procedimientos más eficaces para trabajar y utilizar los ya conocidos, dio origen a la metalurgia.

Casi ningún metal en su forma pura reúne características apropiadas para todas las aplicaciones industriales. El aluminio por ejemplo es muy blando y el zinc es sumamente frágil debido a su cristalización en forma de granos hexagonales muy gruesos. Sin embargo, los metales al combinarse forman aleaciones, las cuales sometidas a diferentes tratamientos termomecánicos, adquieren propiedades físicas que permiten transformarlas, mediante diversos procesos, en una gran variedad de productos.

Hoy la búsqueda de nuevos materiales no radica en la exploración de yacimientos o de metales desconocidos, sino en la obtención de materiales por medio de la combinación de propiedades de los ya conocidos, es decir, de las aleaciones.

Aún se desconocen las características de muchos materiales. Por eso cuando se descubren propiedades de alguno de ellos es posible que desplacen con suma facilidad del mercado a los más usuales. Por ejemplo, cuando apareció el aluminio, los países productores de cobre, como Chile, fueron gravemente afectados, pues el aluminio resultó ser mejor como cable de alta tensión. La fibra óptica desplaza también rápidamente al cobre como alambre conductor de señales. Otro caso es el de los plásticos, empleados en una gran cantidad de industrias de distinta índole, como la automotriz, electrónica, electricidad, plomería, etc. De esta manera, la fuente de producción de un país que sirve para ganar divisas y emplear a una buena parte de su población se ve de pronto inutilizada por la irrupción de otros materiales más efectivos y menos costosos.

En México este problema presenta rasgos particulares ya que se hace uso de un gran volumen de materiales de importación y se descuidan las reservas de metales con que se cuenta en buen volumen y calidad, tal es el caso del cobre y el zinc, que están perdiendo terreno en sus aplicaciones a nivel mundial. La mayor parte de la producción nacional de zinc se exporta como mineral o concentrados, sin mucho beneficio para el país. De las 200 mil toneladas anuales de zinc que producimos, por lo menos hacia 1989, alrededor de la mitad se vendían como concentrado, a un precio relativamente bajo.

En México el zinc ha estado durante mucho tiempo subutilizado. Así, con la idea de mejorar sus aplicaciones, se inició la investigación del material para tratar de introducirlo en otros campos.

Por otra parte, México no posee bauxita, mineral del que se extrae el aluminio y la electricidad -necesaria en el proceso de obtención del metal-, no es barata ni abundante. Así, la mayor parte del aluminio que utilizamos, es importado.

Como sabemos, la industria de la construcción consume el 70% de aluminio. Esta dependencia es significativa y peligrosa. El problema, no es que nos enfrentemos a una escasez mundial de aluminio, sino que debido a su precio ya no podamos pagar los incrementos anuales provocados por su demanda.

México acostumbra vender su materia prima y comprarla procesada, en lugar de aprovechar sus recursos naturales y producir a partir de éstos sus propios productos terminados. En nuestro país hay grandes yacimientos de bismuto, arsénico, selenio, cadmio, zinc, y muchos más, entre los más importantes.

Con respecto del zinc se ha trabajado en el desarrollo de aleaciones con el objeto de ampliar el campo de aplicación para este metal, del cual México es un importante productor a nivel mundial, y así evitar su desplazamiento por los plásticos y el aluminio. Los resultados de las investigaciones realizadas con este material condujeron al desarrollo de la aleación zinalco (palabra compuesta por las primeras letras de los metales componentes: Zinc, Aluminio y cobre) la cual, puede tener diversas aplicaciones dada su posibilidad de ser transformada tanto por procesos de fundición como por procesos de deformación plástica, permitiendo así que esta aleación pueda tener varias aplicaciones entre las que se pueden contar las siguientes:

- Perfiles arquitectónicos para intemperie
- Perfiles para ventanas
- Fabricación de piezas automotrices
- Componentes para torres eléctricas de transmisión
- Productos laminados para la industria de la construcción
- Elementos para cerrajería

Así mismo, se tiene que la aleación zinalco presenta buena resistencia a la corrosión, ya que tiende a pasivarse con facilidad resistiendo perfectamente las condiciones ambientales más adversas, a pesar de presentar menores propiedades mecánicas que el acero (baja tenacidad y dureza), y se reporta como un material que tiene buen nivel de resistencia a agentes oxidantes gracias a sus propiedades anticorrosivas.

La aleación zinalco, que es una combinación de zinc, aluminio y cobre, surgió como producto de estudios básicos realizados sobre las propiedades del zinc y del cobre. Se le llamó zinalco porque esta constituida de 77% de Zn, 21% de Al y 2% de Cu.

De acuerdo con las investigaciones realizadas sobre el desarrollo y propiedades del zinalco en el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM de la UNAM), la resistencia a la corrosión es una de sus propiedades más atractivas ya que es superior a las que presentan los productos galvanizados, además de aceptar recubrimientos protectores por anodizado o inmersión en baños de cromátos mediante una limpieza y preparación previa. Así mismo el zinalco, con cualquiera de sus microestructuras tiende a formar una capa de óxido protector al someterlo al vapor de agua y de igual forma cuando es deformado presenta una mayor ganancia en peso, posiblemente debido a que, la deformación produce levantamiento de los granos (relieve superficial), esto implica un aumento de la superficie efectiva reflejándose en una mayor cantidad de óxido protector formado

De acuerdo con las razones anteriormente expuestas se pretende generar un recubrimiento de zinalco (y de aluminio) sobre acero SAE 1018, que presente suficiente adherencia, que permita ser deformado en conjunto con el material base y que lo provea de la suficiente resistencia a la corrosión, logrando así, que el acero recubierto pueda ser empleado en áreas en las que se requieran materiales con la resistencia mecánica del acero pero con un buen nivel de resistencia a la corrosión, como la ofrecida por los recubrimientos, ampliando así el ámbito de aplicación de este conjunto de nuevos materiales.

Cabe aclarar que este trabajo es una parte del estudio del comportamiento del recubrimiento de zinalco sobre acero SAE 1018. Únicamente se analizara la conformabilidad del recubrimiento. Se realizaran recubrimientos con aluminio por que comercialmente ya existen, y se compararan con los recubrimientos de zinalco.

Para determinar que tan conformable es un recubrimiento, obtendremos su diagrama de conformabilidad límite, por medio de ensayos de tensión y estirado, y lo haremos en frío y en caliente para buscar la mejor opción y saber bajo que condiciones el recubrimiento de zinalco puede ser deformado sin riesgo a fracturarse.

El objetivo de este trabajo es "Obtener los Diagramas de Conformabilidad Límite de recubrimientos de Zinalco y Aluminio aplicados sobre Acero SAE 1018"; y al final del mismo analizaremos los resultados obtenidos, y daremos nuestra opinión y punto de vista respecto a que tan conveniente es utilizar una lámina recubierta de zinalco para la elaboración de productos que requieran partir de una lámina y luego ser deformados.

CAPITULO I

RECUBRIMIENTOS METALICOS

1.1 RECUBRIMIENTOS EN GENERAL

Un recubrimiento metálico es una capa de metal relativamente delgada, que recubre a otro material, como se puede observar en la figura 1.1. Los recubrimientos metálicos se aplican para lograr alguna propiedad superficial deseada que no tiene el metal base. Por lo general, las propiedades del conjunto vendrán determinadas por las del material predominante y el recubrimiento sólo tendrá marcada influencia sobre las propiedades de superficie como son:

- Proporcionar protección contra la corrosión al metal base.
- Aumentar la resistencia al desgaste y reducir la fricción de la superficie.
- Mejorar el aspecto del producto proporcionando ya sea un color o textura especificados.
- Mejorar la conductividad eléctrica.
- Aumentar la resistencia eléctrica.
- Preparar una superficie metálica para un proceso posterior.
- Reconstruir las superficies gastadas o erosionadas durante el servicio.
- Aumentar la capacidad de unión por procesos de soldadura.
- Incrementar la resistencia al calor.

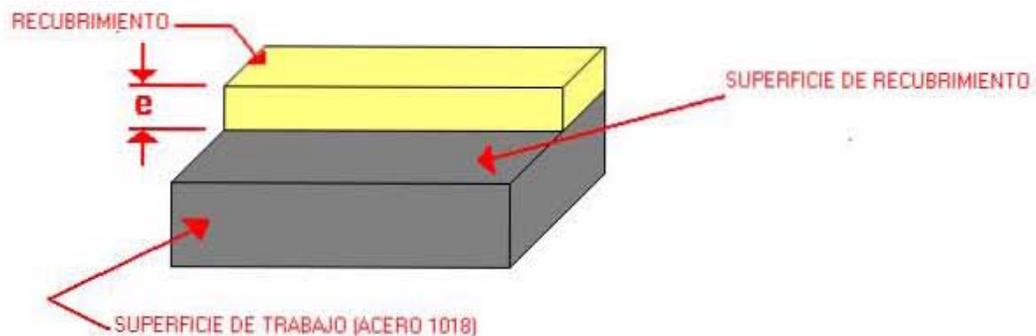


FIG. 1.1 Vista del corte de un recubrimiento de espesor e en una superficie de sustrato.

Los recubrimientos con metales no ferrosos tienen especial aplicación en la protección de otros metales, especialmente acero, en algunos medios corrosivos. La combinación de un metal base resistente mecánicamente y un recubrimiento resistente a la corrosión forma un material de gran importancia en la industria.

Existen diversos procedimientos para recubrir el acero, siendo los siguientes los más importantes:

1.1.1 Metalización por proyección térmica

La metalización por proyección térmica consiste en calentar un metal por encima de su punto de fusión y proyectarlo, con presión gaseosa, sobre el metal base o sustrato, donde llega en estado finamente dividido.

Generalmente la fusión y la proyección del metal se realizan en un mismo aparato llamado pistola. El metal se suministra a la pistola en forma de alambre, varilla, polvo, entre otros.

Los recubrimientos de aluminio por proyección son de un color gris mate, y consisten en glóbulos de aluminio compactados y aplanados. Estos recubrimientos contienen una pequeña proporción de óxidos por lo que no se forman intermetálicos y son poco porosos. Con este procedimiento se puede aplicar el recubrimiento por una sola cara y no hay limitaciones en las dimensiones de los artículos que trata, aunque si con la aplicación del recubrimiento en el interior de las piezas, sobre todo cuando dicho interior es reducido.

1.1.2 Recubrimientos por electrodeposición

Algunos metales como el aluminio y el cromo tienden a formar películas de óxido relativamente estables en su superficie al estar en contacto con la atmósfera. Estas películas son el resultado de cierta pasividad y reducen considerablemente la velocidad de corrosión del metal protegido en medios corrosivos. El objetivo de la deposición electrolítica es preparar depósitos metálicos que se adhieran correctamente sobre un sustrato y presenten una serie de propiedades predeterminadas (físicas, mecánicas o químicas) a partir de la reducción de los correspondientes iones metálicos realizada mediante la aportación de energía eléctrica. Es un sistema experimental en el que se transforma de forma controlada energía eléctrica en energía química.

Los componentes básicos de este sistema son los siguientes y se muestran en la figura 1.2:

- Baño electrolítico, que actúa como conductor iónico y que contiene una sal conductora, el metal a depositar en forma soluble y otros componentes como reguladores de pH, aditivos, etc.
- El cátodo a recubrir debe ser un conductor eléctrico.
- El ánodo, también conductor eléctrico que puede ser soluble (ánodo de sacrificio) ó insoluble (ánodo inerte).
- Una cuba inerte que contiene los componentes antes descritos.
- Una fuente de corriente continua.

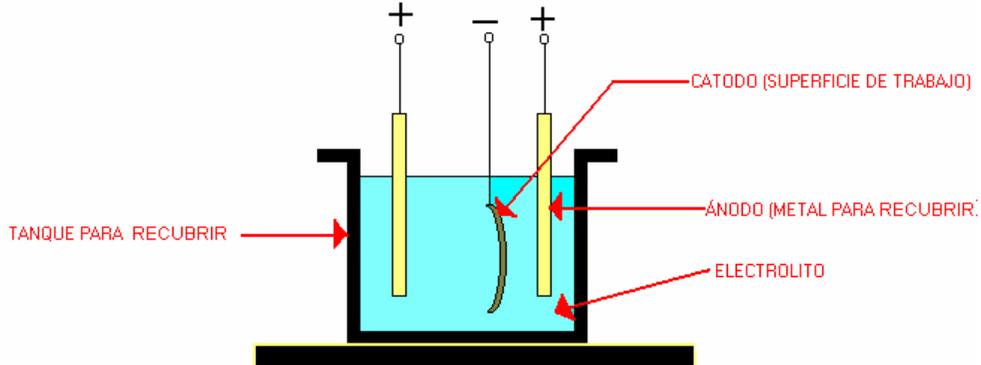


FIG. 1.2 Disposición experimental para la electrodeposición

El cambio químico que se produce en la cuba electrolítica es la suma de procesos que tienen lugar en los electrodos: oxidación en el ánodo (-) y reducción en el cátodo (+). Así se forman óxidos, fosfatos, cromatos, etc., que protegen posteriormente a los metales de la corrosión.

La capa de recubrimiento obtenida, a menudo presenta un aspecto más o menos irregular. En algunos casos esta irregularidad se aprovecha para facilitar el anclaje superficial de lubricantes, colorantes y de otros sistemas de protección como pinturas.

Una característica general de este tipo de recubrimientos es la buena adherencia que suele presentar, sobre todo si se comparan con otros tipos de recubrimientos metálicos y orgánicos.

La calidad de un recubrimiento electrolítico depende de un amplio conjunto de variables relacionadas con el baño electrolítico y los parámetros eléctricos del proceso, en resumidas cuentas, de variables como la naturaleza del metal, el tipo de electrolito y de las condiciones de trabajo tales como concentración, pH y temperatura del electrolito, voltaje y densidad de la corriente, etc.

Los parámetros o condiciones más importantes se describen a continuación:

Concentración del electrolito: La concentración del electrolito más conveniente es la que presenta menos resistencia óhmica al paso de corriente eléctrica.

Temperatura del baño: El aumento de la temperatura del baño implica un aumento de la conductividad iónica. La densidad de corriente permanece constante en la cuba sólo cuando en el baño existe una agitación mínima del electrolito y un aumento del brillo del recubrimiento, pero también se produce

un aumento de la disolución anódica, generándose porosidad muy acusada en el recubrimiento, además de disminución de la resistencia por abrasión.

Densidad de corriente: La densidad de corriente es la función de la fuerza electromotriz aplicada, de la intensidad de corriente que circula por el baño y de la superficie del ánodo.

Tiempo de duración del proceso: El espesor en los recubrimientos depende del tiempo de duración del tratamiento, utilizando densidades de corriente convencionales.

1. Recubrimientos de deposición sin electricidad

La deposición sin electricidad es el nombre que se da al proceso de recubrimiento que se produce mediante reacciones químicas y en el que no se requiere una fuente de corriente eléctrica externa. La deposición del metal en la superficie del sustrato ocurre en una solución acuosa que contiene los iones del metal para el recubrimiento que se vaya a utilizar. El proceso usa un agente reductor y la superficie de trabajo actúa como catalizador para la reducción. El proceso se caracteriza por una reducción selectiva y por la deposición continua sobre el sustrato a través de la acción catalítica del mismo depósito. El metal para deposición sin electricidad más común es el níquel y algunas de sus aleaciones (Ni-Co, Ni-P y Ni-B). Mediante este proceso se han logrado depositar materiales como cobalto, cromo, cobre, paladio, etc. Algunas de las características más importantes del depósito es que posee elevada dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión.

En general una solución en el proceso químico contiene los siguientes componentes:

- Una sal que suministre el níquel, un sulfato o fosfato comúnmente.
- Un agente reductor
- Agua destilada
- Agentes, para controlar la cantidad de níquel libre disponible para la reacción.
- Un regulador de pH
- Estabilizadores
- Aceleradores
- Una temperatura adecuada
- Una superficie catalítica a ser recubierta

El tratamiento previo a la realización de la deposición química es muy semejante al utilizado para los recubrimientos electrolíticos, aunque en muchas ocasiones, las superficies deben ser adecuadamente activadas con el fin de que funcionen como un catalizador eficiente de la reducción de los iones.

Si se considera una composición constante en el baño, la velocidad de deposición guarda una relación directa con las siguientes variables:

- La temperatura. La velocidad de deposición es una función exponencial de la temperatura. La temperatura óptima para efectuar el proceso de recubrimiento depende del sustrato y del recubrimiento, pero por lo general se encuentra entre 85° C y 95° C, y a medida que se alcanza el punto de ebullición de la solución, la estabilidad tiende a disminuir.
- Cantidad del agente reductor. La velocidad de deposición es una función directa de dicha concentración. De este modo un alto contenido de este ión sería deseable, de no ser porque la estabilidad del baño disminuye como función directa de la concentración de iones.
- pH. En términos generales la velocidad de deposición aumenta con el pH de la solución. La zona de pH preferida para una solución de niquelado químico, por ejemplo, está entre 4.3 y 4.8.
- Agitación. En general, la agitación aumenta la velocidad de deposición y la uniformidad en la superficie; esto es probablemente debido a que la capa de difusión adyacente a la superficie catalítica, está a un menor pH en el baño estático, la agitación eleva en esa interfase el pH e incrementa así la velocidad de deposición.

Algunas aplicaciones de los recubrimientos obtenidos por deposición sin electricidad han encontrado utilización en industrias como la petrolera, química, de plásticos, minería, nuclear, automotriz, de alimentos, etc. La deposición con cobre se usa para recubrir a través de orificios de tableros de circuitos impresos (industria electrónica). El cobre también puede utilizarse para recubrir partes plásticas con propósitos decorativos. La deposición con níquel se utiliza en elementos hidráulicos, tanques y tuberías (industria aeronáutica).

Las ventajas de la deposición sin electricidad se enumeran a continuación:

- Espesores de recubrimientos uniformes sobre geometrías de partes complejas (lo cual es un problema con la electrodeposición).
- El proceso puede usarse en sustratos metálicos y no metálicos.
- No se necesita una provisión de corriente directa para realizar el proceso.

1.1.3 Recubrimientos por conversión

Algunos metales, como el aluminio y el cromo, tienen tendencia a formar películas de óxidos relativamente estables en su superficie al estar en contacto con la atmósfera. Estas películas son el resultado de cierta pasividad y reducen, ya formadas, considerablemente la velocidad de corrosión del metal en medios corrosivos. Este comportamiento es debido a la formación de recubrimientos obtenidos por conversión. Por lo general estos recubrimientos se consiguen reaccionando la superficie metálica con la disolución que está en contacto con el metal. En el caso del anodizado, esta reacción tiene lugar con

el curso de la corriente eléctrica. Así se forman óxidos, fosfatos, cromátos, etc., protegiendo a los metales de una corrosión posterior.

Los recubrimientos obtenidos en este proceso por lo general presentan un aspecto más o menos irregular; y se aprovecha este aspecto para facilitar el anclaje superficial de lubricantes, colorantes y de otros sistemas de protección (pinturas).

Anodización

El anodizado es la formación de una capa de óxido, que recubre la superficie metálica después de haber conectado el metal al ánodo de una cuba electrolítica, dentro de una solución iónica adecuada.

El proceso del anodizado u oxidación anódica consta, de tres etapas:

- Oxidación del metal aluminio y formación sobre su superficie de una película dura de óxido.
- Disolución del metal aluminio en el electrolito.
- Desprendimiento de oxígeno en el ánodo.

En la oxidación anódica, la continuidad del proceso tiene lugar entre el óxido formado al comienzo y el metal base aluminio. El óxido inicial no actúa como aislante entre el metal situado debajo de él y la disolución electrolítica que la rodea, debido a una de las propiedades intrínsecas de la película de óxido (la porosidad); esa disolución electrolítica penetra a través de la película y establece contacto con el metal base situado debajo de él. De esta manera, las dimensiones de la pieza de aluminio sometida al anodizado no sufren alteración apreciable, pues si bien el espesor de la misma aumenta un poco debido a que el volumen de óxido de aluminio, es inferior al volumen de óxido de aluminio formado.

El procedimiento de anodización del aluminio comprende las siguientes tres etapas:

1) Oxidación anódica.

Este fenómeno consiste en la producción de una capa de óxido, más o menos hidratada, en la superficie metálica sumergida en un medio electrolítico y con la intervención de una corriente eléctrica.

Las tres reacciones que se tienen dentro de una cuba como la que se muestra en la figura 1.3 (utilizando corriente continua y la pieza a anodizar colocada en el electrodo positivo (ánodo)) son:

- Descomposición del agua. En el cátodo se genera hidrógeno y en el ánodo oxígeno.
- Disolución parcial del aluminio del ánodo. El líquido de la cuba electrolítica se va enriqueciendo en iones de aluminio.
- Oxidación superficial del aluminio al ánodo. Este fenómeno no es otra cosa que la formación de una película continua y porosa, principalmente de óxido de aluminio. Por un lado, la importancia de esta capa o película es que permite la protección de medios corrosivos naturales a un metal

tan electroquímicamente activo como lo es el aluminio; y por otro lado, la posibilidad de colorear esta capa y conseguir aspectos tan interesantes como decorativos para aplicaciones del aluminio en arquitectura.

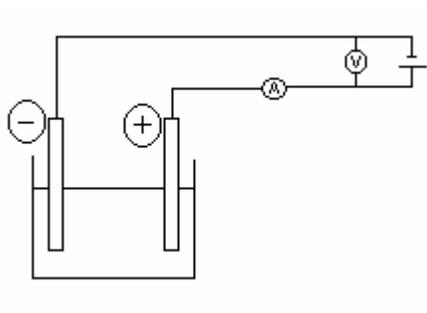


FIG. 1.3 Representación esquemática de la instalación del anodizado del aluminio.

Debido a las características aislantes (térmicas y eléctricas) que tiene la capa, repercute disminuyendo de manera importante la intensidad de corriente al permanecer constante la fuerza electromotriz inicialmente aplicada a la cuba electrolítica.

El valor de la intensidad de corriente llegaría a anularse si no fuera porque la capa de óxido hidratado contiene cierta porosidad y porque la tensión aplicada es superior a la tensión de rotura de esta capa aislante, esta resistencia eléctrica, que es la capa de óxido hidratado de aluminio depositada en la superficie de la pieza de aluminio a anodizar, aumenta la temperatura de esta zona y se produce una deshidratación parcial de la misma capa, originándose la capa barrera. Si se mantiene constante la densidad de la corriente, la temperatura y la agitación del baño, la capa barrera alcanza un límite y sobre ella va creciendo una capa de óxido de aluminio más deshidratada y porosa que la capa barrera, pero también continua. Por esta característica de porosidad se le denomina capa porosa y permite que su espesor crezca con el tiempo, mientras que el espesor de la capa barrera permanecerá prácticamente constante.

La capa porosa presenta una estructura celular hexagonal con un poro central (Figuras. 1.4 y 1.5). Poro que termina de forma redondeada en la capa barrera y repercute en ella de tal modo que la prolongación de la base del poro en el metal base presenta, también, intercaras redondeadas.

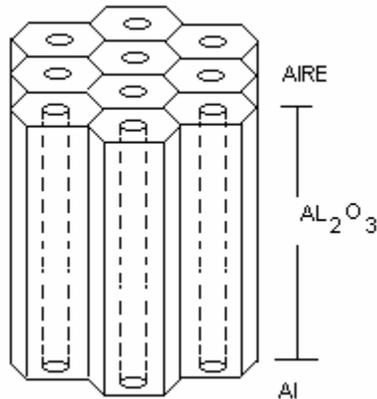


FIG. 1.4 Capas presentes en el aluminio después de haber sido sometido al procedimiento de anodización.

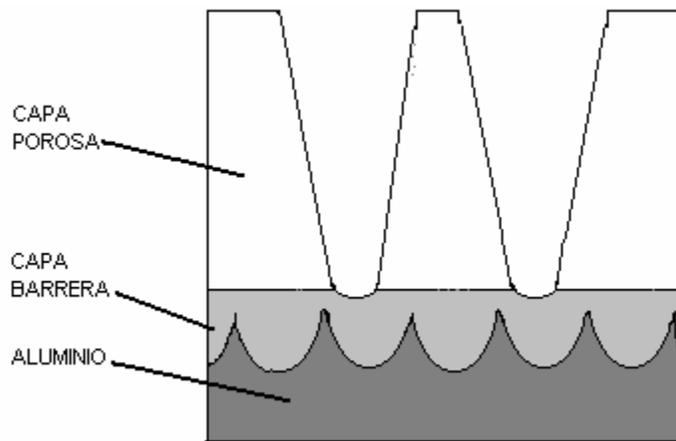


FIG. 1.5 Estructura celular de la capa porosa del aluminio anodizado.

Las propiedades del anodizado del aluminio, formado por la capa barrera y la capa porosa, son las siguientes:

- Son adherentes, continuas, aislantes térmicos y eléctricos.
- Tienen estructura porosa antes del sellado; de ahí sus características absorbentes y su capacidad para ser colorados por simple inmersión en disoluciones colorantes o electrolíticamente.
- Son transparentes.
- Después del colmatado, del que hablaremos mas adelante, tienen una inercia química muy grande en un intervalo de pH comprendido entre 5 y 9; de aquí su resistencia a la corrosión en una amplia variedad de medios.

Los factores que influyen en la calidad del anodizado del aluminio dependen de:

- La naturaleza del metal.
- Concentración del electrolito.

- Temperatura del baño
- Agitación
- Densidad de corriente
- Tiempo de duración del tratamiento.

2) Colmatación

La capa de óxido de aluminio poroso no constituye una barrera suficientemente protectora para evitar la corrosión del aluminio base. En cambio, si protege la capa obtenida por la transformación de este óxido monohidratado en otro mucho menos poroso y mas protector, ya que se ha originado un aumento de volumen (Fig. 1.6). Esto se consigue calentando el anodizado en agua hirviendo.

El mecanismo que se realiza para la colmatación es:

- Absorción de moléculas de agua en la superficie mas externa de los poros.
- Formación de cristales de agua en la superficie externa del anodizado
- Microcristalización en el fondo de los poros.

Los factores a tener en cuenta en la operación de la colmatación son:

- Pureza del agua
- Temperatura del agua
- Tiempo de tratamiento

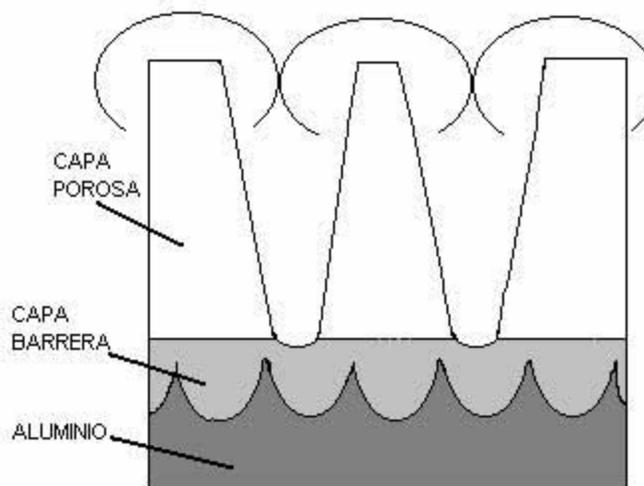


FIG. 1.6 Representación esquemática del anodizado del aluminio después de colmatar.

3) Coloración

La coloración consiste en convertir la película transparente de óxido de aluminio en una película coloreada, la cual se consigue (Fig. 1.7) por los siguientes procedimientos:

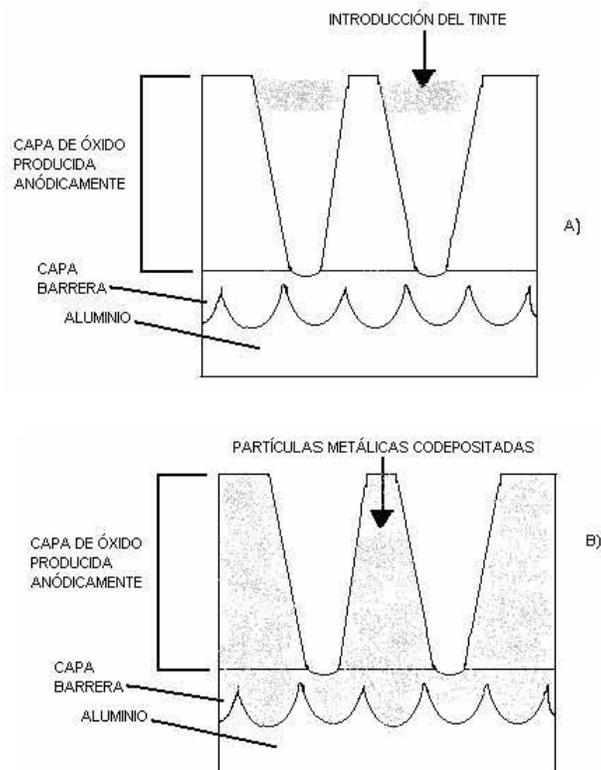
- Inmersión en disolución que contiene el colorante.
- Deposición catódica a partir de iones metálicos.
- Anodización autocolorante.

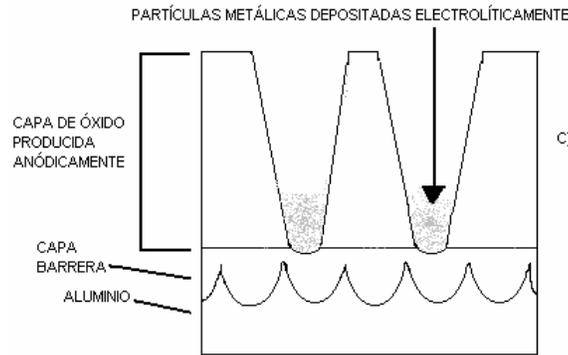
La coloración por inmersión se realiza introduciendo la pieza anodizada en disoluciones de sales minerales que precipitan dentro del poro, estas sales son compuestos inorgánicos insolubles, como óxidos e hidróxidos coloreados. Los colorantes orgánicos quedan absorbidos, principalmente dentro de los poros.

1.1.4 Recubrimientos por deposición física a partir de la fase vapor

La deposición física de vapor, DFV (PVD por sus siglas en ingles), se refiere a los procesos en los cuales se convierte un material a su fase de vapor en una cámara de vacío y se condensa sobre una superficie de sustrato como una película delgada.

Fig. 1.7 Tres tipos de coloración del aluminio; a) por absorción, b) integral y c) electrolytica





Este proceso representa una tecnología de recubrimiento muy versátil aplicable a una combinación casi ilimitada de sustancias de recubrimiento y materiales de sustratos.

Los procesos para la deposición física de vapor consisten en los siguientes pasos:

- Síntesis del vapor de recubrimiento
- Transporte del vapor al sustrato
- Condensación de los vapores sobre la superficie del sustrato.

Por lo general, la secuencia anterior se realiza dentro de una cámara de vacío. La deposición física de vapor se obtiene mediante tres métodos principales, los cuales son:

- Evaporación en vacío
- Bombardeo de partículas atómicas
- Recubrimiento iónico

En la tabla 1.1 se presenta algunas características generales de cada proceso antes mencionado.

PROCESO	ACIDO %	DENSIDAD DE CORRIENTE (A/dm ²)	VOLTAJE (V)	TEMP. (°C)	TIEMPO (min.)	TIPO DE PELICULA
ACIDO CRÓMICO	3	0.4-0.6	Ciclo V/t	40	60	*Gris-blanco
	10	0.4-0.6	Ciclo V/t	40	30	*Opaco
ÁCIDO SULFÚRICO	14	0.8-1.0	15	10-15	30-40	*Poco translúcido
	20	1.2-1.5	15	18-20	20	*Normal translúcido
ÁCIDO OXÁLICO	5	0.5-1.5	30-60	20	30	*Amarillo pálido
	5	1.5	50	35-40	60	*Amarillo fuerte
	5	1.5	60	35-40	60	*Grueso
	3+2% oxalato potásico	1.5	50	40	30-60	*Grueso, incol.

Aplicaciones generales

Este tipo de recubrimientos incluyen los decorativos delgados sobre partes de plástico y metálicas, tales como trofeos, juguetes, plumas y lápices, empaques para relojes y adornos para interiores de automóviles. Los recubrimientos son películas delgadas de aluminio (aprox. 150 nm) aplicadas con laca transparente para proporcionar un aspecto de plata o cromo satinado. Otro uso importante es en recubrimientos antireflejantes de fluoruro de magnesio (MgF_2) sobre lentes ópticos. También se aplica en la fabricación de artículos electrónicos, principalmente para la deposición de metales que tiene el propósito de formar conexiones eléctricas en circuitos integrados. Por último, la deposición física de vapor se usa ampliamente para recubrir herramientas de corte y moldes de inyección de plásticos con nitrúro de titanio (TiN) para que resistan el desgaste.

1. Evaporación al vacío

Es posible depositar ciertos materiales (principalmente metales puros) sobre un sustrato, transformándolos primero de estado sólido a vapor en una cámara de vacío y después permitiendo que se condensen en la superficie del sustrato. Este proceso se muestra en la figura 1.8.

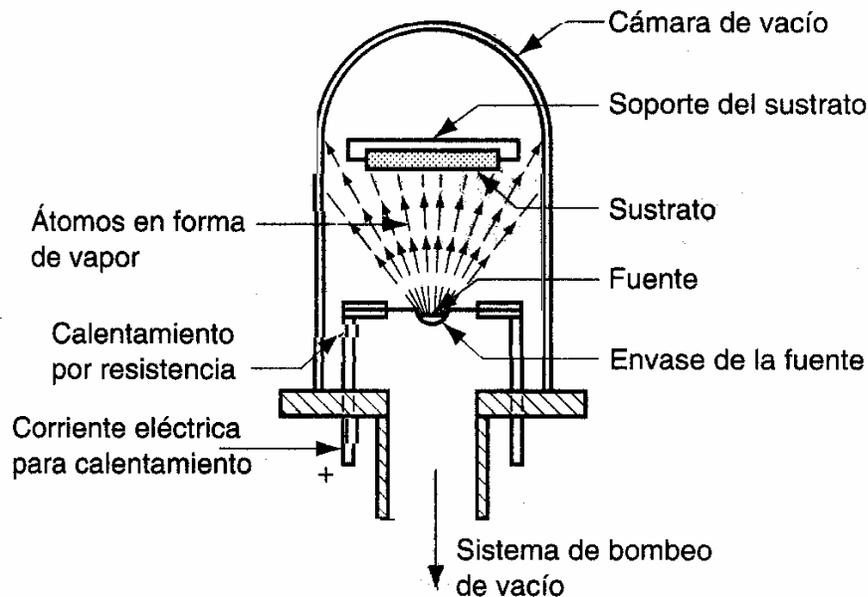


FIG. 1.8 Instalación para la deposición física de vapor por evaporación al vacío.

La evaporación se lleva a cabo en sistemas de vacío (el vacío es conveniente que sea del orden de 9.9866 Pa o mayor), dentro de los cuales se calienta el material a evaporar, llamado fuente, hasta temperaturas cercanas a su punto de fusión o de sublimación. Dado que el calentamiento se obtiene en un vacío, la temperatura requerida para la evaporación es

significativamente menor que la temperatura requerida a presión atmosférica normal. Asimismo, la ausencia de aire en la cámara evita la oxidación del material fuente a las temperaturas de calentamiento.

Se utilizan varios métodos para calentar y vaporizar el material. Entre los más importantes están:

a) Calentamiento por resistencia.

Esta técnica es la más sencilla. Primero se forma un metal refractario (ej. W ó Mo) en un envase adecuado para contener al material fuente. Se aplica una corriente para calentar el envase (crisol) y este transmite calor al material en contacto (Fig. 1.9). El problema en este método es la película posible entre el envase y su contenido, ya que la película depositada se contamina con el metal del envase de calentamiento.



FIG. 1.9 Esquema de evaporación

b) Bombardeo con haz de electrones.

En este método el material es bombardeado por un haz de electrones de alta energía, calentando así el material. Por este método, los electrones de cualquier elemento de la Tabla periódica o compuesto pueden ser evaporados. Elementos con muy baja presión de vapor como W, Ta y Mo pueden también evaporarse por haz de electrones.

Se utilizan presiones por debajo de 0.133 Pa, donde ya no hay flujo molecular de los gases; por lo que hay un alto grado de pureza en el sistema (falta de gases contaminantes) y se pueden mantener altas diferencias de voltaje.

El material del centro funciona como soporte o "vasija contenedora" con lo que se evita la contaminación del crisol (Fig. 1.10).

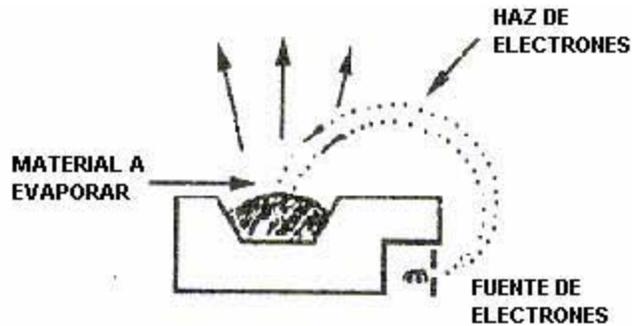


FIG. 1.10 Esquema de evaporación.

Este método de bombardeo con haz de electrones es el más utilizado actualmente en la industria, ya que posee las siguientes ventajas:

- Permite grandes cargas de material
- Permite evaporación secuencial de material depositado en diferentes crisoles hacia los cuales puede dirigirse el haz de electrones
- Permite evaporación simultánea de materiales colocados en distintos crisoles
- Velocidad típica de deposición de $100 \mu\text{m}/\text{min}$.
- Además con las presiones que se utilizan de 10 Pa y siendo un proceso muy rápido se puede conseguir que los depósitos tengan menos impurezas por cada millón de átomos.

Cualquiera que sea la técnica de evaporación, los átomos evaporados dejan la fuente y siguen trayectorias en línea recta hasta que chocan con otras moléculas de gas o con una superficie sólida. El vacío dentro de la cámara prácticamente elimina otras moléculas de gas, por lo que reduce la probabilidad de choques con átomos del vapor de la fuente, además el mismo gas que se evapora hace reducir la presión parcial de los contaminantes. La superficie del sustrato que se va a cubrir generalmente se coloca en relación con la fuente, de este modo se asegura la deposición de los átomos en forma de vapor sobre la superficie sólida. En ocasiones se utiliza un manipulador mecánico para rotar el sustrato de tal manera que se recubran todas las superficies.

Tras el contacto con la superficie del sustrato relativamente fría, el nivel de energía de los átomos que chocan se reduce repentinamente, hasta un punto donde ya no pueden permanecer en estado de vapor, entonces, se condensan y se pegan a la superficie sólida, donde forman una película delgada.

2. Bombardeo con partículas atómicas (sputtering)

El sputtering o pulverización catódica es otra de las técnicas de deposición física en fase vapor que más se emplea en la formación de capas delgadas, sobre todo en microelectrónica y óptica. En esta técnica se lanzan partículas (generalmente iones acelerados por una diferencia de potencia, es decir el bombardeo de material de recubrimiento catódico con iones de gas argón)

contra la superficie de un blanco, provocando que los átomos de la superficie escapen, para depositarse sobre un sustrato formando de esta manera una película delgada sobre él. Debido a que en este caso se emplean partículas de alta energía es conveniente el uso de un gas ionizado, como el argón energizado mediante un campo eléctrico para formar un plasma. El sustrato debe colocarse cerca del cátodo y por lo general, se calienta para mejorar la unión de los átomos del recubrimiento. Este proceso se muestra en la figura 1.11.

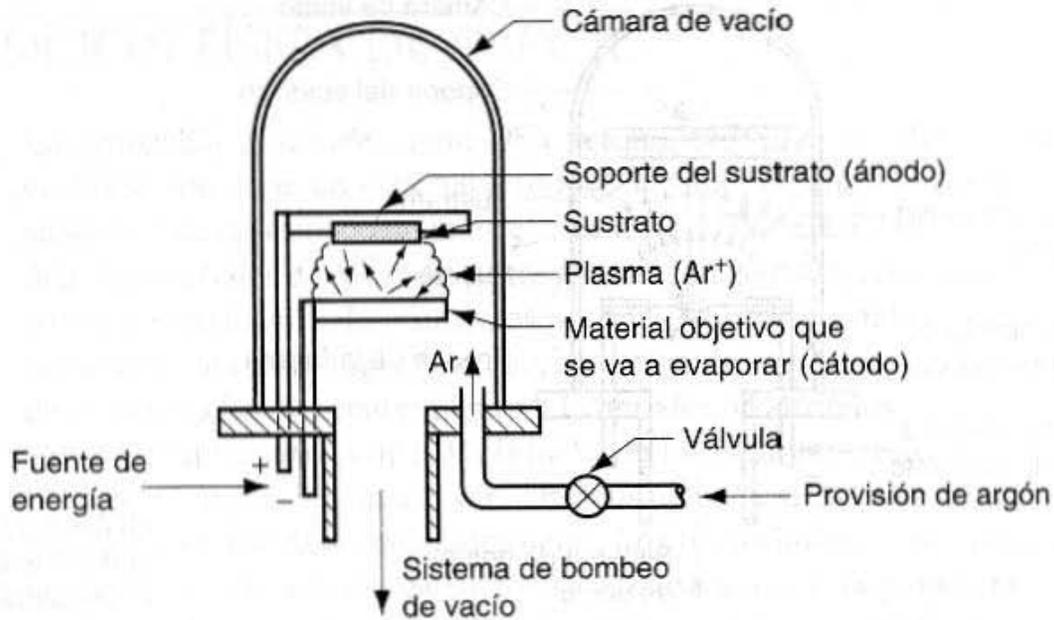


FIG. 1.11 Bombardeo con partículas atómicas.

1.1.5 Recubrimiento por deposición química a partir de la fase vapor

El procedimiento de la deposición física de vapor (CVD por sus siglas en inglés) implica la interacción entre una mezcla de gases y la superficie de un sustrato calentado, provocando la descomposición química de algunas de las partes del gas y la formación de una película sólida en el sustrato. Todo esto ocurre en una cámara de reacción sellada. El producto de la reacción (sea un metal o un compuesto) forma un núcleo y crece en la superficie del sustrato para formar el recubrimiento. Por lo general todas las reacciones de la deposición química de vapor requieren calor; sin embargo esto dependerá de los productos químicos implicados. Las reacciones pueden ser provocadas por otras fuentes de energía, como la luz ultravioleta o un plasma. Este proceso incluye un amplio rango de presiones y temperaturas y se aplica a una gran variedad de materiales de recubrimiento y de sustrato.

Las ventajas que se citan comúnmente para la deposición química de vapor son:

- Es posible depositar materiales refractarios a temperaturas debajo de sus puntos de fusión o sinterizado.
- Posible control del tamaño de grano.
- El proceso se realiza a presión ambiente (es decir, no se requiere equipo de vacío).
- Existe una buena unión del recubrimiento a la superficie del sustrato.

Las desventajas son:

- La naturaleza corrosiva y tóxica de los productos químicos, por lo general, se requiere una cámara cerrada al igual que equipo de bombeo y disposición especial.
- Algunos ingredientes para la reacción son relativamente costosos.
- Se utiliza poco material.

Los metales recomendables a utilizar para este tipo de recubrimiento son el tungsteno, el molibdeno, el titanio, el vanadio y el tantalio. Este proceso es muy recomendable para el caso de compuestos como el óxido de aluminio (Al_2O_3), el dióxido de silicio (SiO_2), el nitruro de silicio (Si_3N_4), el carburo de titanio (TiC) y el nitruro de titanio (TiN).

Los gases o vapores reactivos que se utilizan, por lo general son hidruros metálicos (MH_x), cloruros (MCl_x), fluoruros (MF_x) y carbonilos [$\text{M}(\text{CO})_x$], en donde "M" es el metal que se va a depositar y "x" se usa para equilibrar las valencias en el compuesto. En algunas reacciones se usan otros gases, como el hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco (NH_3).

Equipo

El proceso de deposición química de vapor se realiza en un reactor que consiste en:

- Sistema de provisión de reactivos
- Cámara de deposición
- Sistema de reciclado /evacuación

El sistema de provisión de reactivos sirve para incorporar reactivos en la cámara de deposición en las proporciones adecuadas. Se requieren diferentes tipos de sistemas de provisión dependiendo de si los reactivos se incorporan como gas, líquido o sólido.

La cámara de deposición contiene los sustratos y las reacciones químicas que conducen a la deposición de los productos de reacción sobre las superficies. La deposición ocurre a elevadas temperaturas y el sustrato debe calentarse por inducción, mediante calor radiante u otros medios. Las

diferentes temperaturas que se utilizan, varían de acuerdo a las diferentes reacciones de CVD oscilando entre 250 y 1950° C, por tanto el diseño de la cámara debe ser diferente para cumplir con estas demandas de temperatura.

La función del sistema de reciclado-evacuación, es volver inofensivos los subproductos de la reacción de CVD, esto incluye la recolección de materiales tóxicos, corrosivos y flamables, seguida por una disposición y procesamiento adecuados.

1.1.6 Chapeado

Mediante la técnica del chapado se consiguen espesores de recubrimiento muy superiores a los obtenidos con los otros recubrimiento (entre 100 y 1500 μm). Los primeros chapados se realizaban por laminación en caliente del sustrato y del recubrimiento. Más adelante se introdujo la técnica de la electro-soldadura y actualmente se unen las chapas por fusión y por soldadura por explosión. La interdifusión entre el metal base y la lámina de recubrimiento proporciona la suficiente adherencia. Estos recubrimientos están exentos de porosidad y tienen una buena ductilidad y resistencia al calor.

1.1.7 Cementación

La cementación es un proceso de metalización que consiste en un tratamiento termoquímico de difusión, mediante el cual se consigue la formación de una aleación superficial resistente al calor y a la corrosión.

El proceso que se utiliza para obtener recubrimientos por cementación se llama calorización. La calorización es la saturación de la capa superficial de la pieza con aluminio, a fin de aumentar su resistencia al calor. Se lleva a cabo introduciendo las piezas en cajas cerradas dentro de las cuales se introduce una mezcla de polvo de aluminio, cloruro amónico y alúmina en una atmósfera reductora o inerte. Después las cajas se introducen en un horno a 950 -1000 ° C durante 4-15 horas.

El espesor del recubrimiento es función del tiempo y de la temperatura de tratamiento y suele estar entre 25-150 μm . Estos recubrimientos se utilizan casi exclusivamente para la protección contra la oxidación a altas temperaturas (por encima de los 900° C).

1.1.8 Inmersión en caliente.

La inmersión en caliente es uno de los métodos más antiguos para lograr recubrir un meta con otro, y todavía hoy se utiliza ampliamente, puesto que es de los procesos de recubrimiento en los que se consigue una mayor adherencia y su aplicación resulta económica. El recubrimiento se forma en la

superficie del metal base, cuando este se sumerge en el metal protector fundido.

Por inmersión en caliente se consiguen espesores de recubrimiento relativamente gruesos, entre 0.01 y 0.1 mm. Los metales usados para este recubrimiento han de tener bajos puntos de fusión, para evitar cambios térmicos en el metal base. Los mas indicados son: zinc, estaño, plomo y aluminio.

El recubrimiento obtenido por inmersión en caliente consiste en una capa interna de aleación y otra capa externa de metal puro. La formación de la capa aleada da lugar a que la adherencia recubrimiento-sustrato sea en general muy elevada. La capa de aleación se forma por difusión del metal fundido dentro del metal base y consiste en un intermetálico, metal protector-metal base. La capa exterior del metal puro se forma a partir del metal líquido que se adhiere a la superficie de la pieza cuando esta se extrae del baño. En general el espesor del recubrimiento se puede variar mediante el control del tiempo de inmersión, de la temperatura del baño, de las velocidades de inmersión y de extracción, de la velocidad de enfriamiento y de la composición química del baño. Las propiedades a considerar en la calidad de un recubrimiento son: espesor medio, uniformidad del espesor de la capa, adherencia y ductilidad. Solamente podrán obtenerse recubrimientos satisfactorios con una correcta preparación de la superficie a recubrir, adecuado tiempo y temperatura del tratamiento y gran pureza del metal protector.

1.2 Aluminizado

El aluminizado es un procedimiento de protección contra la corrosión mediante el cual se obtienen recubrimientos de aluminio sobre aleación base hierro, por inmersión en un baño de aluminio fundido.

En este proceso la difusión juega un papel importante para alcanzar una satisfactoria unión metálica. Estas son algunas de las condiciones que deben de cumplirse:

- El metal sustrato y el metal protector deben presentar solubilidad a temperatura ambiente (en estado sólido) y a altas temperaturas (en estado líquido).
- Los diámetros atómicos del metal recubrimiento y del metal sustrato no deben diferir en más de un 16%.
- Se deben mantener un contacto íntimo entre el recubrimiento metálico y el sustrato.

En el aluminizado se cumple el primer principio puesto que el aluminio es soluble en el hierro a alta y baja temperatura. También se cumple el segundo, puesto que el factor diferencial entre los diámetros atómicos del hierro y del aluminio es del 11.7%. Luego si se cumple el tercer principio

será posible una buena unión en el aluminizado, por lo cual la superficie de las piezas a recubrir ha de estar químicamente limpia para que no haya ningún impedimento al realizarse la difusión.

1.2.1 Preparación

La tecnología de la aluminización por inmersión en caliente presenta un amplio espectro de aplicaciones industriales, gracias a la buena resistencia a la corrosión de los recubrimientos de aluminio obtenidos por difusión y la posibilidad de combinar simultáneamente el recubrimiento de los productos con su tratamiento térmico durante el proceso de aluminizado.

Preparación superficial

Una buena preparación de la superficie es fundamental a la hora de obtener un buen recubrimiento, la existencia de materiales extraños diseminados sobre la superficie ocasiona defectos en el recubrimiento, no solo en la adherencia, resistencia a la corrosión o continuidad del recubrimiento, sino también en los aspectos de acabado superficial y estético.

Dado que el aluminio fundido no puede atacar al metal base a través de grasas, óxidos y cascarillas, la superficie de las piezas a recubrir ha de estar químicamente limpia antes de su inmersión en el baño de aluminio.

El proceso general para la adecuación de la superficie, consta de tres etapas fundamentales: el desengrasado, el decapado y el fluxado.

Desengrasado

Mediante el desengrasado se eliminan las impurezas de tipo orgánico como aceites y grasas solubles y los lubricantes que se usan en los procesos de laminación y embutición profunda y también algunas clases de pintura. El desengrasado se puede efectuar mediante:

- Soluciones alcalinas en caliente. Se usan generalmente entre 80 y 90° C durante unos 20 minutos, siendo la más empelada la disolución de sosa cáustica al 50%.
- Soluciones alcalinas en frío. Se utilizan cuando las piezas están ligeramente engrasadas. Son disoluciones preparadas a base de fosfatos
- Desengrase al vapor. Utiliza vapor de tricloro-etileno, muy eficaz para aceites y grasas, aunque es necesaria una instalación muy costosa.
- Desengrase por inmersión en el baño de aluminio. Es un sistema eficaz sobre todo cuando las piezas tienen pinturas o grandes cantidades de grasa.
- Chorro de granalla. Se suele utilizar cuando las piezas de acero llevan pinturas, cascarillas de recocido, escorias de soldadura, arena, etc., y también para preparar piezas de fundición gris y de fundición maleable.

Decapado

Las impurezas de tipo inorgánico tales como la cascarilla de fabricación y el óxido de recocido, se eliminan mediante el decapado. Normalmente, para este fin se utilizan ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido fluorhídrico y también mezclas de ácidos.

El decapado tiene por objeto eliminar las cascarillas y el óxido, pero no atacar el acero subyacente, puesto que el decapado excesivo origina una superficie áspera y es causa de un recubrimiento poco satisfactorio. Por este motivo se usan inhibidores, los cuales impiden prácticamente el ataque del acero sin afectar la velocidad de eliminación del óxido.

Con el uso de inhibidores de decapado, la superficie del acero queda más lisa y produce un acabado mejor del aluminizado.

- Decapado con ácido clorhídrico. El ácido clorhídrico se utiliza diluido al 50% en volumen y a temperatura ambiente. Es importante que la temperatura del ácido no sea inferior a 15° C, puesto que la reactividad es menor y el ataque del ácido al metal es más lento.
- Decapado con ácido sulfúrico. Se utiliza con un contenido de ácido entre 10 y 14%, y a una temperatura de 60 a 80° C. El ácido sulfúrico es más económico que el clorhídrico, pero tiene el inconveniente de que se ha de calentar para lograr mayor rapidez de decapado y es mucho más peligroso para el operario.
- Decapado con ácido fluorhídrico. Puede utilizarse en sustitución del chorro de granalla en la limpieza de piezas de fundición, siendo la concentración empleada del 19%. Este ácido es muy peligroso al causar quemaduras si entra en contacto con la piel.
- Decapado con mezcla de ácidos. Se puede utilizar para decapar piezas de fundición. La mezcla suele ser de ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico y agua en proporciones de 6:4:40.

Fluxado

La preparación superficial se completa con el fluxado. Consiste en la inmersión de las piezas en un baño de sales. En general, el fluxante se emplea como agente de activación de la superficie del metal base pero en realidad es un reductor químicamente activo que neutraliza la oxidación del metal base cuando la pieza se introduce en el baño de metal fundido. Existen tres formas diferentes de llevar a cabo la operación de fluxado:

- Disolución acuosa. Los métodos basados en el uso de disoluciones acuosas de fluxado son las más simples y económicas. Una disolución acuosa se puede preparar, controlar y mantener fácilmente, se desprende rápidamente de las piezas y no forma productos indeseables. Para la preparación de los fluxados acuosos se utilizan cloruros y fluoruros alcalinos en distintas proporciones y también sales de titanio y circonio tales como el fluorocirconato de potasio (K_2ZrF_6) y el fluorotitanato de potasio anhidro (K_2TiF_6).

- Sales fundidas. Las sales fundidas se pueden utilizar de dos formas, como un baño de flujo independiente del baño de aluminio. Se utiliza el mismo tipo de sales fundidas que en la disolución acuosa a una temperatura entre 700-800°C. La ventaja de las sales fundidas es que se calientan la pieza a la misma temperatura que el baño de aluminio, por lo cual el aluminizado se realiza más rápidamente, al acelerarse la velocidad de reacción entre el aluminio y el hierro. El inconveniente de los baños de sales fundidas es su poca duración dada su gran volatilidad e inestabilidad.
- Atmosferas reductoras o inertes. Las atmosferas reductoras o inertes se utilizan sobre todo en los procesos en continuo ya que implica una simplificación del procedimiento y un aumento de la eficacia. Las atmosferas más empleadas son las de hidrógeno, argón y mezclas de hidrógeno y nitrógeno.

1.2.2 Técnica de inmersión

Después de sacar las piezas del baño de fluxado, se introducen en el baño de aluminio líquido. Durante el período de inmersión las piezas se suben y se bajan algunas veces, para eliminar el aire que haya podido quedar atrapado y para asegurarse de que el aluminio líquido entre en contacto con la totalidad de la superficie de la pieza.

Debido a la gran reactividad del hierro y el aluminio a temperaturas superiores a los 700°C, el crisol del baño no puede ser de acero o fundición, y se han de emplear crisoles de refractario o de grafito. Un problema más es la disolución del hierro del material que se ha de recubrir dentro del baño de aluminio. Este hierro se combina con el aluminio y forman las características matas o aluminio duro que corresponde en su mayor parte al intermetálico FeAl₃. Las matas tienden a adherirse a la superficie de las piezas en forma de granos o nódulos con lo cual estropean el recubrimiento de aluminio, por lo cual se han de retirar periódicamente, dichas matas, del baño de aluminio.

1.2.3 Procesos de post-aluminizado

Preparación para la deformación.

A pesar de que el aluminio utilizado en el recubrimiento es dúctil, la capa intermetálica formada durante el aluminizado por inmersión en caliente es dura y quebradiza. Por lo cual, cuando se les ha de dar a las piezas un conformado posterior al aluminizado, es necesario reducir los tiempos de inmersión, así como la temperatura del baño, y se deben utilizar elementos de aleación en el baño de aluminio. Esto reducirá el espesor y la dureza de la capa intermetálica, produciendo un recubrimiento más flexible. Aplicados correctamente, los recubrimientos de aluminio, resistirán una moderada deformación, maquinado y estirado, sin escamados o peladuras. El material recubierto se puede doblar hasta 180° sobre un diámetro igual a dos veces su espesor, sin perder la adherencia.

Acabados.

En aplicaciones en las que intervenga la exposición ambiental, el aluminizado obtiene resultados satisfactorios sin ninguna protección adicional. Sin embargo la resistencia a la corrosión, la apariencia y la duración pueden ser mejoradas mediante el empleo de tratamientos de acabado.

Acabados químicos

Un buen sistema de acabado relativamente económico para los recubrimientos de aluminio por inmersión en caliente, lo constituye la aplicación de cromatos amorfos y películas de fosfatos por técnicas de inmersión o metalización. Ofrecen una mayor resistencia a la corrosión, a la vez que una superficie más decorativa, pero no son particularmente resistentes a trabajos mecánicos. Los recubrimientos cromatados son característicamente de color dorado y dan una mayor resistencia a la corrosión en ambientes marinos, mientras que los fosfatados son típicamente de color verde oscuro.

Recubrimientos anódicos. Coloreado y sellado.

El Anodizado es un proceso electrolítico que sirve para engrosar y estabilizar las películas superficiales de óxido sobre el metal base. La película anódica es un buen soporte para la pintura y el coloreado, o para tratamientos posteriores.

El anodizado se emplea con frecuencia para el aluminio, pues el 5% del aluminio consumido se anodiza, además de otros metales.

1.2.4 Tratamientos mecánicos

Mediante los tratamientos mecánicos se puede mejorar la apariencia del recubrimiento de las piezas aluminizadas por inmersión en caliente, eliminando las rebabas, los restos de sales de fluxado y los granos de matas que hayan podido quedar adheridas a su superficie.

Generalmente el espesor del recubrimiento no es superior a las 250µm, por lo cual se habrán de dar tratamientos de acabado poco agresivos como:

- Chorreados abrasivos con partículas de vidrio las cuales producen una atractiva apariencia mate con la mínima eliminación de material.
- Maquinados ligeros en donde se ha de tener especial cuidado con las esquinas y los bordes de las piezas, puesto que es donde se arranca mayor cantidad de material.
- Ruedas de nylon de baja densidad impregnadas con un abrasivo, que proporciona acabados direccionales.
- Chorreados con arena y granallados con polvo de acero.

1.3 Zinalquizado

Con relación a la generación de recubrimientos con zinalco, no existe ningún antecedente, ya que esto no se ha realizado con anterioridad. Sin embargo en este trabajo, se pretende como innovación realizar el recubrimiento de acero con zinalco, ya que éste cuenta con un gran porcentaje de Zinc, del cual México es gran productor y se reporta esta aleación como un material con buena resistencia a la corrosión.

El recubrimiento de zinalco puede ser logrado por distintos procesos, sin embargo el método que se propone en esta investigación es el de inmersión en caliente, en el cual un material (metal base), se sumerge en el baño fundido de un segundo metal (metal de recubrimiento). Tras la extracción de la pieza, el metal fundido recubre al primero. Los recubrimientos obtenidos por inmersión del metal en el metal protector en estado líquido alcanzan espesores relativamente grandes, que van desde 50 hasta 500 micras, con excelente adherencia. La capa de recubrimiento que se genera está compuesta por dos zonas, la zona externa del recubrimiento constituida fundamentalmente por el metal de recubrimiento y la zona intermetálica que se origina por difusión del metal fundido dentro del metal a proteger y está formada por un compuesto de composición no estequiométrica metal protector-metal protegido.

El recubrimiento que se logre permitirá que el acero y el zinalco tengan mayor aceptación en el ámbito industrial, doméstico y comercial, con lo cual se logrará un beneficio importante en la utilización del zinc, un recurso natural que existe en México y del cual se cuenta con grandes excedentes, ya que de las 270,000 toneladas que se producen anualmente solo se utilizan 70,000 y el resto se venden a la mitad del precio con respecto del aluminio.

La técnica y los materiales empleados para lograr el recubrimiento se describirá en el capítulo 4.

CAPÍTULO 2

CONFORMABILIDAD

Las propiedades de los metales varían considerablemente de uno a otro dependiendo de los elementos aleantes presentes, del tratamiento térmico recibido, y del nivel de trabajo en frío. Al seleccionar un metal para una aplicación particular, se debe analizar la relación entre las propiedades de funcionalidad de la pieza o de la parte que se trate y las propiedades de conformabilidad de los materiales disponibles. Para un conformado óptimo, en la mayoría de las aplicaciones el material de trabajo debe tener las siguientes características: presentar una distribución uniforme de las deformaciones; alcanzar altos niveles de deformación, sin que se produzca adelgazamiento o fractura; soportar esfuerzos compresivos, sin arrugarse; soportar esfuerzos cortantes, sin fracturarse, y conservar la forma después de eliminar los esfuerzos y removerlo de la zona de conformado.

El éxito en los procesos de conformado implica que las propiedades que determinan la conformabilidad del material de trabajo se encuentren dentro de un rango bien definido. En general, la consistencia en los valores de tales propiedades es un factor importante para la producción de piezas que requieran una alta precisión dimensional.

A continuación, se tratarán los principales procesos de conformado, los cuales se clasifican como: volumétrico o plano, esto en función de las direcciones en las que se realiza la deformación plástica.

2.1 Procesos de conformado volumétrico

Los procesos de conformado volumétrico provocan un cambio significativo en las tres dimensiones de la pieza. Las formas iniciales más comunes son barras, tochos cilíndricos, tochos rectangulares y planchas. Los procesos de conformado volumétrico al modificar las formas originales generan, con frecuencia, diversas y muy variadas formas geométricas, y algunas veces mejoran las propiedades mecánicas.

El principio de operación o trabajo de esos procesos de deformación consiste en someter al metal a un esfuerzo suficiente para hacerlo que fluya plásticamente y tome la forma deseada. Los procesos se realizan en operaciones de trabajo en frío, o en caliente. El trabajo en frío es apropiado cuando el cambio de forma es menos severo y hay necesidad de mejorar las propiedades mecánicas o alcanzar un buen acabado en la parte final. El trabajo en caliente se emplea generalmente cuando implica altos porcentajes de deformación volumétrica en grandes piezas de trabajo.

Los procesos de deformación volumétrica considerados son: laminado, forjado, extrusión, y estirado de alambre y barras. A continuación se explicara su funcionamiento.

2.1.1 Laminado

El laminado es un proceso de deformación en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos que giran en sentidos opuestos. Los rodillos jalan el material mientras lo comprimen.

El proceso básico presentado en la figura 2.1 es el laminado plano, que se usa para reducir el espesor de una sección transversal rectangular al producir láminas y placas. La mayoría de los procesos de este tipo se realizan en caliente debido a la gran cantidad de deformación requerida, y se le llama laminado en caliente. Los metales laminados en caliente están, por lo general, libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. Este tipo de laminado dificulta mantener el producto dentro de tolerancias adecuadas, debido a los cambios de dimensión por las variaciones de temperatura. Por lo tanto, las últimas etapas de laminación se realizan en frío. De esta forma se obtienen mejores propiedades mecánicas y mayor precisión dimensional.

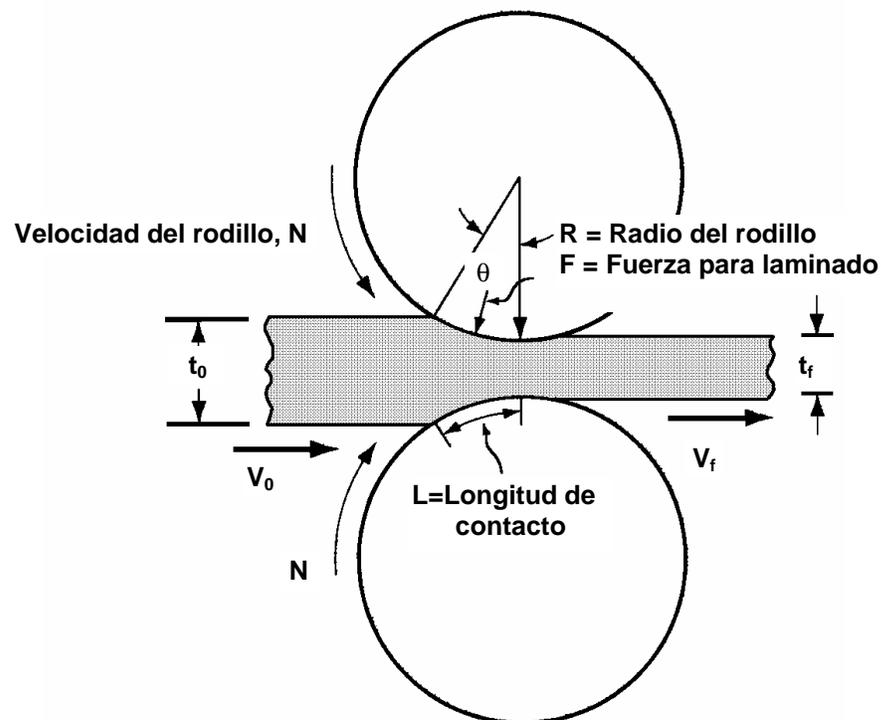


Figura 2.1. Vista lateral de laminado plano.

Para determinar la carga y potencia requeridas en el proceso, se considera la geometría de los rodillos y las fuerzas, obteniendo las siguientes expresiones:

$$F = \sigma_y w L$$

$$P = 2\pi N F L$$

donde "F" es la fuerza de laminado, " σ_y " es el esfuerzo de fluencia promedio, "w" es el ancho de la lámina, "P" es la potencia demandada, "N" la velocidad de rotación de los rodillos y "L" la longitud de contacto.

2.1.2 Forjado

El forjado es un proceso de deformación en el cual se comprime el material de trabajo entre dos dados usando impacto, o presión gradual, para formar la pieza.

Una manera de clasificar las operaciones de forja es mediante la temperatura de trabajo. La mayoría se realizan en caliente, por el grado de deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal. Sin embargo, el forjado en frío también se realiza en muchos productos. La ventaja de éste es la mayor resistencia del componente, como resultado del endurecimiento por deformación.

Otra clasificación de las operaciones de forjado se hace de acuerdo con la forma en que los dados permiten, o restringen, el flujo del metal de trabajo. Resultan tres tipos: forjado en dado abierto, forjado en dado impresor, y forjado sin rebaba (Figura 2.2).

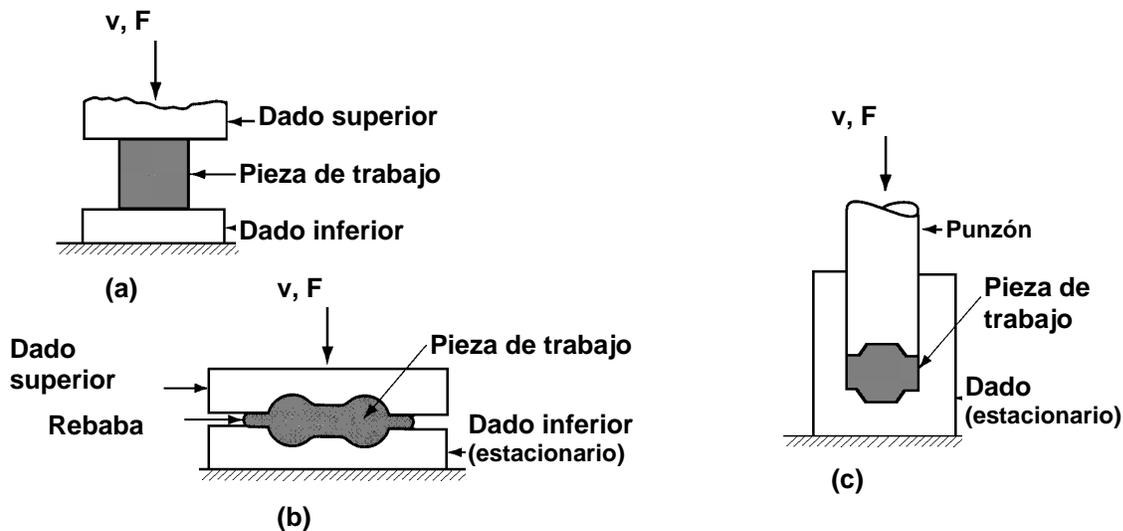


Figura 2.2. Tres tipos de operación de forja ilustrados por diagramas de sección transversal.

En el forjado en dado abierto, la pieza se comprime entre dos dados, permitiendo que el material fluya sin restricciones, longitudinalmente, respecto a las superficies de contacto.

En el forjado en dado impresor, o en dado cerrado, las superficies del dado contienen la forma que se imprime al material de trabajo durante la compresión, restringiendo significativamente el flujo del metal, pero formando una rebaba.

En el forjado sin rebaba, el dado restringe completamente al material de trabajo dentro de la cavidad. No se produce rebaba excedente. Por esto, es necesario controlar estrictamente el volumen de la pieza inicial para que sea igual al volumen de la cavidad del dado.

Para determinar la fuerza que se necesita para forjar una pieza se relacionan su geometría y las características del material, obteniendo la siguiente expresión:

$$F = K_f \sigma_y A$$

donde "F" es la fuerza requerida para forjar la pieza, " σ_y " es el esfuerzo de fluencia del material, "A" es el área transversal de la pieza (en el caso de forja en dado cerrado incluye el área de la rebaba) y "K_f" es el factor de forma del forjado, definido como:

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D}{h}$$

siendo " μ " el coeficiente de fricción, "D" el diámetro de la pieza de trabajo, o cualquier dimensión que represente la longitud de contacto con la superficie, y "h" la altura de la pieza.

2.1.3 Extrusión

La extrusión es un proceso de conformado por compresión en el que el metal de trabajo es forzado a fluir a través de la abertura de un dado, para darle forma a su sección transversal. Se puede extruir una gran variedad de formas, especialmente con la extrusión en caliente. Sin embargo, una limitación en la geometría es que la sección transversal no puede cambiar a lo largo de toda la pieza. La estructura del grano y las propiedades de resistencia se mejoran tanto en la extrusión en frío como en caliente. Cuando se usa extrusión en frío son posibles tolerancias más estrictas.

Las operaciones de extrusión, atendiendo a su configuración física, se clasifican en directa e indirecta.

En la extrusión directa, un tocho de metal se carga en un recipiente y un pistón comprime el material forzándolo a fluir a través de una o más aberturas practicadas en un dado colocado en el extremo opuesto del recipiente contenedor. Un problema presente en este tipo de extrusión es la gran fricción que se genera entre la superficie del material de trabajo y la pared del recipiente, al forzar el deslizamiento del tocho hacia la abertura del dado. Vencer esa fricción obliga a incrementar sustancial, y comparativamente, la fuerza aplicada en el pistón para la extrusión directa (Figura 2.3a).

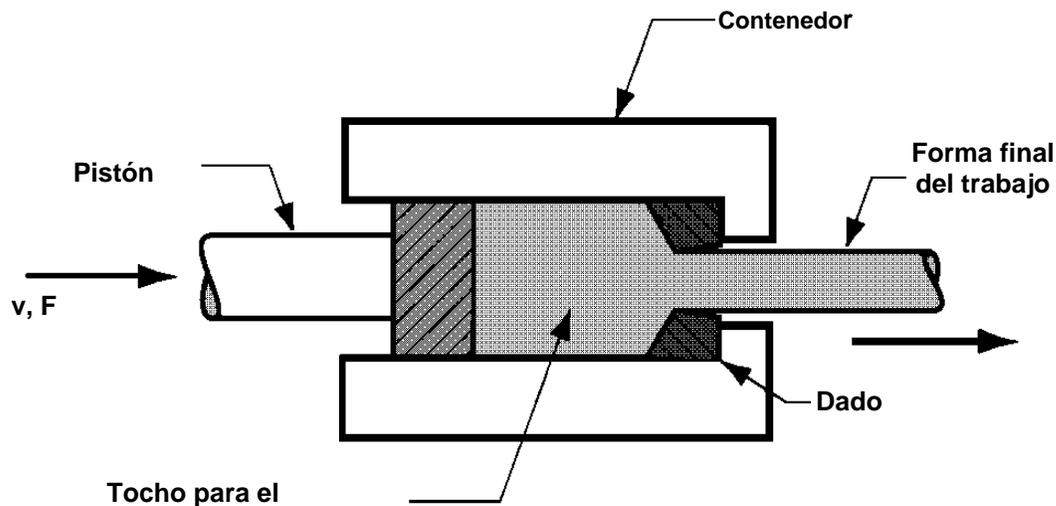


Figura 2.3a. Extrusión directa.

En cambio, en la extrusión indirecta el dado está montado sobre el pistón. Al penetrar el dado en el material de trabajo, lo fuerza a fluir a través del hueco, en dirección opuesta a la del movimiento del pistón. Como el tocho no se desliza contra las paredes del recipiente, no hay fricción adicional que vencer por lo que la fuerza que se debe aplicar al pistón es menor que cuando la extrusión es directa (Figura 2.3b).

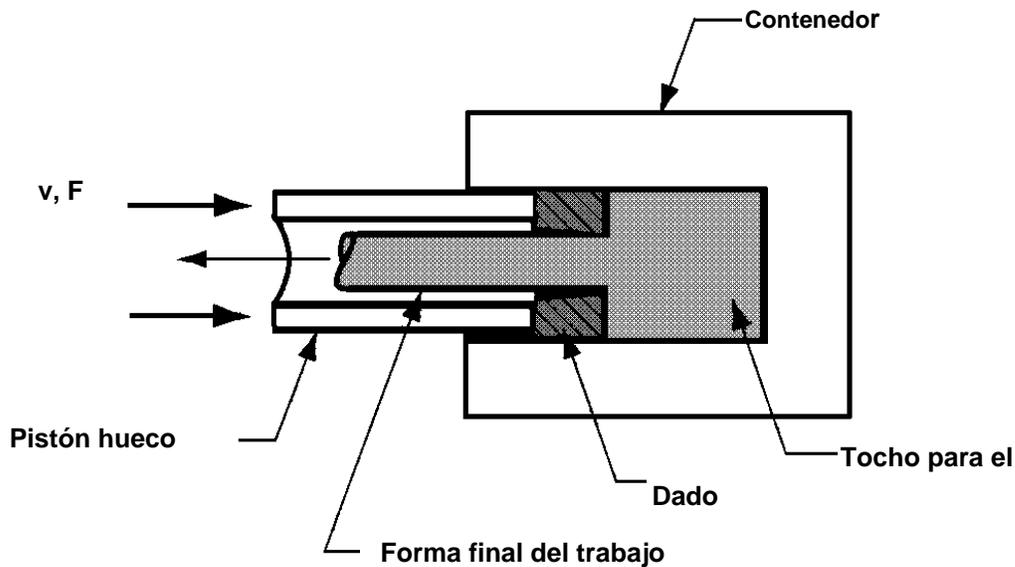


Figura 2.3b. Extrusión indirecta.

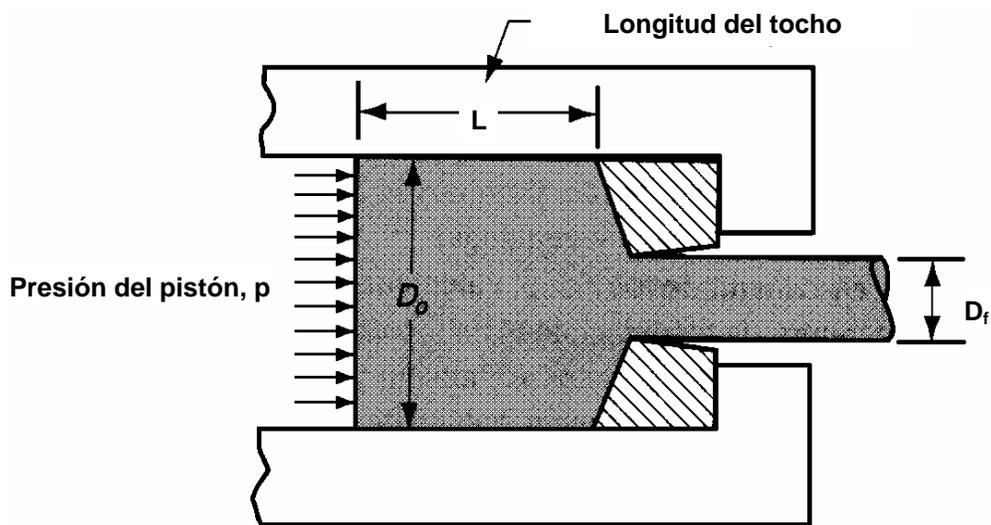


Figura 2.4. Presión y otras variables en la extrusión directa.

Para evaluar la presión de extrusión se relacionan los parámetros que se muestran en la figura 2.4, obteniendo la siguiente expresión:

$$p = \sigma_y \left(\epsilon_x + \frac{2L}{D_0} \right)$$

donde "p" es la presión de extrusión, " σ_y " es el esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación, " ϵ_x " es la deformación de extrusión y el término $2L/D_0$ representa la presión adicional debida a la fricción generada entre el contenedor y el tocho (que en la extrusión indirecta es cero).

La deformación de extrusión se define como:

$$\varepsilon_x = a + b \ln r_x$$

donde "a" y "b" son constantes empíricas para el ángulo del dado (los valores típicos son $a=0.8$ y $b=1.2$ a 1.5) y " r_x " es la relación de extrusión, definida como $r_x=A_0/A_f$ (" A_0 " es el área de la sección transversal del tocho inicial y " A_f " es el área de la sección transversal de la parte extruida).

La fuerza del pistón en la extrusión (directa o indirecta) es simplemente la presión (p) de la Ec. (3.5) multiplicada por el área inicial del tocho (A_0).

2.1.4 Estirado de alambre y barras

El estirado es una operación donde la sección transversal de una barra, varilla o alambre se reduce al tirar del material a través de la abertura de un dado, como se muestra en la figura 2.5. Las características generales del proceso son similares a la extrusión. La diferencia es que en el estirado el material de trabajo se jala a través del dado, mientras que en la extrusión se empuja a través de él. Aunque la presencia de esfuerzos de tracción es obvia en el estirado, la compresión también juega un papel importante ya que el material se comprime al pasar a través de la abertura del dado.

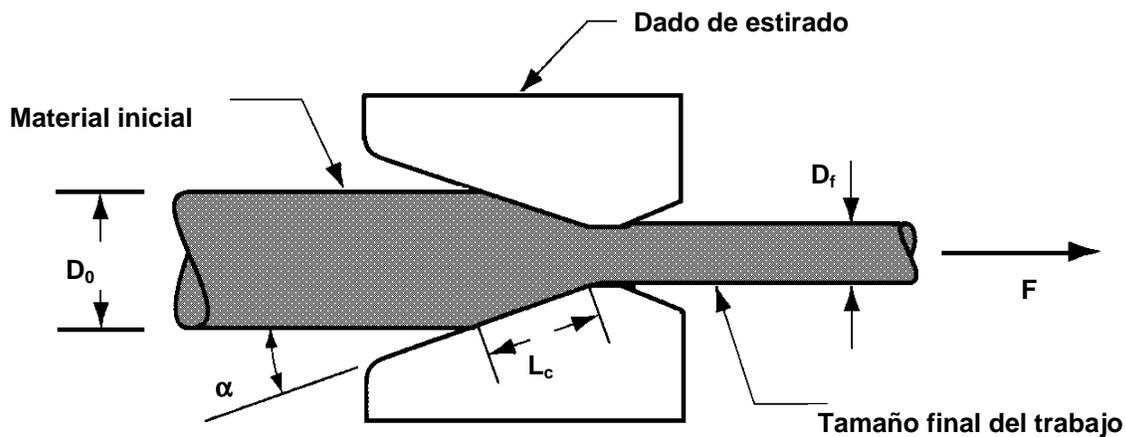


Figura 2.5. Estirado de barra, varilla o alambre.

La fuerza correspondiente de estirado equivale al área final de la sección transversal del material multiplicada por el esfuerzo de estirado:

$$F = A_f \sigma_e = A_f \sigma_y \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \phi \ln \frac{A_0}{A_f}$$

donde "A₀" y "A_f" son las áreas inicial y final de la sección transversal del material de trabajo, "σ_y" es el esfuerzo de fluencia promedio, "μ" es el coeficiente de fricción entre el dado y el material, "α" es el ángulo del dado, y "φ" es un factor que se utiliza para deformación no homogénea.

2.2 Procesos de conformado plano

Se les da el nombre de procesos de conformado plano a las operaciones de deformación realizadas sobre láminas o placas delgadas de metal, producidas por laminado.

El espesor del material se considera constante y puede ser tan pequeño como algunas milésimas de pulgada; pero la mayor parte de los espesores del metal están entre 0.4 mm (1/64 de pulgada) y 6.4 mm (1/4 de pulgada). Cuando el espesor excede 1/4 de pulgada se le llama placa en lugar de lámina.

La importancia comercial de los procesos de conformado plano es significativa. Existe un gran número de productos industriales y de consumo que incluyen partes de lámina metálica como carrocerías de automóviles y camiones, aeroplanos, carros de ferrocarril, equipo de construcción, etcétera. Las piezas fabricadas con lámina de metal se caracterizan, generalmente, por su alta resistencia, buena precisión dimensional, buen acabado superficial y bajo costo relativo.

Los procesos de conformado plano se pueden clasificar en: doblado, embutido y estirado. Se usan para transformar láminas de metal en partes de forma especial.

2.2.1 Doblado

El doblado se define como la deformación del metal alrededor de un eje neutro. Durante la operación de doblado, el material dentro del plano neutral se comprime mientras que el metal por fuera del plano neutral se estira (Figura 2.6). El metal se deforma plásticamente. Así, el doblado toma una forma permanente al remover las fuerzas que lo causaron. El doblado produce poco o ningún cambio en el espesor de la lámina metálica.

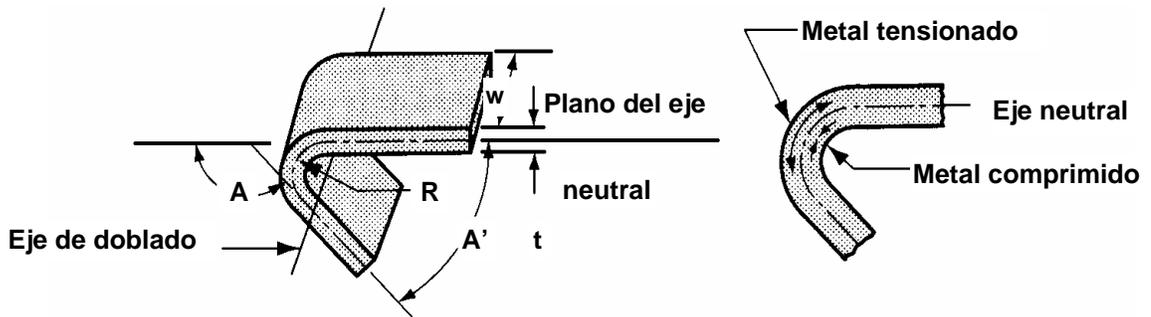


Figura 2.6. Doblado de lámina metálica.

Las operaciones de doblado se realizan usando como herramientas de trabajo diversos tipos de punzones y dados. Los dos métodos de doblado más comunes son el doblado en "V" y el doblado de bordes (Figura 2.7)

En el doblado en "V", la lámina de metal se dobla entre un punzón y un dado con dicha forma.

En el doblado de bordes se usa un momento flexionante sobre la lámina de metal colocada en cantiliver. Una placa de presión aplica la fuerza de sujeción " F_h " para sostener la base contra el dado, mientras el punzón fuerza a la parte volada para doblarla sobre el borde.

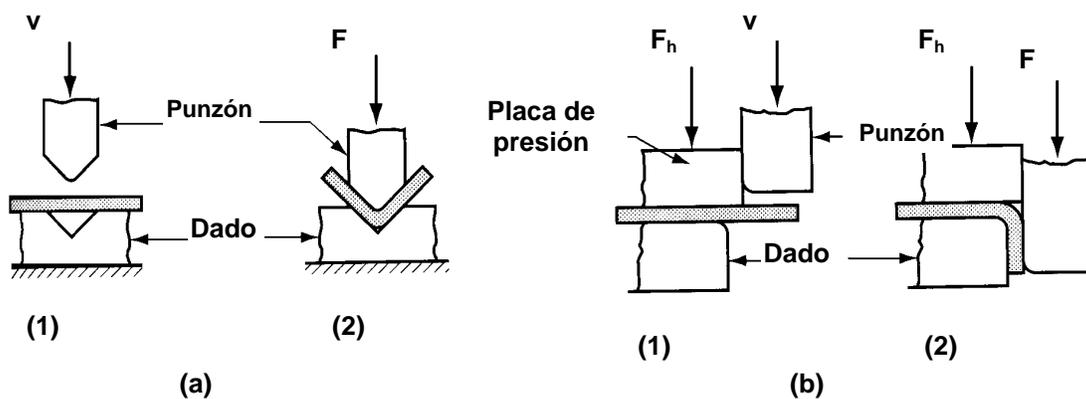


Figura 2.7. Métodos comunes de doblado: a) doblado en "V" y b) doblado de bordes.

En el doblado, el metal, de espesor "t", forma el llamado ángulo de doblado "A" (Figura 2.6). El resultado es una lámina con un ángulo incluido "A'", tal que $A + A' = 180^\circ$. El radio del doblado (R) se especifica, normalmente, sobre la parte interna y lo determina el radio de la herramienta que se usa para ejecutar la operación. El doblado se hace a lo ancho (w) de la pieza de trabajo.

Si el radio es pequeño comparado con el espesor del material, el metal tiende a estirarse durante el doblado. Es importante estimar la magnitud del estirado, de manera que la longitud de la parte final coincida con la dimensión especificada. El problema es determinar la longitud del eje neutro antes del doblado y tomar en cuenta el estirado de la sección doblada final, que se llama tolerancia de doblado y se puede estimar como sigue:

$$BA = 2\pi \frac{A}{360} (R + K_{ba} t)$$

donde "BA" es la tolerancia de doblado y "K_{ba}" es un factor para estimar el estirado.

Cuando la presión de doblado se retira al terminar la operación de deformación, la energía elástica permanece en la parte doblada haciendo que recobre parcialmente su forma original. Esta recuperación elástica se define como el incremento del ángulo comprendido por la parte doblada en relación con el ángulo de la herramienta formadora, después de que ésta se retira:

$$SB = \frac{A' - A_b'}{A_b'}$$

donde "SB" es la recuperación elástica y "A_b'" es el ángulo de la herramienta de doblado.

La fuerza que se requiere para realizar el doblado depende de la geometría del punzón y del dado, así como de la resistencia, espesor y ancho de la lámina de metal que se dobla. La fuerza de doblado, máxima necesaria, se puede estimar por medio de la siguiente ecuación, basada en el doblado de una viga simple:

$$F = \frac{K_{bf} \sigma_{m\acute{a}x} w t^2}{D}$$

donde "F" es la fuerza de doblado, "σ_{máx}" es la resistencia a la tracción del metal en lámina, "D" es la dimensión del dado abierto y "K_{bf}" es una constante

que considera las diferencias encontradas en un proceso real de doblado. Para doblado en "V", $K_{bf} = 1.33$ y para doblado de bordes, $K_{bf} = 0.33$.

2.2.2 Embutido

El embutido se utiliza para hacer piezas con forma de recipiente, de caja y otras formas huecas más complejas. Se realiza colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un dado y empujando el metal hacia dentro con un punzón (Figura 2.8). La forma inicial debe oprimirse contra el dado mediante un sujetador.

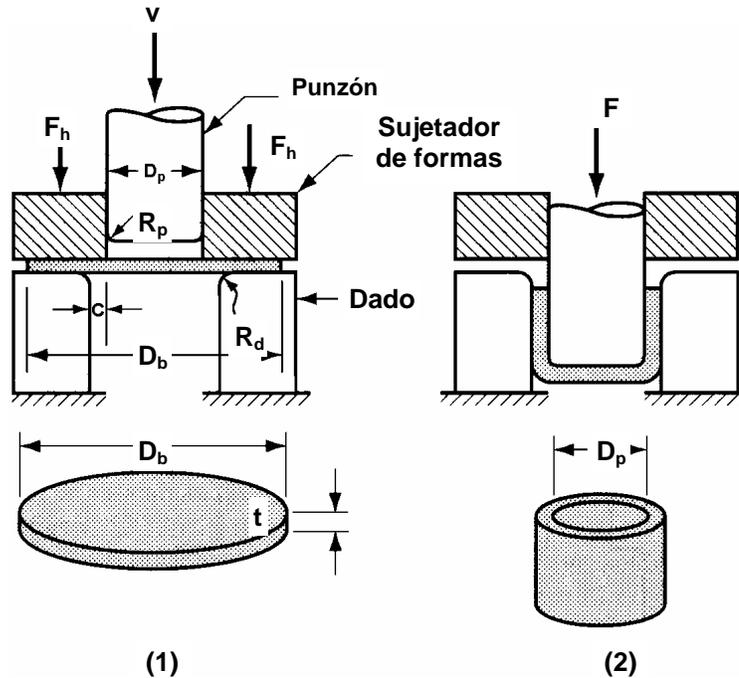


Figura 2.8. Embutido de una parte en forma de recipiente. Se muestra la forma inicial y la parte ya embutida.

En la figura 2.8 se señalan las dimensiones y los parámetros de la operación y la mecánica de ejecución del embutido de un disco de lámina dentro de un dado. El punzón y el dado deben tener redondeados los bordes (radios " R_p " y " R_d "). Las superficies del punzón y el dado están separados por el claro " c ", aproximadamente 10% mayor que el espesor del material por embutir.

El punzón aplica una fuerza (F) para deformar el metal y el sujetador de partes la fuerza de sujeción (F_h).

Conforme el punzón se mueve hasta su posición final, la pieza de trabajo experimenta una serie compleja de esfuerzos y deformaciones al tomar, gradualmente, la forma definida por el punzón y la cavidad del dado. Cuando el punzón empuja al material lo sujeta a una operación de doblado. El perímetro exterior del disco se mueve ligeramente hacia el centro en esta primera etapa.

A medida que el punzón avanza, ocurre una acción de enderezado del metal previamente doblado sobre el radio del dado. Esto es que el metal del fondo y el curvado contra el borde del punzón se han movido hacia abajo, junto con el punzón, pero el material que se había doblado sobre el borde del dado debe enderezarse para que pueda ser jalado dentro del claro y forme la pared del cilindro. Durante esta etapa del proceso, la fricción y la compresión juegan papeles importantes en la zona de sujeción de la parte. Para que el material en esta zona se mueva hacia el interior del dado, debe superar la fricción que se genera entre la lámina de metal y las superficies del sujetador y del dado.

La fuerza requerida para realizar una operación de embutido se puede estimar con la siguiente expresión:

$$F = \pi D_p t \sigma_{\text{máx}} \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right)$$

donde "F" es la fuerza (máxima) de embutido, "t" el espesor original de la lámina, " $\sigma_{\text{máx}}$ " la resistencia a la tracción y la constante 0.7 es un factor de corrección por fricción.

La fuerza de sujeción se puede calcular con la siguiente expresión:

$$F_h = 0.15 \sigma_y \pi \left[D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \right]$$

donde " F_h " es la fuerza de sujeción, " σ_y " es el esfuerzo de fluencia de la lámina, "t" es el espesor inicial del material y " R_d " es el radio del borde del dado.

2.2.3 Estirado de lámina

El estirado es un proceso de deformación en el cual la lámina metálica se dobla simultáneamente para lograr un cambio de forma (Figura 2.9). El material se sujeta mediante una o más mordazas, en cada extremo, y se estira y dobla sobre un dado positivo que tiene la forma deseada. El metal es sometido a esfuerzos de tracción superiores a su punto de fluencia.

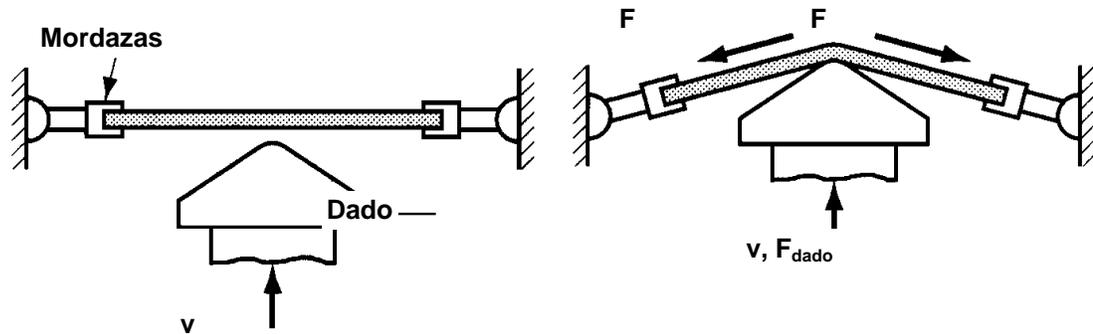


Figura 2.9. Estirado de lámina.

Una estimación de la fuerza requerida en este tipo de conformado se puede obtener multiplicando el área de la sección de lámina, perpendicular a la dirección de la tensión, por el esfuerzo de fluencia del metal:

$$F = Lt\sigma_y$$

donde "F" es la fuerza necesaria; "L" la longitud de la lámina, en dirección perpendicular al estiramiento; "t" el espesor del material, y " σ_y " su esfuerzo de fluencia.

2.3 Ensayos de conformabilidad de productos planos

Para saber si un material es capaz de adquirir la geometría deseada, mediante alguno de los procesos descritos, debe ser evaluado por medio de ensayos de conformabilidad.

Hay dos tipos de ensayos de conformabilidad: los intrínsecos y los de simulación. Los intrínsecos miden propiedades características de los materiales, que pueden ser relacionadas con su conformabilidad; entre éstos se encuentran el de tracción y el de dureza. Los ensayos de simulación someten al material a una deformación muy parecida a la que ocurre en una operación particular de conformado; son los de doblado, estirado y embutido.

2.3.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es el más usado de los ensayos intrínsecos de conformabilidad para lámina. La probeta se sujeta por sus extremos y se estira de forma uniaxial, a velocidad constante, hasta su fractura, con una máquina de tracción, como se describe en la norma ASTM E8. La carga aplicada y la elongación son medidas por medio de una celda de carga y un extensómetro. Estos datos, usualmente, se convierten en esfuerzo y deformación ingenieril, o en esfuerzo y deformación real.

La tracción permite determinar el factor de anisotropía (r), y la sensibilidad a la rapidez de deformación (m).

El factor de anisotropía se define como el cociente entre la deformación real del ancho y la deformación real del espesor, en un ensayo de tracción. El factor varía con la elongación a la cual se mide (usualmente se mide al 10, 15, o 20% de ésta). El valor "r" se calcula de la siguiente forma:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)}$$

donde "w" y "w₀" son el ancho final y el inicial, y "t" y "t₀" son el espesor final y el inicial, respectivamente, de la probeta. La dirección del laminado suele afectar los valores de "r", según la dirección en que se tome la probeta (generalmente los materiales no son isotrópicos). Por esto, se ensayan probetas tomadas en la misma dirección de laminado, a 45 grados y en dirección perpendicular. Así, se definen la anisotropía normal (r_m) y la anisotropía plana (Δr):

$$r_m = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4}$$

$$\Delta r = \frac{(r_0 - 2r_{45} + r_{90})}{2}$$

La sensibilidad a la rapidez de deformación se puede determinar haciendo varios ensayos de tracción a diferentes velocidades o en un solo ensayo en el que la deformación se alterne entre dos valores. La sensibilidad (m) puede ser calculada para varios niveles de deformación porcentual en la región de elongación uniforme:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)}{\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_2}\right)}$$

es decir, "m" resulta de medir los cambios en el esfuerzo de flujo debido a las variaciones de la velocidad de deformación.

2.3.2 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza consiste en medir la resistencia que opone un material a la penetración de un indentador. Ha sido muy utilizado para la medición de la conformabilidad. Generalmente, ésta decrece con el incremento de la dureza; aunque no se han podido correlacionar estas propiedades.

El ensayo de dureza se utiliza frecuentemente en el control de calidad para asegurar que el material tenga la resistencia requerida. El más utilizado es el Rockwell, que describe con detalle la norma ASTM E18.

2.3.3 Ensayos de doblado

Relacionados con la conformabilidad de láminas existen dos tipos: el de doblado simple y el de doblado con estiramiento.

El ensayo de doblado simple es muy útil para predecir cómo se comportará la lámina cuando se trata de un doblado sin tracción. Se puede realizar de varias maneras como se describe en la norma ASTM E290. La más común se muestra en la figura 2.10(a). La probeta se dobla manualmente o por medio de un mazo no metálico, hasta un ángulo de 180° . Si no se fractura, la prueba se repite utilizando un dado de radio menor. Los ensayos pueden realizarse tomando probetas en diferentes direcciones con respecto a la de laminación.

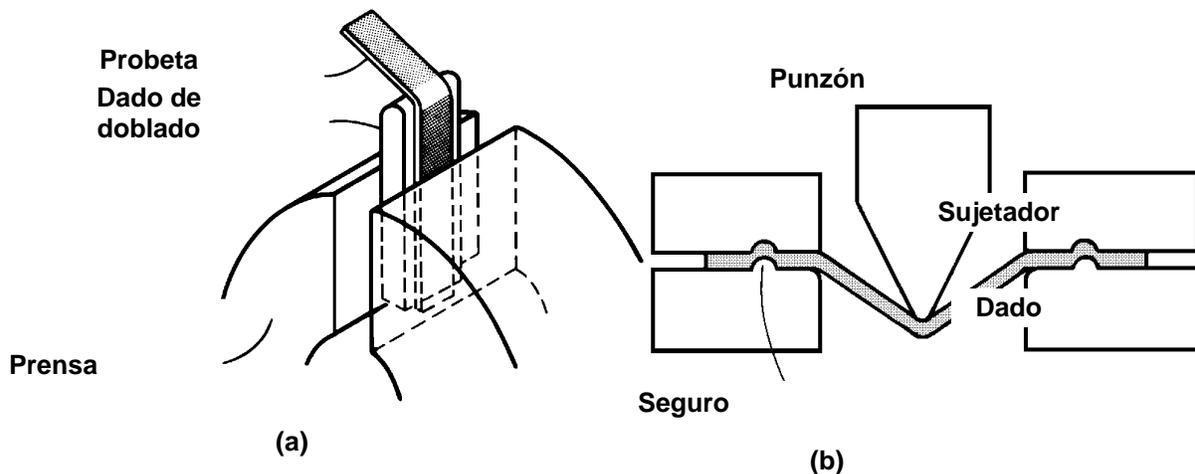


Figura 2.10. Herramental para ensayos de doblado.

El ensayo de doblado con estiramiento consiste en sujetar, por sus extremos, una probeta rectangular y deformarla con un punzón centrado. Figura 2.10(b). Se pueden utilizar dos tipos de punzones: el semiesférico y el angular. El

primero involucra un rango de estados de deformación, mientras que el segundo sólo produce un estado plano. En este ensayo se mide la distancia que se desplaza el punzón desde el primer contacto con la probeta hasta que ésta se fractura en la región de contacto con el punzón.

2.3.4 Ensayos de estirado

Implican estirar una probeta, formando una copa hasta que en ésta comienza a presentarse un adelgazamiento o cuello. Existen dos ensayos muy utilizados, el Olsen y el Erichsen, en los que la probeta es estirada por medio de un punzón de bola. En ambos, la profundidad de la copa, correspondiente a la carga máxima soportada, se toma como medida de conformabilidad. Los ensayos Olsen y Erichsen son muy similares; sólo varían las dimensiones del herramental (Figura 2.11). Estos ensayos son descritos por la norma ASTM E643.

Para comprender el comportamiento de los metales durante su deformación, se emplea la curva esfuerzo- deformación, la cual típicamente se divide en una región elástica y una región plástica. La zona elástica se presenta por debajo del llamado punto de fluencia, mientras que la zona plástica esta por encima de dicho punto. El comportamiento del metal deformándose puede expresarse por la siguiente curva:

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

Donde:

K=coeficiente de resistencia (Mpa);

n=es el coeficiente de endurecimiento por deformación.

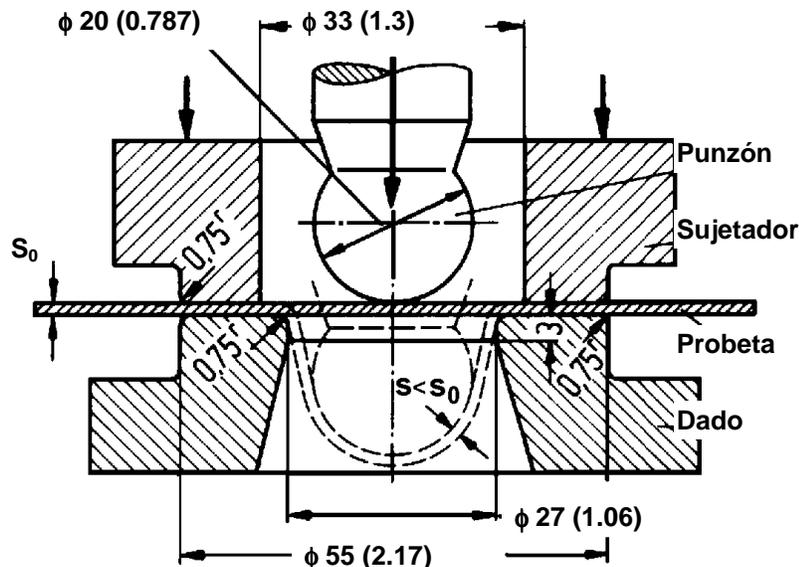


Figura 2.11. Herramental para ensayo Olsen y Erichsen. El diámetro del punzón Olsen es de 22.22mm. (Dimensiones en milímetros y, entre paréntesis, en pulgadas.)

Los ensayos Olsen y Erichsen como indicadores de la capacidad de estirado se deberían poder correlacionar satisfactoriamente con el valor "n"; pero no es así. Esta deficiencia se atribuye al pequeño tamaño del punzón y a las posibles variaciones en la lubricación. Para no agudizarla, las condiciones de prueba deben ser controladas cuidadosamente.

En el ensayo con punzón semiesférico (Figura 2.12), se obtienen resultados más reproducibles que con los ensayos de punzón de bola, así como mejores correlaciones entre la profundidad de la copa y el valor "n".

Para aceros de bajo contenido de carbono, la conformabilidad aumenta linealmente con el valor "n".

2.3.5 Ensayos de embutido

El ensayo más común para embutido profundo es el Swift (Figura 2.13). Se prueban piezas circulares, de diferentes diámetros, embutiéndolas, en forma de copa, por medio de un punzón cilíndrico, hasta encontrar el máximo diámetro embutible.

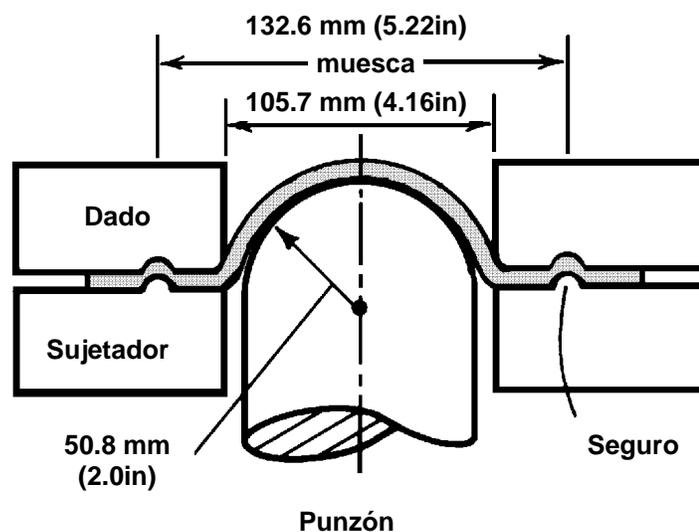


Figura 2.12. Herramental para ensayo de estirado con punzón semiesférico.

La capacidad de embutido se expresa como la relación de embutido límite (LDR) o por el porcentaje de reducción:

$$\text{LDR} = \frac{D}{d}$$

$$\text{red}(\%) = \frac{100(D - d)}{D}$$

donde "D" es el diámetro (máximo embutible) de la pieza inicial y "d" es el diámetro del punzón.

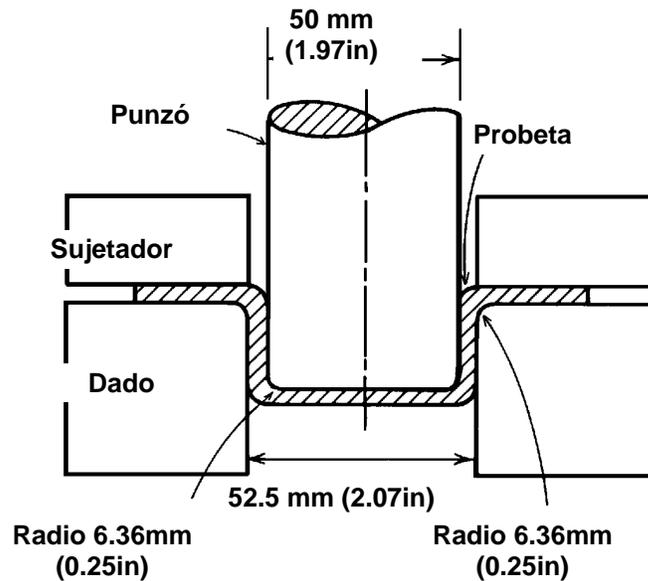


Figura 2.13. Herramental para ensayo Swift.

Otro ensayo de embutibilidad, en el que también interviene estiramiento, es el Fukui. En éste, probetas circulares son deformadas, en forma de copas cónicas, por medio del herramental que se ilustra en la figura 2.14. Se mide el diámetro de la base de la copa cónica y se divide entre el diámetro original de la probeta para obtener el valor Fukui. El punto final del ensayo no es crítico, porque el diámetro del cono no cambia después de la fractura.

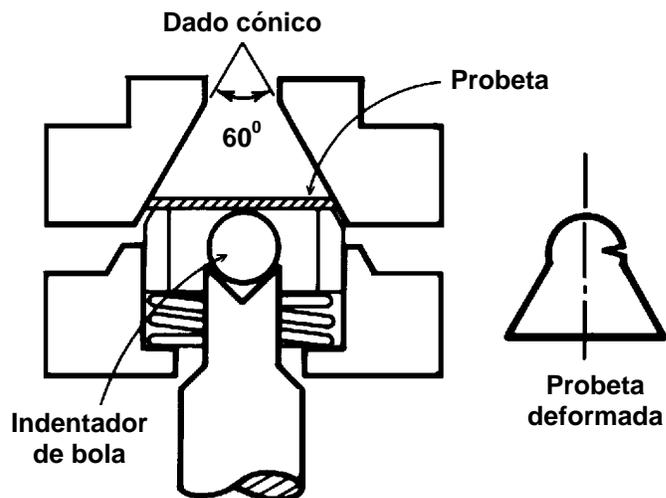


Figura 2.14. Herramental para ensayo Fukui.

Se han encontrado buenas correlaciones entre el valor Fukui y el producto del valor promedio de "n" y "r", para aceros de bajo contenido de carbono.

Existen otros ensayos de conformabilidad; pero los más importantes son los antes mencionados.

Al no ser posible simular toda la complejidad de los procesos industriales, se pueden complementar los resultados de los ensayos descritos obteniendo el diagrama de conformabilidad límite.

CAPÍTULO 3

PROBLEMAS DEL CONFORMADO DE LÁMINA Y DIAGRAMA LÍMITE.

La lámina es una materia prima muy utilizada en la industria, ya que al conformarla permite obtener una gran variedad de formas además de que ofrece muchas posibilidades para dar cuerpo y estructura a distintas aplicaciones, por ejemplo, se emplea en carrocerías de automóviles, equipos electrodomésticos, muebles metálicos, diversos tipos de envases, entre otras.

El proceso de conformado puede ser tan simple como una operación de doblado, o requerir varias operaciones complejas combinaciones o secuencias de las básicas (doblado, estirado, embutido). Esto es lo que frecuentemente sucede al fabricar una parte, y complica el análisis y modelado del proceso.

3.1 Problemas del conformado de lámina

Los problemas más comunes en el conformado de lámina son la formación de fracturas, ondulaciones y pliegues, la distorsión de la forma, la pérdida de metal y la formación de texturas superficiales indeseables.

3.1.1 Fracturas

La fractura ocurre cuando la lámina de trabajo se somete a fuerzas de estirado o cortantes que exceden el límite de falla del material para un cierto historial, estado, velocidad y temperatura de deformación.

Al estirarse una lámina, ocurre un adelgazamiento uniforme. Eventualmente, se llega a un punto en donde la deformación se concentra y causa un adelgazamiento localizado, conocido como cuello, donde finalmente se fractura. La formación del cuello generalmente se considera como falla, ya que produce un defecto visible y un debilitamiento estructural.

Si se somete una lámina a fuerzas cortantes, la fractura puede darse sin un adelgazamiento previo. En este tipo de operaciones se aplican a la lámina fuerzas normales a su plano. En el estampado, las fallas por cortante se producen por fuerzas aplicadas en el plano de la lámina, pero no son tan comunes como las fallas por estirado.

3.1.2 Ondulaciones y pliegues

En una operación típica de estampado, el punzón estira la lámina de trabajo y la empieza a desplazar bajo el sujetador. Los bordes de la lámina son jalados hacia regiones de perímetros progresivamente menores. Esto produce esfuerzos de compresión perpendiculares a la dirección del estiramiento. Si estos esfuerzos superan

niveles críticos, según el material y su espesor, causarán pequeñas ondulaciones que pueden generar pliegues pronunciados si la presión del sujetador no es suficiente.

3.1.3 Distorsión de la forma

En las operaciones de conformado, las fuerzas externas que se aplican a la lámina la deforman elástica y plásticamente. Al removerlas, los esfuerzos elásticos tienden a cero. En algunas zonas éstos se pueden relajar completamente, provocando un pequeño cambio en las dimensiones de la parte. Sin embargo, en áreas sujetas a doblado, se dan gradientes de esfuerzo elástico a lo largo del espesor. Los esfuerzos de la superficie externa son diferentes a los esfuerzos en la superficie interna de la lámina.

Si los esfuerzos residuales resultantes no son bien soportados por la geometría de la parte, al darse la recuperación elástica se puede distorsionar la forma. La recuperación elástica debe ser compensada tomando en cuenta las propiedades del material al diseñar el dado, pero el problema puede persistir si tales propiedades varían más allá de las tolerancias de diseño.

3.1.4 Pérdida de metal

La pérdida de metal ocurre en regiones sin deformar y es indeseable. En el estampado, en zonas donde el doblado es muy pronunciado el metal tiende a fluir dentro de la cavidad y provocar, en el material remanente, la pérdida de metal. Este problema se puede minimizar aumentando la presión del sujetador.

3.1.5 Texturas superficiales indeseables

La deformación severa de lámina metálica, en especial si es de grano grueso, tiende a producir una textura superficial rugosa conocida como "cáscara de naranja". Esto es inaceptable en partes que serán visibles.

Otro problema de textura superficial se da en metales que tienen un pronunciado punto de fluencia; es decir, que se estiran un alto porcentaje sin incremento de la carga. En estos metales la deformación, a bajos niveles, se concentra en estrías irregulares conocidas como líneas o bandas de Lüders. Estos defectos desaparecen al aplicar mayores niveles de deformación.

3.2 Método y técnicas del diagrama de conformabilidad límite

Para el diseño y fabricación de partes estampadas se requiere fabricar los dados y especificar las propiedades del material. Comúnmente, el fabricante del dado se basa en sus experiencias y conocimientos para definir el diseño inicial y las especificaciones. Posteriormente se construye un prototipo que es modificado por ensayo y error. Este proceso resulta caro y tardado.

Debido a que en la industria se debe de cumplir con los tiempos preestablecidos para cada proyecto, se han buscado nuevas técnicas que

permitan disminuir los tiempos y costos del desarrollo de los nuevos procesos y, además, predecir si el estampado se podrá realizar satisfactoriamente.

Un intento de solución a ese problema fue dividir un proceso complejo de estampado en varios subprocesos y estudiarlos independientemente para comprender mejor su conjunción y la superposición de sus efectos.

Una aproximación empírica para resolver los problemas de conformabilidad ha sido correlacionar la eficiencia del prensado con las propiedades del material. Las propiedades que comúnmente se evalúan para este propósito son el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tracción y la dureza Rockwell. La influencia de cada propiedad y su correlación con la eficiencia, varían de un proceso de estampado a otro. Para obtener esta correlación se necesita recabar datos del proceso de estampado durante un largo periodo; pero, generalmente, su utilidad para la fabricación del dado es poca.

Problemas similares subsisten al correlacionar la eficiencia con los resultados de ensayos de simulación (Erichsen, Olsen, Fukui, Swift, etcétera) que son esencialmente de estirado o de embutido y, así, no reproducen el proceso más complejo propio de un estampado particular.

Se ha encontrado una buena correlación de la eficiencia del prensado con la anisotropía plástica (r) para operaciones de embutido, y con el coeficiente de endurecimiento por deformación (n) para operaciones de estirado. Ya que el estampado combina operaciones de embutido y estirado, tiene una alta correlación con " n " y " r ". Pero, la eficiencia del prensado es muy sensible a factores ajenos a las propiedades del material, como son: lubricación, espesor y alineación de los dados, entre otros.

Otro intento para establecer un método rápido para determinar las especificaciones del material, realizando pocas pruebas, ha sido grabar cuadrados de una pulgada de lado en el material de trabajo, estamparlo y usando la deformación máxima, medida en los cuadrados, definir los requerimientos de la lámina.

La técnica se modificó. Se utilizan, ahora, mallados circulares, con círculos de 2.5 a 5.0 mm de diámetro, para obtener más información en menos tiempo y poder analizar con mayor precisión la distribución de la deformación.

Tales mallados son patrones circulares (conformados por círculos, o por círculos y cuadrículas) semejando mallas o parrillas. Grabados en la lámina metálica, se puede visualizar la deformación causada en la probeta por un ensayo determinado, y simplificar la resolución de problemas de conformado.

3.2.1 Técnica del mallado circular

Se basa en analizar un mallado circular grabado en el material de trabajo. El patrón se compone de pequeños círculos cuyos diámetros varían desde 6.4 mm hasta 1.3 mm. El diámetro del círculo se selecciona dependiendo del gradiente de deformación. Para áreas planas es suficiente utilizar círculos de 6.4 mm de diámetro; para áreas dobladas con radios pequeños y curvaturas pronunciadas círculos de 2.5 mm, y para áreas con radios muy pequeños y curvaturas muy pronunciadas círculos de 1.3 mm, con objeto de poder medir satisfactoriamente los valores máximos de deformación.

La ventaja del mallado circular es que no tiene una orientación preferencial. La dirección de la deformación máxima o principal se puede observar claramente en la elipse que resulta al deformarse el círculo. Las magnitudes de las deformaciones principales se pueden obtener midiendo los ejes mayor y menor de la elipse. Para hacerlo, se utiliza comúnmente una regla de acetato flexible, como la mostrada en la figura 3.1, diseñada para leer directamente el porcentaje de deformación. La medición puede estar auxiliada por algún dispositivo de amplificación óptica.

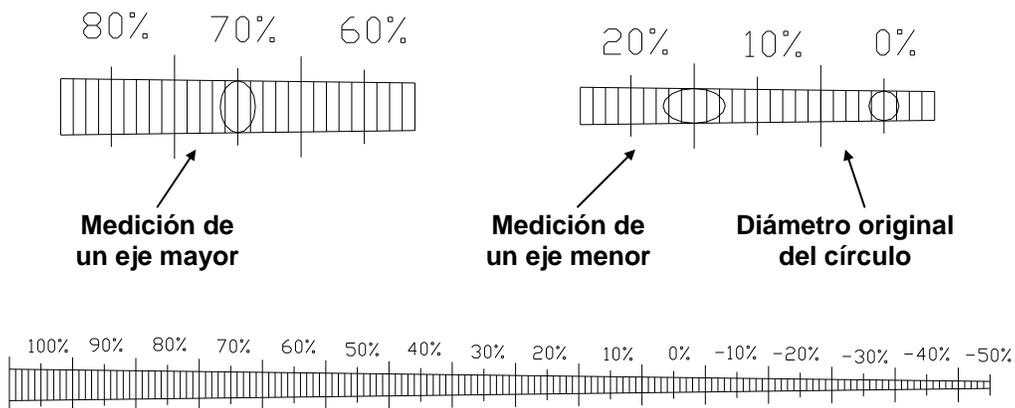


Figura 3.1. Regla flexible para medición del porcentaje de deformación.

Existen cuatro patrones comunes de mallado circular (Figura 3.2). El patrón "a" se compone de una cuadrícula auxiliar y círculos separados (esto ayuda a la visualización de la dirección y magnitud de la deformación principal). El patrón "b" se forma por la cuadrícula y círculos unidos tangencialmente (cada uno unido a 4 más). Los patrones "c" y "d" los conforman círculos traslapados; en el primer caso el traslape es sencillo, en el segundo es doble. Con los dos últimos mallados se reducen los espacios de lámina sin marcar.

Para realizar el grabado de la malla se han desarrollado varios procedimientos. Lo más común es utilizar tinta para hacer el grabado, aunque

se corre el riesgo de que se borre fácilmente. Otro procedimiento que se ha utilizado es el fotográfico, en donde una emulsión fotosensible puesta sobre la lámina es expuesta junto con un negativo a una fuente de luz. Este procedimiento permite hacer una malla más fina, de hasta cien líneas por pulgada, sin embargo, se deteriora fácilmente y el tiempo para realizarla es de más de treinta minutos.

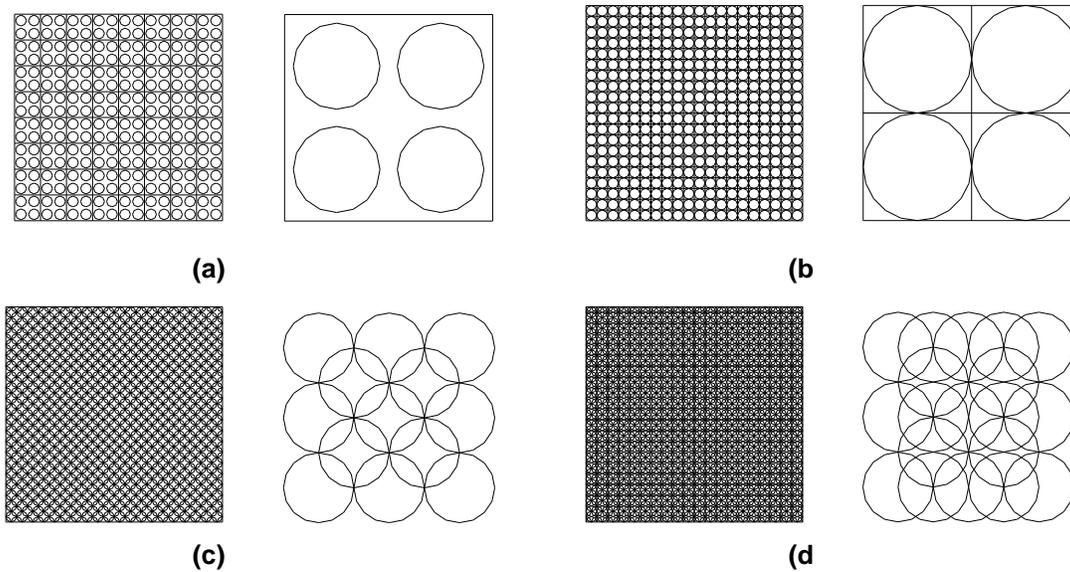


Figura 3.2. Patrones de mallado circular (a la derecha de cada uno se muestra una ampliación del patrón).

El procedimiento más utilizado produce el grabado electroquímicamente. Un stencil, previamente elaborado con el patrón que se desea grabar, se coloca sobre el material de trabajo. Después, un paño empapado en electrolito se pone encima del stencil y se forma un circuito colocando el electrodo positivo sobre el paño y el negativo conectado a la lámina. Para realizar la marca, se hace pasar una corriente aproximada de 200 Amperes, mediante una fuente de poder de 14 Volts (corriente alterna), durante 10 segundos (Figura 3.3).

La profundidad del grabado electroquímico es proporcional al tiempo de aplicación del voltaje. El mallado es permanente y continuará visible aun si se somete a abrasión. Dos de las ventajas de este procedimiento son que las marcas no provocan concentración de esfuerzos y que el equipo que se requiere para realizarlas es portátil (permite hacer el mallado rápidamente y, si es necesario, en la línea de producción).

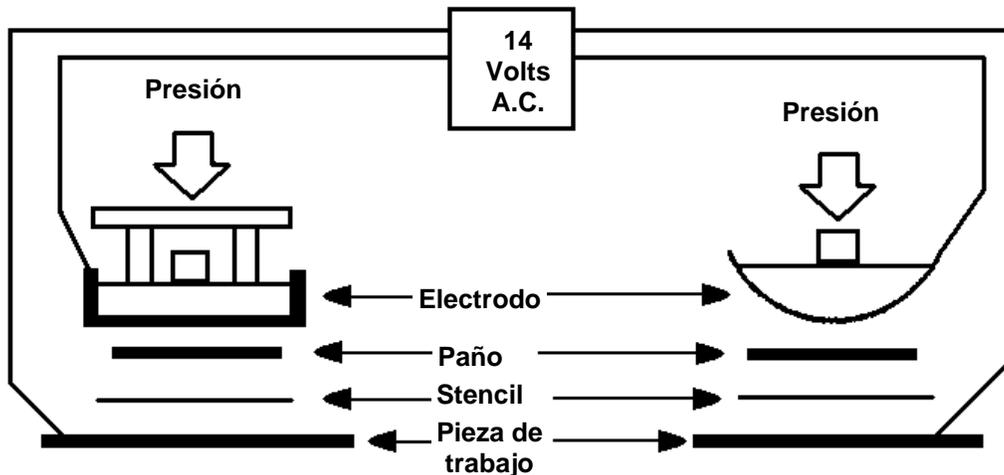


Figura 3.3. Sistema para grabado electroquímico.

3.2.2 Diagrama de conformabilidad límite

El estado de la deformación local en una lámina frecuentemente se representa graficando la deformación mayor " e_1 ", en el eje vertical, y la deformación menor " e_2 ", que puede ser negativa o positiva, en el eje horizontal. Por ejemplo, la figura 3.4 muestra cinco estados diferentes de deformación, en los que la deformación mayor es de 40% y la deformación menor se encuentra entre -40% y 40%. Las elipses fueron originalmente círculos (dibujados con línea discontinua) cuando la lámina aún no se deformaba.

A la derecha del eje vertical, en la figura 3.4, los círculos se transformaron en elipses que son más grandes en todas direcciones que el círculo original. Esta es la región de estiramiento biaxial. En la línea a 45 grados, los círculos aumentaron de tamaño sin cambiar su forma, por lo que a esta línea se le llama de estiramiento biaxial balanceado, y limita el área de la gráfica en la que pueden graficarse los estados de deformación.

A la izquierda del eje vertical, los círculos se transformaron en elipses, alargadas en una dirección y más cortas en la perpendicular. Esta es la región de embutido (y, también, la del estado de deformaciones que se desarrolla en un ensayo de tracción). En el eje vertical, las elipses son más largas en una dirección y en la perpendicular no cambian de dimensión; es la zona de deformación plana.

Realizando ensayos de simulación, como el Erichsen, se obtienen y seleccionan pares de valores e_1 y e_2 (deformación mayor y menor), distinguiendo si corresponden a zonas de formación de cuello, de fractura, o aceptables. Estos datos, graficados, dan como resultado el diagrama de conformabilidad límite (DCL). Éste permite conocer y precisar la deformación máxima que puede soportar una lámina de metal. Se ha encontrado una buena

correlación entre los diagramas obtenidos en el laboratorio y el comportamiento de la lámina al utilizarla en la producción industrial.

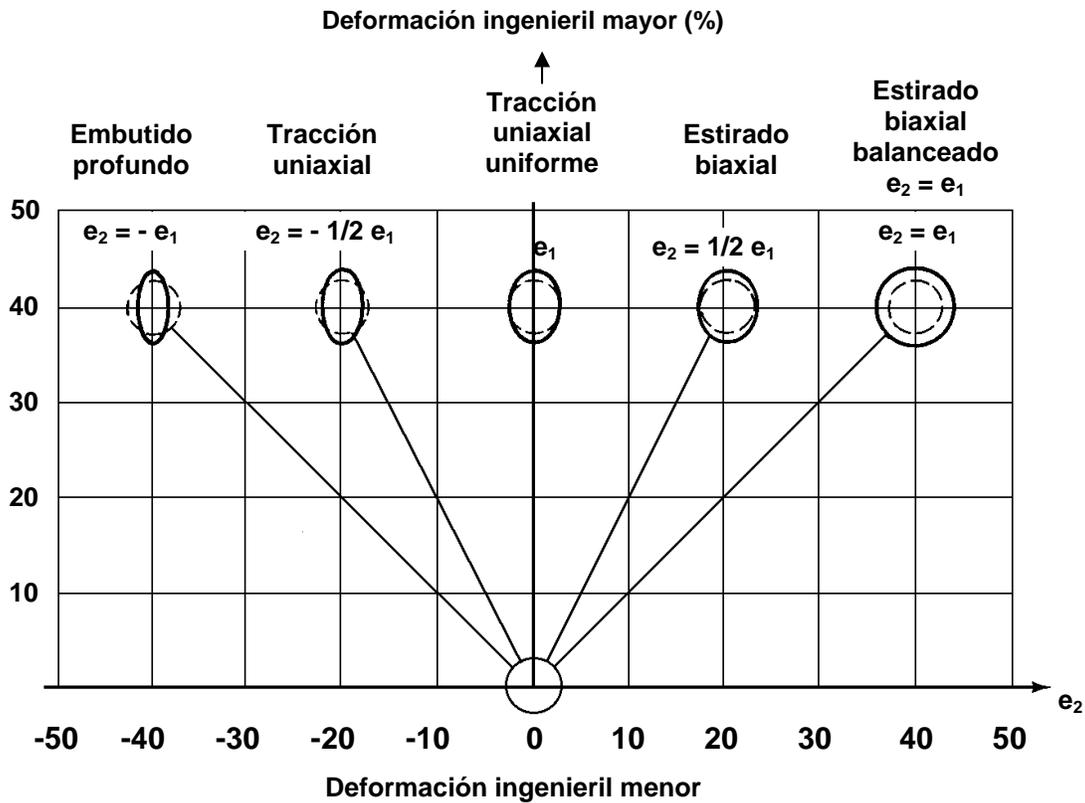


Figura 3.4. Diagrama de estado de deformación.

Así, para elaborar el DCL se toma una muestra representativa del material y se fabrican las probetas de acuerdo al ensayo de simulación que se vaya a utilizar. A cada probeta se le graba el mallado circular y se prueba. En las probetas deformadas se mide el eje mayor y menor de las elipses del mallado que se encuentran en la zona de falla (donde se formó el cuello o la fractura) y sus inmediaciones. Las mediciones se plasman en un diagrama de estado de deformación y se traza la curva límite o crítica. En la figura 3.5 se muestra un diagrama típico de un acero pasivado con aluminio.

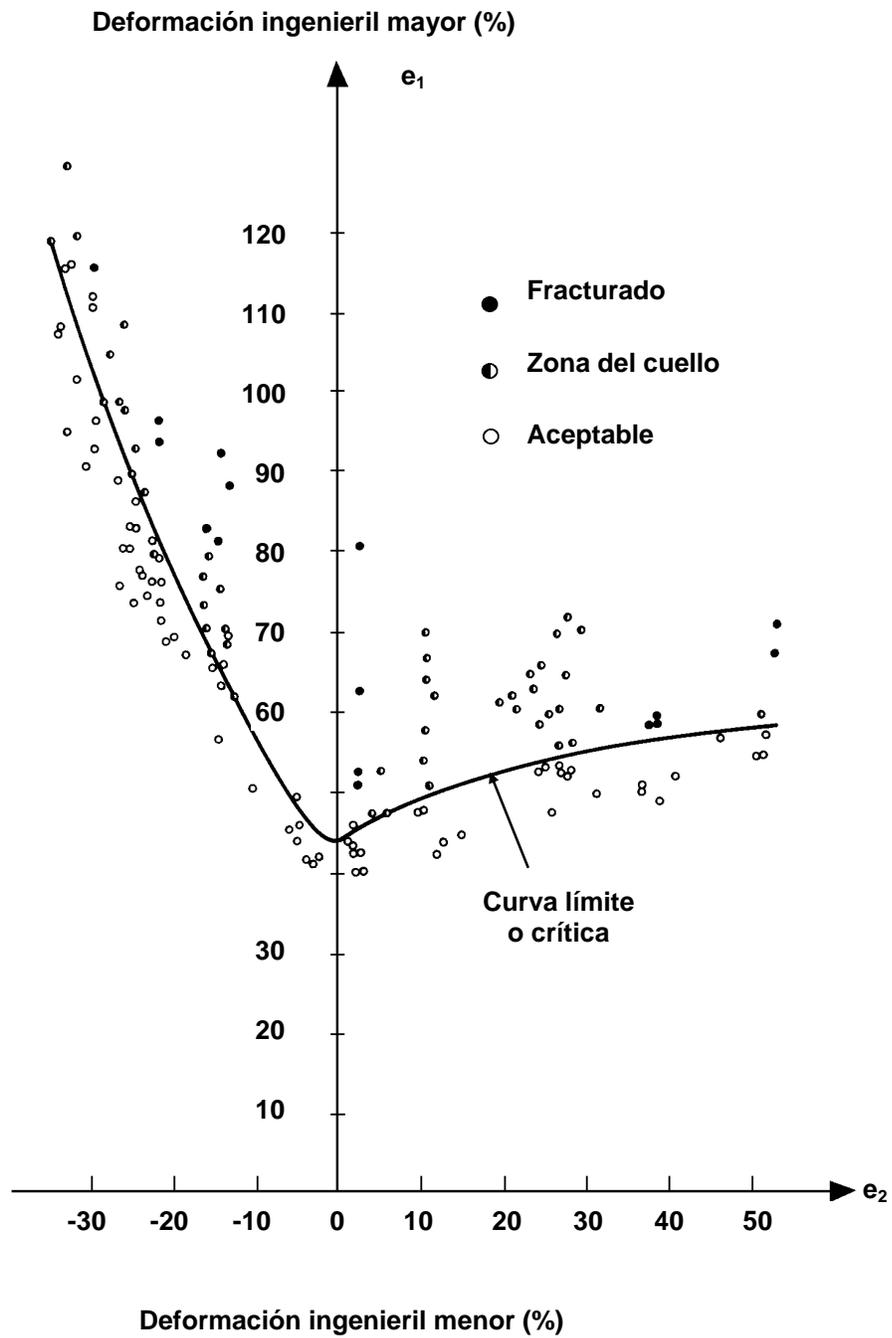


Figura 3.5. Diagrama de conformabilidad límite típico de un acero pasivado con aluminio.

1. Factores que influyen en el DCL

El DCL puede ser influenciado por varios factores, como son: el diámetro del mallado circular, la posición relativa de la dirección de medición con respecto a la del laminado, la lubricación y el espesor de la lámina.

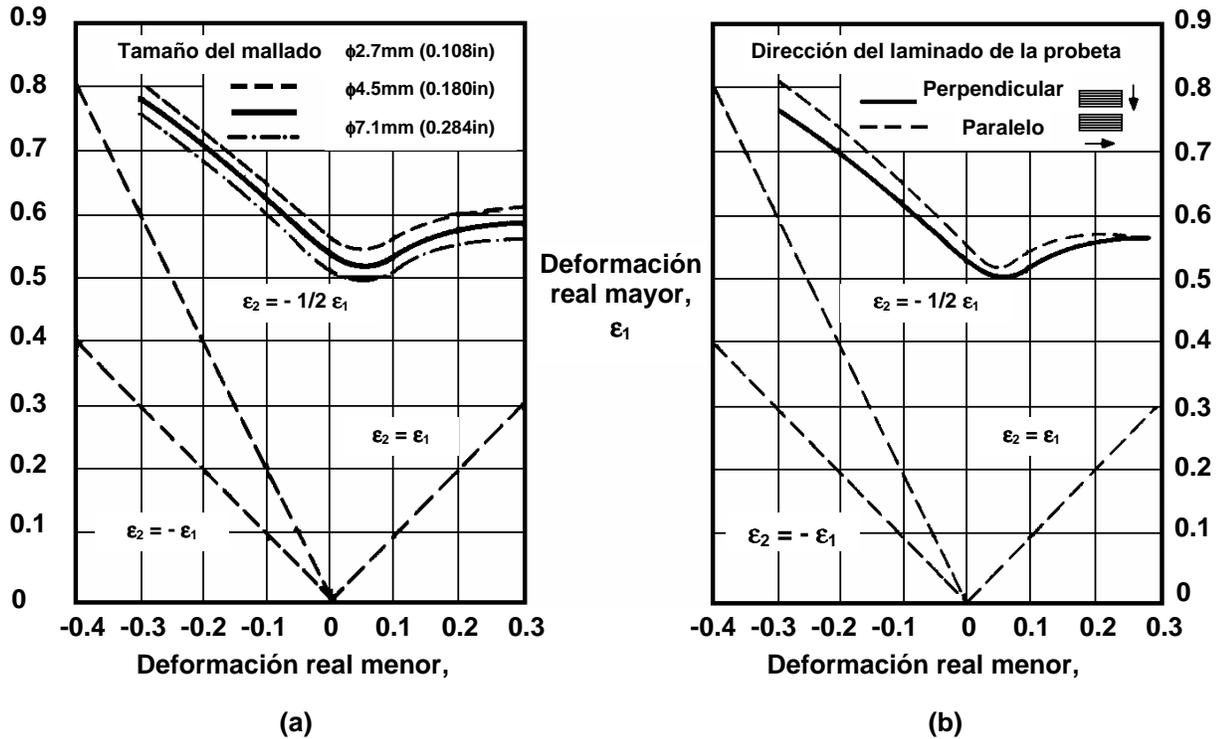


Figura 3.6. Influencia en el DCL por: a) tamaño de los círculos en el mallado y b) anisotropía planar.

Como se muestra en la figura 3.6(a), al aumentar el diámetro del mallado, disminuyen, comparativamente, las ordenadas de la curva crítica en los diagramas de conformabilidad límite, ya que se pueden determinar con más precisión las zonas de fractura o formación del cuello si el diámetro del mallado es más pequeño. La influencia de la anisotropía planar es relativamente más pequeña (aunque significativa para láminas de acero), como se muestra en la figura 3.6(b).

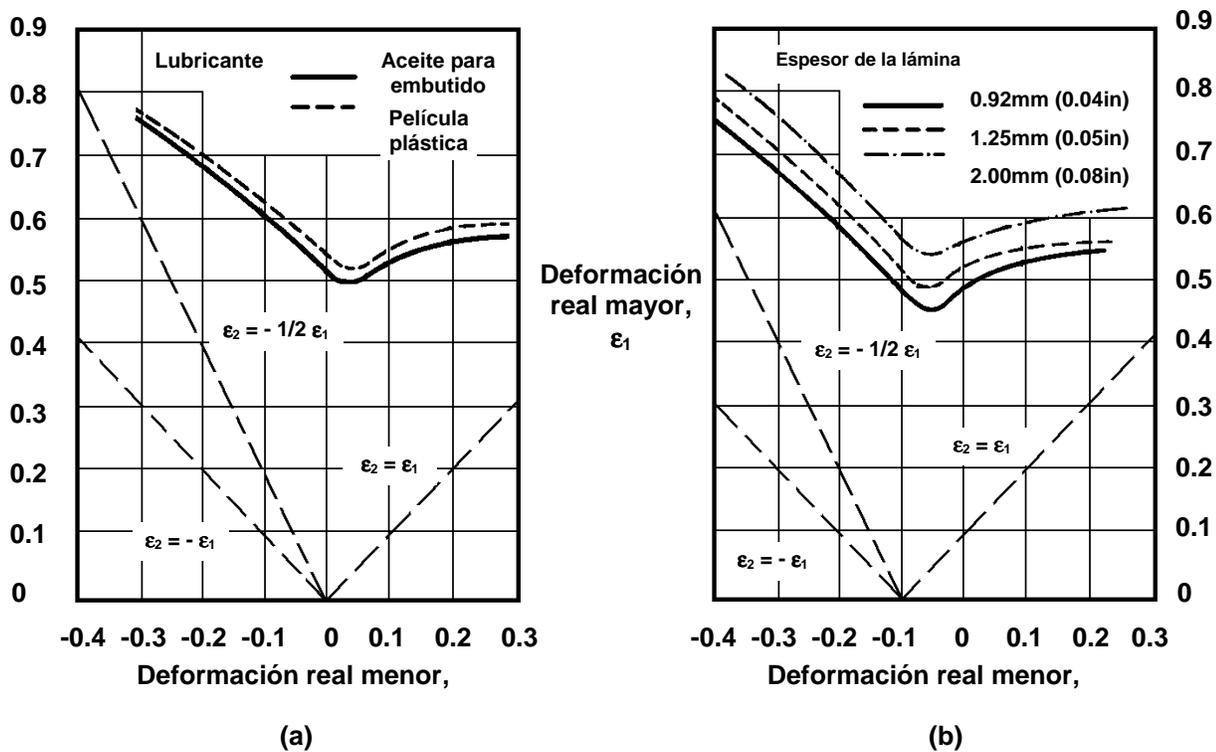


Figura 3.7. Influencia en el DCL por: a) lubricación y b) espesor de la lámina.

La influencia de la lubricación se muestra en la figura 3.7(a). Al mejorarla los valores límite aumentan. Lo mismo sucede al incrementar el espesor de la lámina. (Figura 3.7(b)).

2. Interpretación del DCL

La deformación del mallado circular difiere dependiendo del tipo de carga a la que se somete al material. De hecho existe una relación entre la distorsión del círculo y el tipo de estado de esfuerzo aplicado (Figura 3.4).

El diagrama de conformabilidad límite permite encontrar combinaciones de deformación mayor y menor para las cuales no se presentará formación de cuello o fractura. Si una combinación de deformaciones, al ubicarla en la gráfica, se encuentra por arriba o muy cercana a la curva crítica del DCL, querrá decir que esa combinación tiene una alta probabilidad de producir falla en la lámina. Por el contrario, si la combinación de deformaciones mayor y menor se encuentra suficientemente por debajo de la curva (aproximadamente un 10%), se podrá inferir que es muy poco probable que se presente falla en la lámina (Figura 3.5).

CAPITULO 4 DESARROLLO EXPERIMENTAL, EVALUACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

Se realizaron pruebas a laminas de acero 1018 recubierta con zinalco y otras con aluminio por el proceso de baño con inmersión en caliente, para establecer la caracterización del DCL.

El acero para el caso de esta investigación fue el denominado como 1018 con las siguientes características (tabla 4.1).

Nombre genérico	Análisis básico medio		
COLD ROLL (1018)	C	Si	Mn
	0.18	0.25	0.75
Sin tratamiento térmico con un laminado del 30%			

Tabla 4.1 Características del acero 1018.

4.1 TECNICAS.

4.1.1 RECUBRIMIENTO CON ZINALCO.

Con la finalidad de generar el recubrimiento de zinalco sobre el acero 1018 se desarrollo la metodología que a continuación se detalla. Cabe mencionar que esta técnica en particular, se utilizo también para el aluminizado sobre el mismo acero.

Para lograr el recubrimiento se requiere llevar un control estricto de las variables que interviene en el proceso, desde las materias primas, la temperatura, tiempos, reactivos de limpieza y de activación, así como del metal líquido. A continuación se detalla el procedimiento que se siguió para lograr el recubrimiento.

Materiales y sustancias empleadas

Para el desarrollo de estas pruebas se empleó lámina de acero tipo SAE 1018 con calidad comercial producida por AHMSA.

El material contenía la siguiente composición química, misma que fue provista por el fabricante, lo cual certifica que cumple con las normas vigentes:

C – 0.18 %
Si – 0.25 %
Mn – 0.75 %

Para el recubrimiento se utilizo zinalco que cumplía con las siguiente características:

Zn – 75 %
Al – 22 %
Cu – 3 %

Para la preparación superficial del acero para su posterior recubrimiento, se utilizaron los siguientes reactivos:

- Percloroetileno
- Ácido clorhídrico al 10 %
- Tiourea
- Cloruro de zinc
- Cloruro de amonio
- Agua destilada
- Pistola de agua caliente

Producción del recubrimiento.

La preparación que requiere el acero para ser recubierto por el zinalco (o aluminio), es de suma importancia ya que de ello depende que el zinalco se adhiera al acero.

La primera etapa consiste en cortar la lámina de acero a las dimensiones adecuadas para el tipo de ensayos a realizar con las mismas.

Posteriormente se procedió a realizar el proceso de limpieza, el cual inicia con la limpieza mecánica por medio de un esmeril, con el fin de eliminar impurezas y dejar una superficie rugosa para una mayor adherencia entre los materiales.

Concluida la limpieza mecánica se procedió a realizar el desengrasado que consiste en sumergir las probetas durante 10 minutos en una tina que contiene percloroetileno al 100% para poder quitar la grasa que se adhiere al acero debido a su manejo con las manos.

Después de esto se prosiguió con el decapado, que consiste en preparar ácido clorhídrico diluido en agua al 10% y después se aplicó tiourea al 10% que funciona como inhibidor, para que las piezas al ser sacadas del decapado y expuestas al ambiente no se oxiden rápidamente. En este proceso se dejan las piezas por un lapso de 4 minutos.

A continuación se procede al fluxado (activación de la superficie), que consiste en hacer una preparación en un vaso de precipitado de cloruro de zinc al 15% en agua destilada, y en otro vaso una preparación de cloruro de amonio al 15% con agua destilada también. Después se mezclan nuevamente, ahora en una proporción del 10% por mezcla, con agua destilada, y se sumergen las piezas en esta solución por un lapso de 3 minutos, para lograr que la superficie esta lista para poder ser recubierta.

Después de esto se procede a sacar las probetas y secarlas con una pistola de aire para que no se oxiden.

El paso siguiente consiste en poner zinalco en un crisol y meterlo en un horno eléctrico a 600°C para lograr que el zinalco esté completamente en

estado líquido y permitir su manejo sin que el proceso de solidificación entorpezca el baño de las probetas.

Se saca el crisol del horno y se sumergen las piezas 5 minutos para lograr la difusión del zinalco en el acero.

Posteriormente, las probetas se introducen en otro horno eléctrico que esta a 300°C para evitar un choque térmico en ellas y dejarlas a una temperatura cercana a la de recocido.

A continuación las probetas a recocer se introducen en un horno eléctrico a una temperatura de 320°C durante una hora.

Por último se procede a un proceso de laminación a una velocidad aproximada de 10 ft/min realizando dos pasos de 20 milésimas de pulgada cada uno, para lograr un mejor acabado superficial.

4.1.2 ENSAYO DE TRACCIÓN

Para realizarlo se empleó el siguiente equipo:

- Máquina universal de pruebas electromecánica marca Instron, modelo 4206, y las mordazas con apertura máxima de 6.35 mm:
 - a) Capacidad: *150 kN*;
 - b) Velocidades de aplicación de carga: *hasta 25 kN a 500 mm/min y hasta 150 kN a 50 mm/min*;
 - c) Precisión de la celda de carga: *$\pm 1\%$ de la lectura a 1/50 de su capacidad*;
 - d) Rango de velocidades del marco de carga: *0.05 a 500 mm/min*;
 - e) Precisión de la velocidad del marco de carga: *$\pm 0.2\%$ en valores superiores a 100 mm*;
 - f) Velocidad de regreso del marco de carga: *500 mm/min*, y *rigidez de la máquina: 140 kN/mm*.
- Calibrador digital marca Mitutoyo, modelo CD-6":
 - a) Rango de medición: *0 a 152.4 mm*, y
 - b) Resolución: *0.01 mm*.
- Micrómetro digital marca Mitutoyo, modelo MDC-1"M:
 - a) Rango de medición: *0 a 25.4 mm*, y
 - b) Resolución: *0.001 mm*.

Se elaboraron probetas de las láminas para ensayarlas según la norma ASTM E8 (*Tension testing of metallic materials*). La máquina universal de pruebas electromecánica se preparó empleando el programa para ensayo de tracción de láminas (los parámetros utilizados en el programa fueron: toma de datos para la elaboración de la gráfica 5 pts/seg, velocidad del marco de carga 10 mm/min) e instalando el herramental correspondiente; las pruebas se realizaron a temperatura y condiciones ambiente (Figura 4.1). A cada probeta se le midió el ancho y el espesor de la zona de prueba (con el calibrador digital) y se cargaron en el programa; posteriormente, se le sujetó a las mordazas y fue sometida a cargas de tracción hasta la ruptura, obteniendo su diagrama esfuerzo-deformación ingenieril (el reporte incluye los datos y valores característicos de las pruebas). Éstas se hicieron en la dirección del laminado (longitudinal), a 45 grados del laminado y a 90 grados del laminado (transversal).



Figura 4.1. Máquina universal de pruebas electromecánica con el herramental para el ensayo de tracción.

En las láminas estudiadas también se realizaron ensayos de tracción; siendo deformándolas hasta un 30%, para calcular su anisotropía. El procedimiento es similar al antes descrito. Con el micrómetro digital se midieron los espesores y anchos iniciales y finales. Se calculó la anisotropía normal (r_m) y la anisotropía planar (Δr), según las ecuaciones referidas en el capítulo 2.

4.1.3 DIAGRAMA DE CONFORMABILIDAD LÍMITE

Para obtenerlo se utilizó:

- Equipo para grabado electroquímico marca Etch-O-Matic, modelo super kit:
 - a) Profundidad de grabado: *0.00254 mm con corriente alterna, 0.07620 mm con corriente directa;*
 - b) Tiempo de grabado: *10 a 12 segundos, y*
 - c) Superficie máxima de grabado: *101.6 X 50.8 mm.*
- Máquina universal de pruebas servohidráulica marca Instron, modelo 1331, y herramienta para el ensayo Erichsen:
 - a) Capacidad: *100 kN;*
 - b) Precisión de la celda de carga: *±1 % de la lectura a 1/50 de su capacidad;*
 - c) Rango de la velocidad del marco de carga: *8.5×10^{-5} a 846.6 mm/min, y*
 - d) Deflexión del marco de carga: *0.16764mm.*
- Regla flexible para medir porcentajes de deformación, considerando una longitud inicial de 2.5 mm:
 - a) Rango de medición: *-50% a 105%, y*
 - b) Resolución: *1%.*

Grabado

Las probetas para el ensayo Erichsen se grabaron con el equipo Etch-O-Matic de la siguiente manera: se limpió la superficie por grabar, eliminando grasa y polvo; se conectó el equipo a una toma de 110 volts, y la terminal de tierra a la lámina; sobre ésta, se colocó el *stencil*, un fieltro mojado con electrolito y la terminal positiva (ver figura 4.2), cerrando el circuito y manteniéndolo así, durante 10 segundos, para realizar la marca; por último, se agregó neutralizador a la zona del grabado, para suspender la reacción química, y se lavó la probeta.

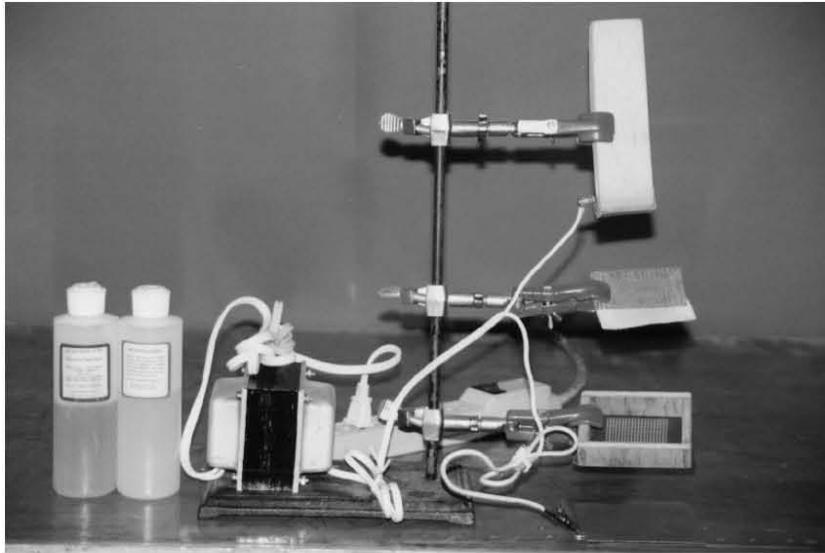


Figura 4.2. Equipo para grabado electroquímico.

Ensayo Erichsen

La máquina universal de pruebas servohidráulica se programó con una función rampa negativa y una velocidad de 0.08 mm/seg (rango 0.01 Hz, multiplicador 1.84, 100% de desplazamiento). Se instaló el herramental como se muestra en la figura 4.3 (los parámetros del ensayo y el herramental fueron normalizados según ASTM E-643 *Ball punch deformation of metallic sheet material*). Cada probeta, ya marcada, se lubricó con grasa grafitada en la zona de prueba; se prensó con el herramental, de manera que no se moviera durante el ensayo, y se deformó hasta el comienzo de la formación del cuello (lo cual se detecta con la caída súbita de la carga). En ese momento se detuvo la prueba. Se obtuvo una gráfica de carga contra desplazamiento para cada probeta (escala: 0.25 V/cm, en ambos ejes. Equivalencias: para la carga 10V=10ton y para el desplazamiento 10V=5.08cm). Se calcularon las cargas máximas soportadas y las profundidades de la copa Erichsen.



Figura 4.3. Máquina universal de pruebas servohidráulica con el herramental para el ensayo Erichsen.

Método de medición

En las probetas Erichsen ensayadas se midieron las deformaciones principales; es decir, eje mayor y menor de las elipses resultantes del cambio de forma de los círculos grabados previamente. Se midieron las elipses donde se formó el cuello y las localizadas en las zonas adyacentes. Se utilizó una regla flexible, como se muestra en la figura 4.4.

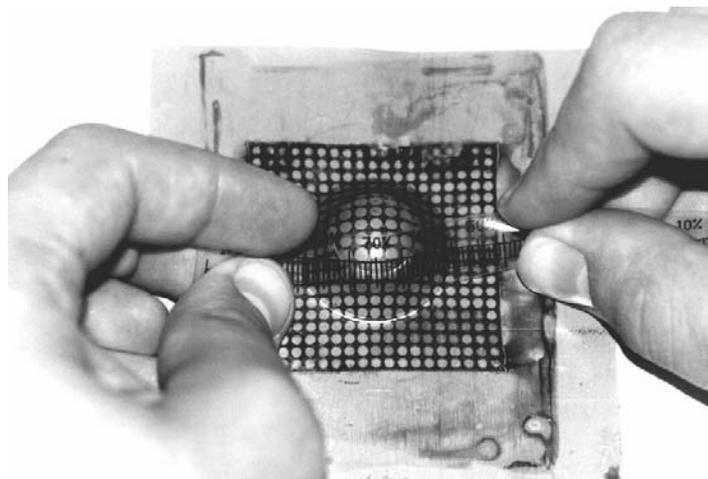


Figura 4.4. Probeta Erichsen ya deformada. Se está midiendo el eje mayor de una elipse en la zona de falla

Las deformaciones mayor y menor de cada elipse medida se graficaron en un diagrama de estado de deformación, distinguiendo los puntos de la zona de cuello (fallados) de los demás (sin falla). Así, se forman dos regiones en la gráfica, ligeramente traslapadas, que permiten ubicar la curva crítica o límite del diagrama de conformabilidad.

Para complementar el diagrama y obtener estados de deformación a la izquierda del eje vertical, se marcaron, en la zona de prueba, usando el patrón mostrado en la figura 3.2(b), probetas para ensayos de tracción (también se hicieron en tres direcciones respecto a la laminación: longitudinal, 45 grados y transversal). Se ensayaron y se siguió el mismo método y criterio utilizado para las probetas Erichsen, midiendo las deformaciones principales y graficándolas en el diagrama de conformabilidad límite.

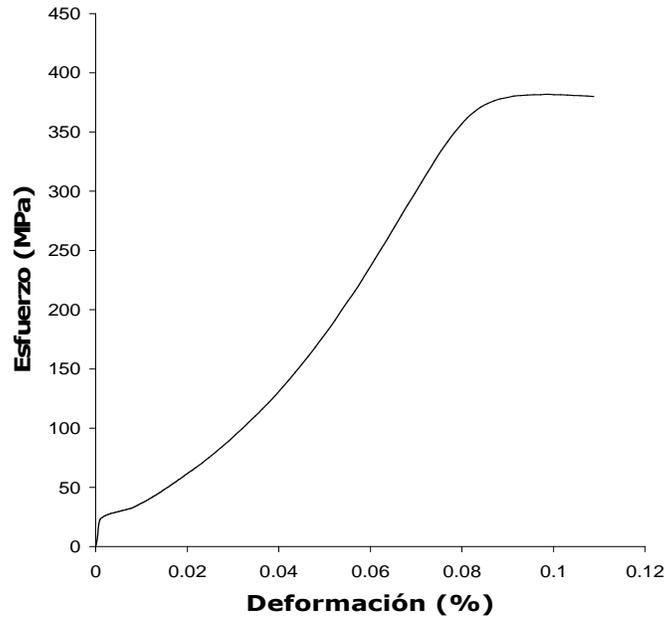
4.2 RESULTADOS

A continuación se presentaran las tablas donde se reportan los resultados de los ensayos de tracción realizados a las probetas aluminizadas y zinalquizadas en tres diferentes estados de temperatura: frío, caliente a 250°C y caliente a 350°C. Después de cada tabla se presentaran las gráficas mas representativas de los grupos de probetas elaboradas en tres distintas direcciones respecto a la laminación: 0°, 45° y 90°.

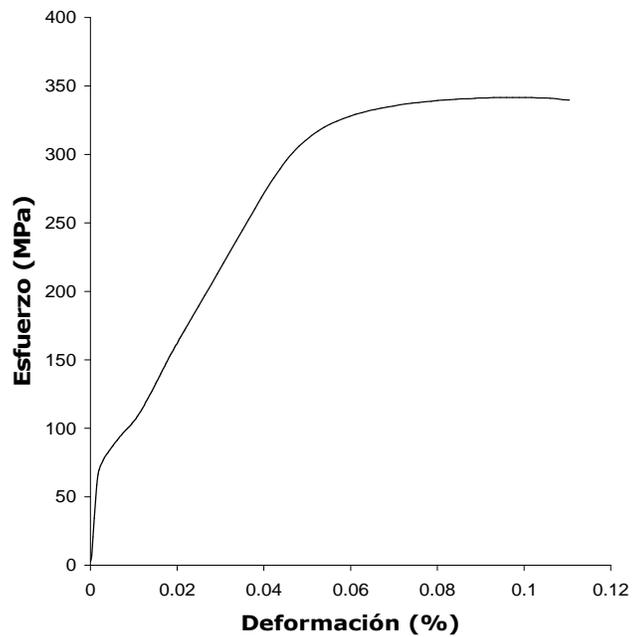
Tabla 4.2. Prueba de tracción para lámina de acero 1018 recubierta con aluminio. (Valores promedio).

Aluminizado en frío.				
<i>Dimensiones:</i>		0°	45°	90°
Ancho	(mm)	9.03	8.39	9.10
Espesor	(mm)	1.55	1.52	1.64
Longitud de zona de prueba	(mm)	34.50	34.50	34.50
Distancia de sujeción	(mm)	40.00	40.00	40.00
<i>Dirección de laminación de la muestra</i>	<i>Deformación en máxima carga (%)</i>	<i>Esfuerzo en máxima carga (Mpa)</i>	<i>Deformación en punto ruptura (%)</i>	<i>Esfuerzo en punto ruptura (Mpa)</i>
0°	10.000	381.800	10.150	381.600
45°	9.855	342.100	10.750	340.800
90°	7.536	334.100	8.955	332.800

Gráfica 4.1. Gráfica mas representativa de una lámina aluminizada deformada en frío a 0° de laminación.



Gráfica 4.2. Gráfica mas representativa de una lámina aluminizada deformada en frío a 45° de laminación.



Gráfica 4.3. Gráfica mas representativa de una lámina aluminizada deformada en frío a 90° de laminación.

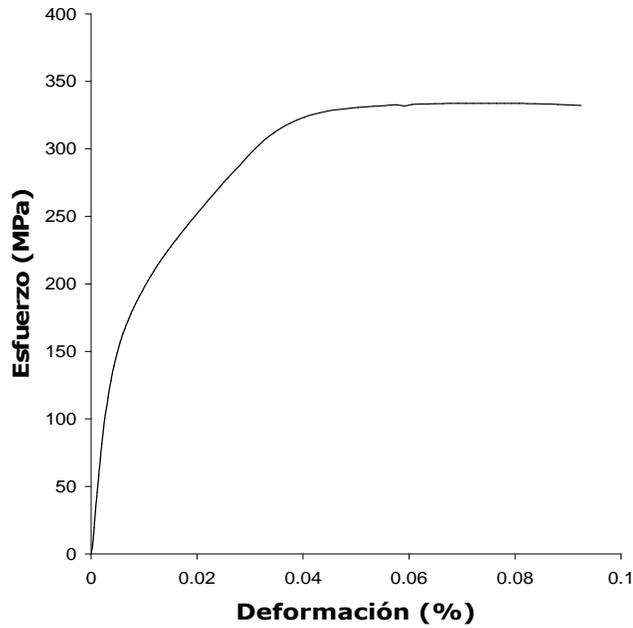
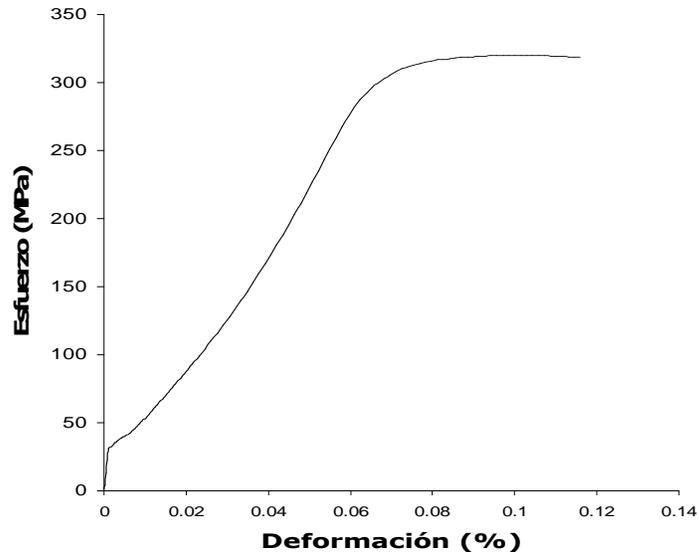


Tabla 4.3. Prueba de tracción para lámina de acero 1018 recubierta con aluminio. (Valores promedio). Aluminizado en caliente a 250°C.

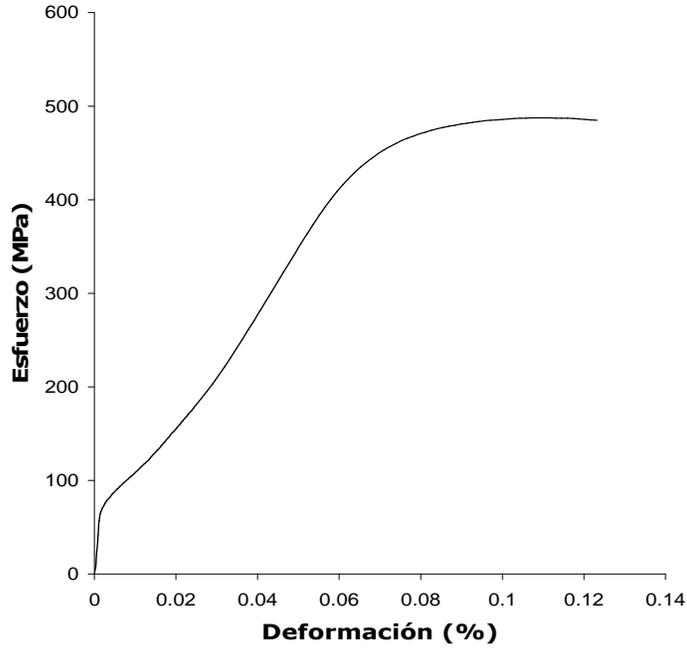
Dimensiones:		0°	45°	90°
Ancho	(mm)	9.05	8.35	9.19
Espesor	(mm)	1.80	1.07	1.55
Longitud de zona de prueba	(mm)	34.50	34.50	34.50
Distancia de sujeción	(mm)	40.00	40.00	40.00

<i>Dirección de laminación de la muestra</i>	<i>Deformación en máxima carga (%)</i>	<i>Esfuerzo en máxima carga (Mpa)</i>	<i>Deformación en punto ruptura (%)</i>	<i>Esfuerzo en punto ruptura (Mpa)</i>
0°	10.580	320.000	10.870	319.400
45°	11.330	487.800	11.600	487.300
90°	10.430	352.000	10.700	351.800

Gráfica 4.4. Gráfica mas representativa de una lámina aluminizada deformada en caliente a 250°C a 0° de laminación.



Gráfica 4.5. Gráfica mas representativa de una lámina aluminizada deformada en caliente a 250°C a 45° de laminación.



Gráfica 4.6. Gráfica mas representativa de una lámina aluminizada deformada en caliente a 250°C a 90° de laminación.

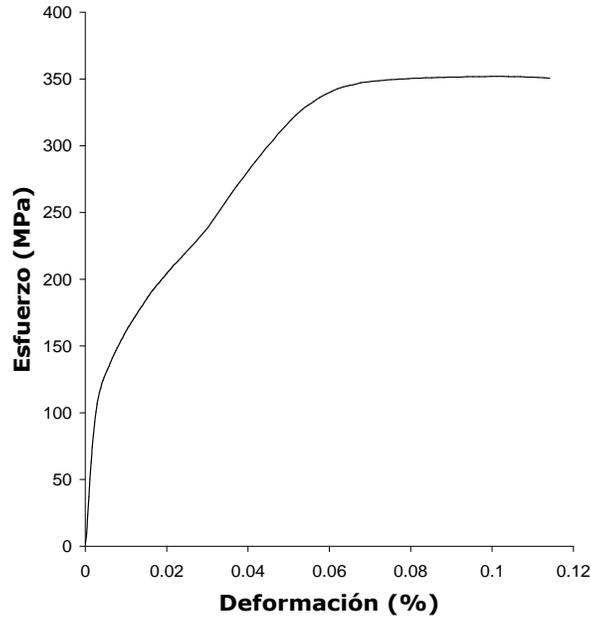
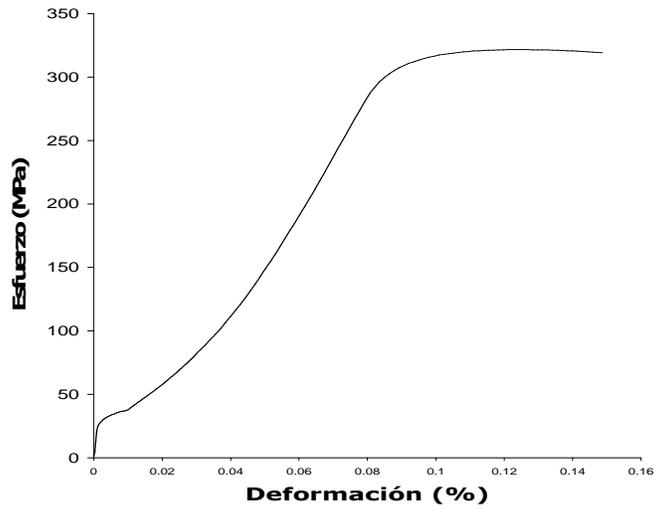


Tabla 4.4. Prueba de tracción para lámina de acero 1018 recubierta con aluminio. (Valores promedio). Aluminizado en caliente a 350°C.

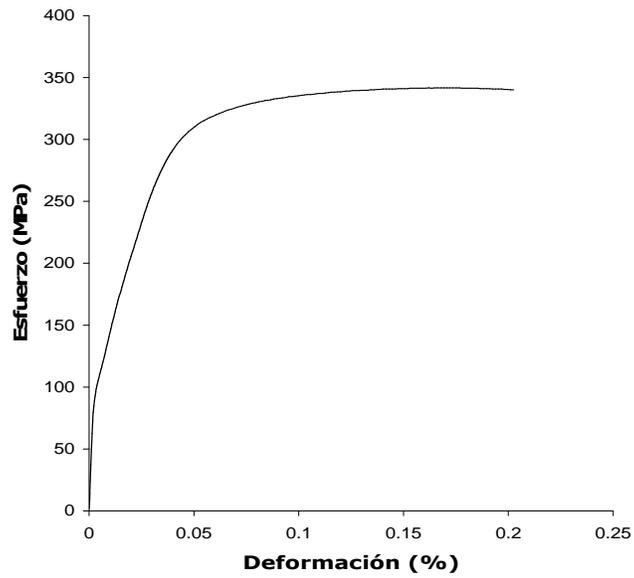
Dimensiones:		0°	45°	90°
Ancho	(mm)	9.17	8.36	9.17
Espesor	(mm)	1.75	1.49	1.54
Longitud de zona de prueba	(mm)	34.50	34.50	34.50
Distancia de sujeción	(mm)	40.00	40.00	40.00

<i>Dirección de laminación de la muestra</i>	<i>Deformación en máxima carga (%)</i>	<i>Esfuerzo en máxima carga (Mpa)</i>	<i>Deformación en punto ruptura (%)</i>	<i>Esfuerzo en punto ruptura (Mpa)</i>
0°	12.930	321.800	14.580	319.800
45°	17.880	341.800	19.970	340.500
90°	10.000	355.100	10.750	354.500

Gráfica 4.7. Gráfica mas representativa de una lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C a 0° de laminación.



Gráfica 4.8. Gráfica mas representativa de una lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C a 45° de laminación.



Gráfica 4.9. Gráfica mas representativa de una lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C a 90° de laminación.

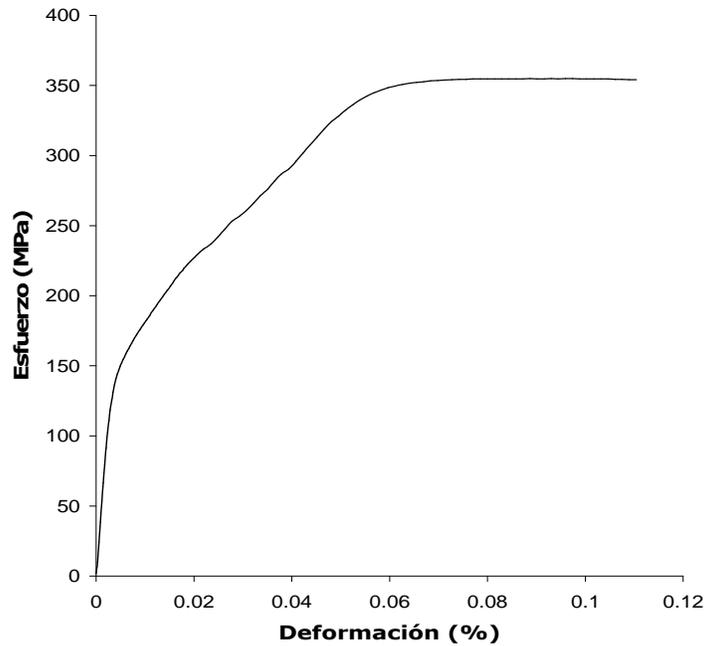
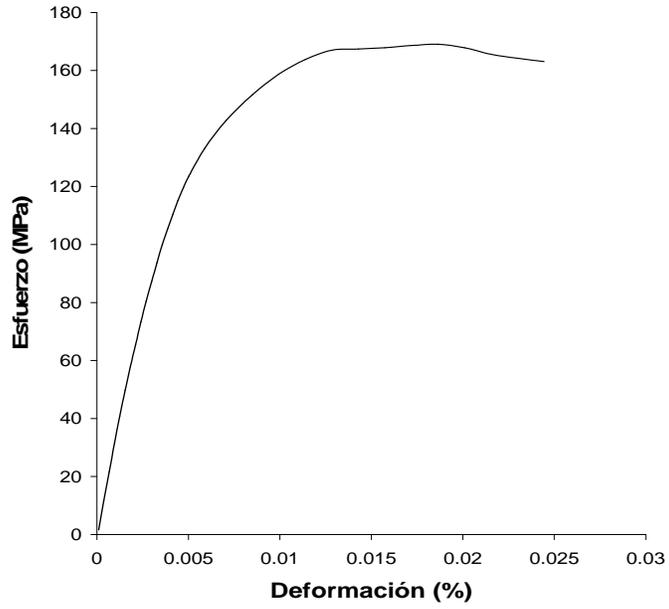


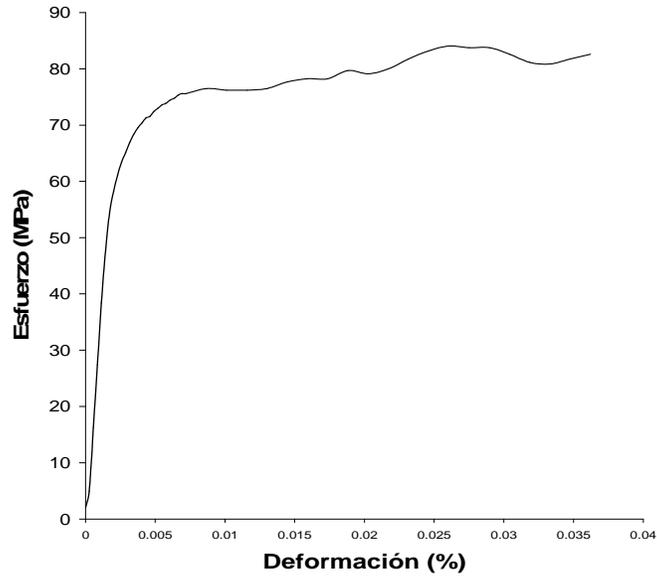
Tabla 4.5. Prueba de tracción para lámina de acero 1018 recubierta con zinalco. Zinalquizado en frío. (Valores promedio).

Dimensiones:		0°	45°	90°
Ancho	(mm)	10.28	8.34	9.86
Espesor	(mm)	1.71	1.66	1.46
Longitud de zona de prueba	(mm)	34.50	34.50	34.50
Distancia de sujeción	(mm)	40.00	40.00	40.00
Dirección de laminación de la muestra	Deformación en máxima carga (%)	Esfuerzo en máxima carga (Mpa)	Deformación en punto ruptura (%)	Esfuerzo en punto ruptura (Mpa)
0°	1.855	169.300	1.864	169.100
45°	2.551	84.390	3.331	80.880
90°	0.555	32.730	1.707	27.420

Gráfica 4.10. Gráfica mas representativa de una lámina zinalquizada deformada en frío a 0° de laminación.



Gráfica 4.11. Gráfica mas representativa de una lámina zinalquizada deformada en frío a 45° de laminación.



Gráfica 4.12. Gráfica mas representativa de una lámina zinalquizada deformada en frío a 90° de laminación.

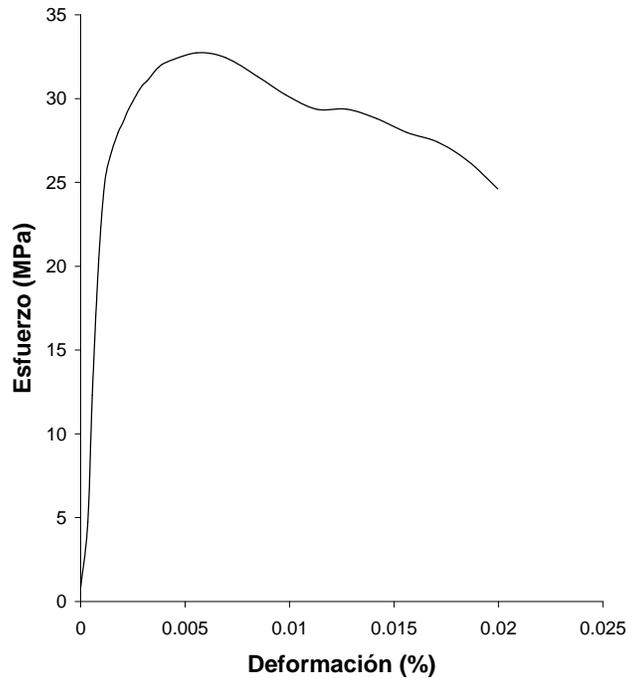
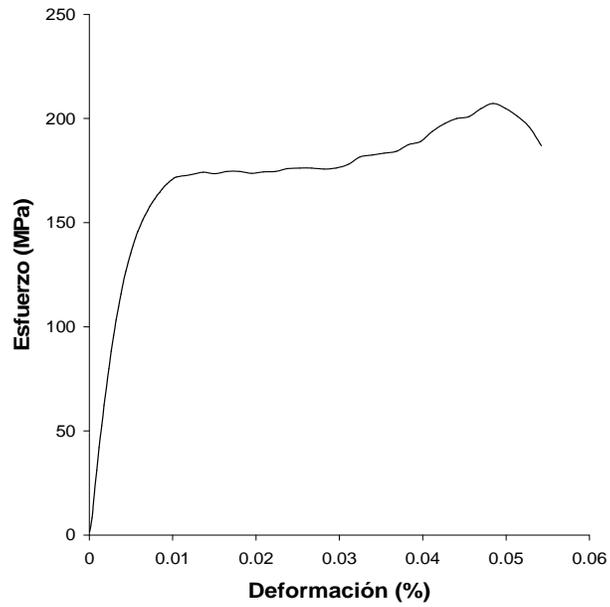


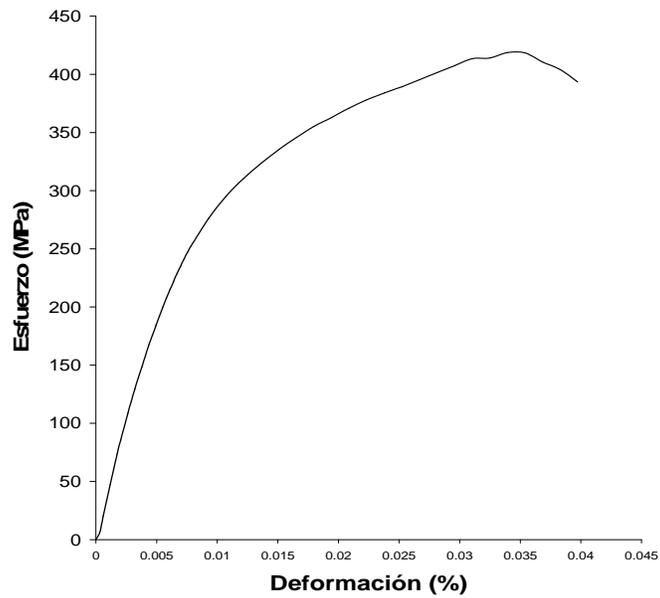
Tabla 4.6. Prueba de tracción para lámina de acero 1018 recubierta con zinalco. (Valores promedio). Zinalquizado en caliente a 250°C.

Dimensiones:		0°	45°	90°
Ancho	(mm)	10.54	8.44	9.87
Espesor	(mm)	1.70	1.61	1.52
Longitud de zona de prueba	(mm)	34.50	34.50	34.50
Distancia de sujeción	(mm)	40.00	40.00	40.00
Dirección de laminación de la muestra	Deformación en máxima carga (%)	Esfuerzo en máxima carga (Mpa)	Deformación en punto ruptura (%)	Esfuerzo en punto ruptura (Mpa)
0°	4.928	207.700	4.699	204.800
45°	3.478	420.300	3.393	418.800
90°	1.681	82.140	2.268	72.490

Gráfica 4.13. Gráfica mas representativa de una lámina zinalquizada deformada en caliente a 250°C a 0° de laminación.



Gráfica 4.14. Gráfica mas representativa de una lámina zinalquizada deformada en caliente a 250°C a 45° de laminación.



Gráfica 4.15. Gráfica mas representativa de una lámina zinalquizada deformada en caliente a 250°C a 0° de laminación.

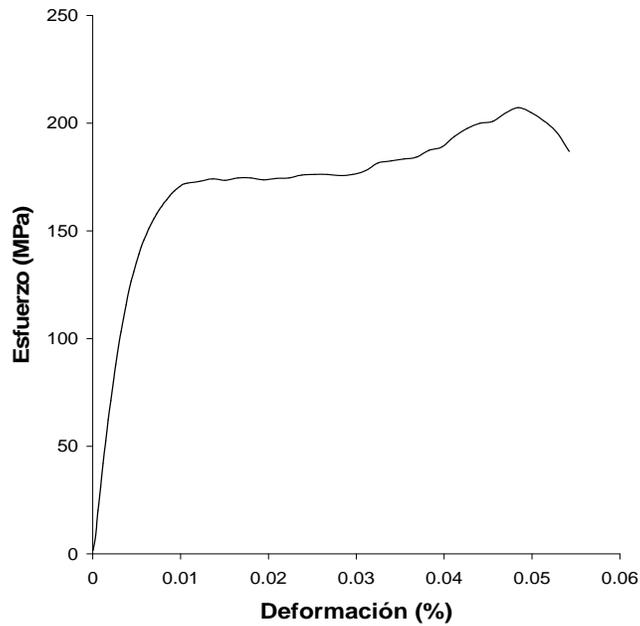
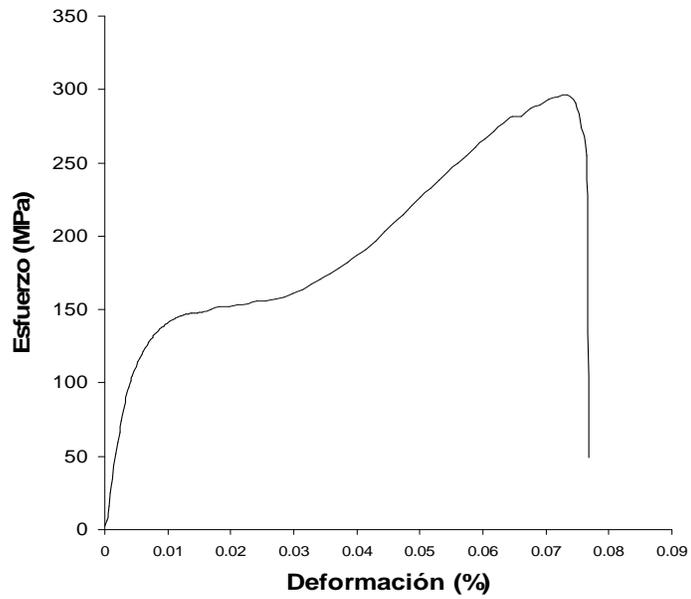


Tabla 4.7. Prueba de tracción para lámina de acero 1018 recubierta con zinalco. (Valores promedio). Zinalquizado en caliente a 350°C.

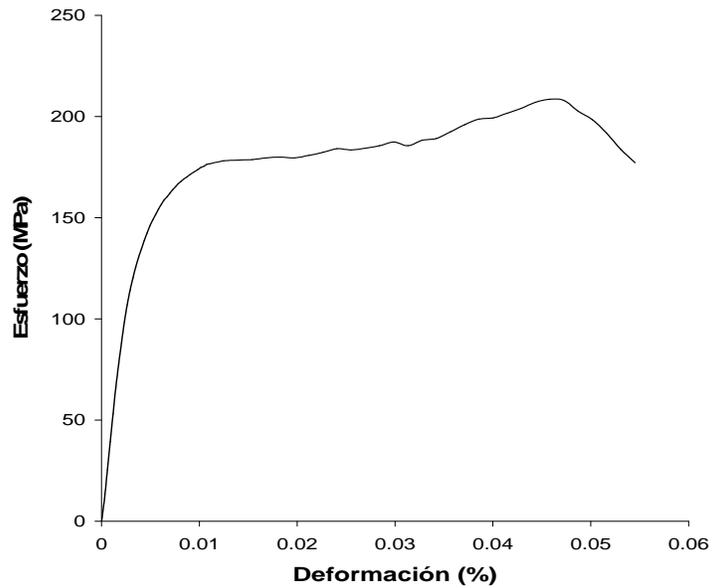
Dimensiones:		0°	45°	90°
Ancho	(mm)	10.61	8.33	9.89
Espesor	(mm)	1.84	1.62	1.63
Longitud de zona de prueba	(mm)	34.50	34.50	34.50
Distancia de sujeción	(mm)	40.00	40.00	40.00

Dirección de laminación de la muestra	Deformación en máxima carga (%)	Esfuerzo en máxima carga (Mpa)	Deformación en punto ruptura (%)	Esfuerzo en punto ruptura (Mpa)
0°	7.333	296.200	7.681	249.000
45°	4.696	209.000	5.017	198.500
90°	0.754	40.230	4.348	30.480

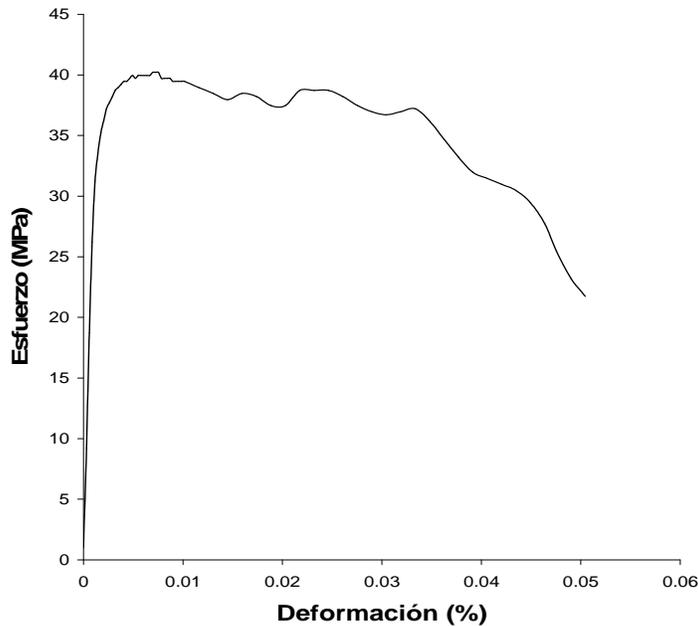
Gráfica 4.16. Gráfica mas representativa de una lámina zinalquizada deformada en caliente a 350°C a 0° de laminación.



Gráfica 4.17. Gráfica mas representativa de una lámina zinalquizada deformada en caliente a 350°C a 45° de laminación.



Gráfica 4.18. Gráfica mas representativa de una lámina zinalquizada deformada en caliente a 350°C a 90° de laminación.



Ahora presentamos la tabla 4.8, la cual contiene los valores que empleamos para calcular la anisotropía de las láminas ensayadas.

Siguiendo a esta tabla se presentan los resultados del ensayo de estirado Erichsen de cada uno de los casos estudiados, junto con su gráfica más representativa.

Finalmente se presentan las tablas donde se agrupan los valores obtenidos de las mediciones de los porcentajes de deformación de las elipses de las probetas Erichsen y de tracción. En estas tablas se pueden ver marcados los valores que se utilizaron para que por medio de regresiones lineales se obtengan polinomios de 2º, 3º y 4º orden. De entre estos tres polinomios se escoge el que se acople mejor a los puntos no fallados y finalmente con la aplicación de un factor de corrección se obtiene la curva crítica. Los valores y las curvas que acabamos de describir se encuentran graficados después de cada una de estas tablas.

Este criterio para determinar la curva crítica, que a la postre formara el diagrama de conformabilidad limite (DCL), se detallara mas adelante dentro de este mismo capítulo.

Tabla 4.8. Anisotropía.

Material y orientación.	W _o (mm)	W (mm)	t _o (mm)	t (mm)	ε _w	ε _t	r	r _m	Δ _r
Aluminizado 0° en frío	9.03	8.7	1.55	1.51	-0.037229 342	-0.02614528	1.423941209	0.85046084	0.35705934
Aluminizado 45° en frío	8.39	7.67	1.52	1.33	-0.0897 23905	-0.133531393	0.671931172		
Aluminizado 90° en frío	9.1	8.49	1.64	1.47	-0.06938 5413	-0.109433841	0.634039823		
Aluminizado 0° en caliente a 250°C	9.05	8.4	1.75	1. 52	-0.074533052	-0.140905453	0.528957895	0.55191933	0.27589807
Aluminizado 45° en caliente a 250°C	8.35	7.59	1.7	1 .35	-0.095429947	-0.230523659	0.413970297		
Aluminizado 90° en caliente a 250°C	9.19	8.53	1.55	1.42	-0.074526575	-0.087598059	0.850778835		
Aluminizado 0° en caliente a 350°C	9.17	8.33	1.75	1 .5	-0.09607383	-0.15415068	0.62324623	0.7656291	0.15211637
Aluminizado 45° en caliente a 350°C	8.36	7.69	1.49	1.32	-0.083537644	-0.121144383	0.689570917		
Aluminizado 90° en caliente a 350°C	9.17	8.54	1.54	1.44	-0.071176278	-0.067139303	1.060128352		
Zinalquizado 0° en frío	10.28	10.26	1.71	1.62	-0.00 194742	-0.054067221	0.036018501	0.22522721	-0.34134415
Zinalquizado 45° en frío	8.34	8.28	1.66	1.63	-0.007 220248	-0.018237588	0.395899291		
Zinalquizado 90° en frío	9.86	9.84	1.46	1.42	-0.002 030458	-0.027779564	0.073091771		
Zinalquizado 0° en caliente a 250°C	10.54	10.47	1.7	1.67	-0.006663518	-0.017804625	0.374257721	0.20990745	0.13674347
Zinalquizado 45° en caliente a 250°C	8.44	8.41	1.61	1.57	-0.003560835	-0.02515856	0.141535711		
Zinalquizado 90° en caliente a 250°C	9.87	9.81	1.52	1.47	-0.00609758	-0.033447934	0.182300642		
Zinalquizado 0° en caliente a 350°C	10.61	10.55	1.8 4	1.76	-0.005671093	-0.044451763	0.127578579	0.10419721	0.08100563
Zinalquizado 45° en caliente a 350°C	8.33	8.31	1.62	1.56	-0.002403847	-0.037740328	0.063694394		
Zinalquizado 90° en caliente a 350°C	9.89	9.82	1.63	1.56	-0.007103023	-0.043894194	0.161821478		

Tabla 4.9. ALUMINIZADO DEFORMADO EN FRIO. (VALORES PROMEDIO).

Desplazamiento máx. (cm)	Carga máx.(cm)	Profundidad de la copa (mm)	Carga máx. (ton)
7.5	12.4	9.6	2.197

Gráfica más representativa ,del Aluminizado a Tamb. Ensayo Erichsen

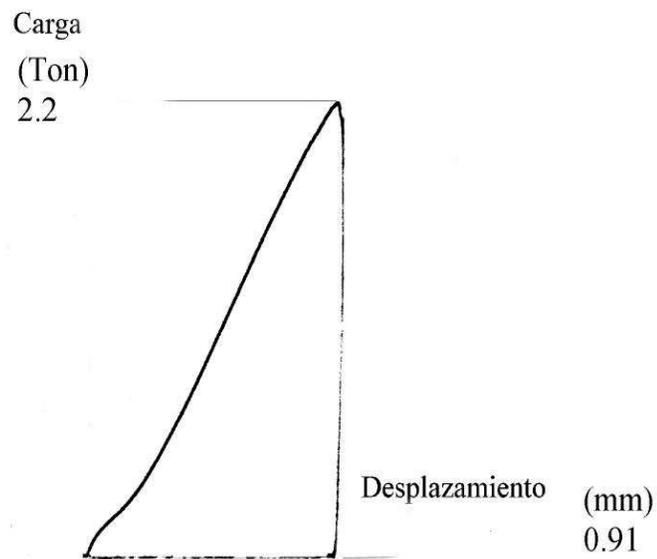


Tabla 4.10. ALUMINIZADO A 250°C. (VALORES PROMEDIO).			
Desplazamiento máx. (cm)	Carga máx.(cm)	Profundidad de la copa (mm)	Carga máx. (ton)
7	9.9	9.97	1.665

Gráfica más representativa ,del Aluminizado a 250
Ensayo Erichsen

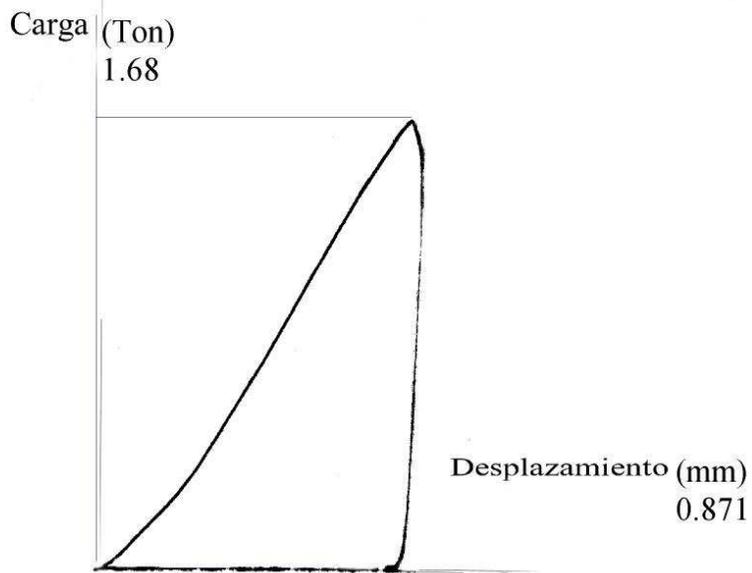


Tabla 4.11. ALUMINIZADO A 350°C. (VALORES PROMEDIO).			
Dezplazamiento máx. (cm)	Carga máx.(cm)	Profundidad de la copa (mm)	Carga máx. (ton)
4.8	9.25	10.2	1.639

Gráfica más representativa ,del Aluminizado a 350
Ensayo Erichsen

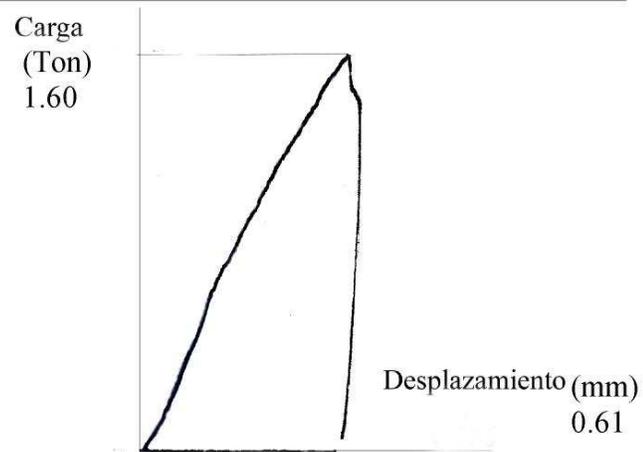


Tabla 4.12. ZINALQUIZADO DEFORMADO EN FRIO. (VALORES PROMEDIO).

Desplazamiento máx. (cm)	Carga máx. (cm)	Profundidad de la copa (mm)	Carga máx. (ton)
3.283	4.695	9.6	0.832

Gráfica más representativa, Zinalquizado a Temperatura ambiente, ensayo Erichsen

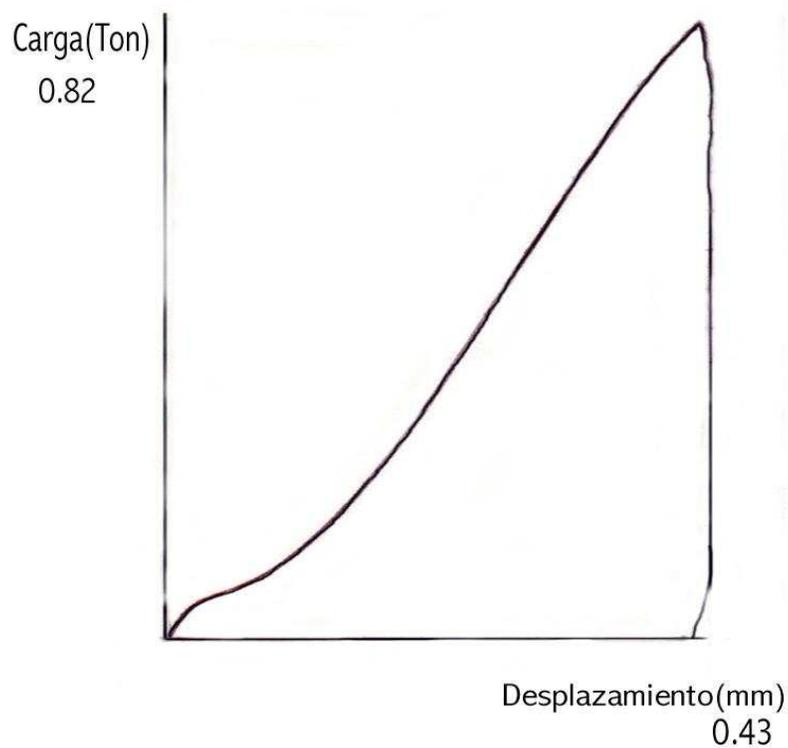


Tabla 4.13. ZINALQUIZADO A 250°C . (VALORES PROMEDIO).

Desplazamiento máx. (cm)	Carga máx.(cm)	Profundidad de la copa (mm)	Carga máx. (ton)
4.85	6.85	8	1.213

Gráfica más representativa ,del zinalquizado a 250
Ensayo Erichsen

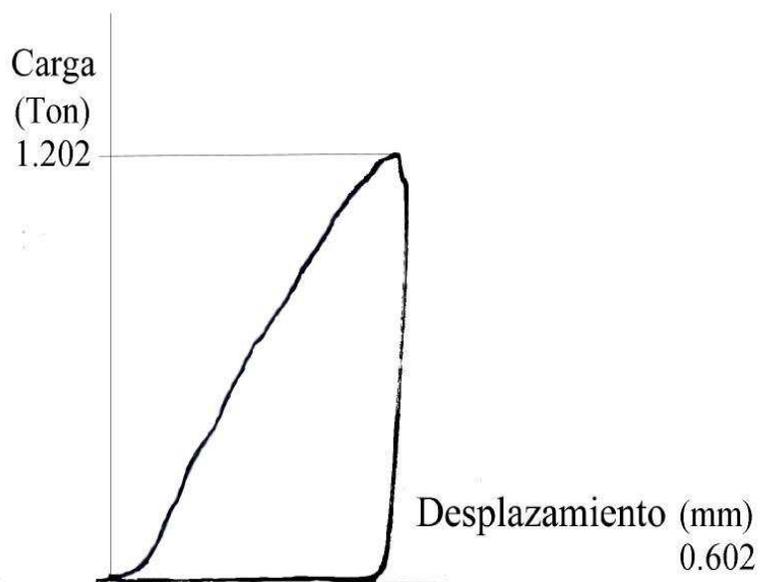
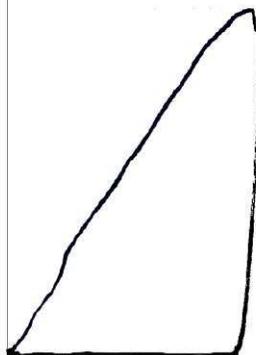


Tabla 4.14. ZINALQUIZADO A 350°C. (VALORES PROMEDIO).

Desplazamiento máx. (cm)	Carga máx.(cm)	Profundidad de la copa (mm)	Carga máx. (ton)
6.85	9.75	9.9	1.728

Gráfica más representativa del zinalquizado a 350
Ensayo Erichsen

Carga
(Ton)
1.71

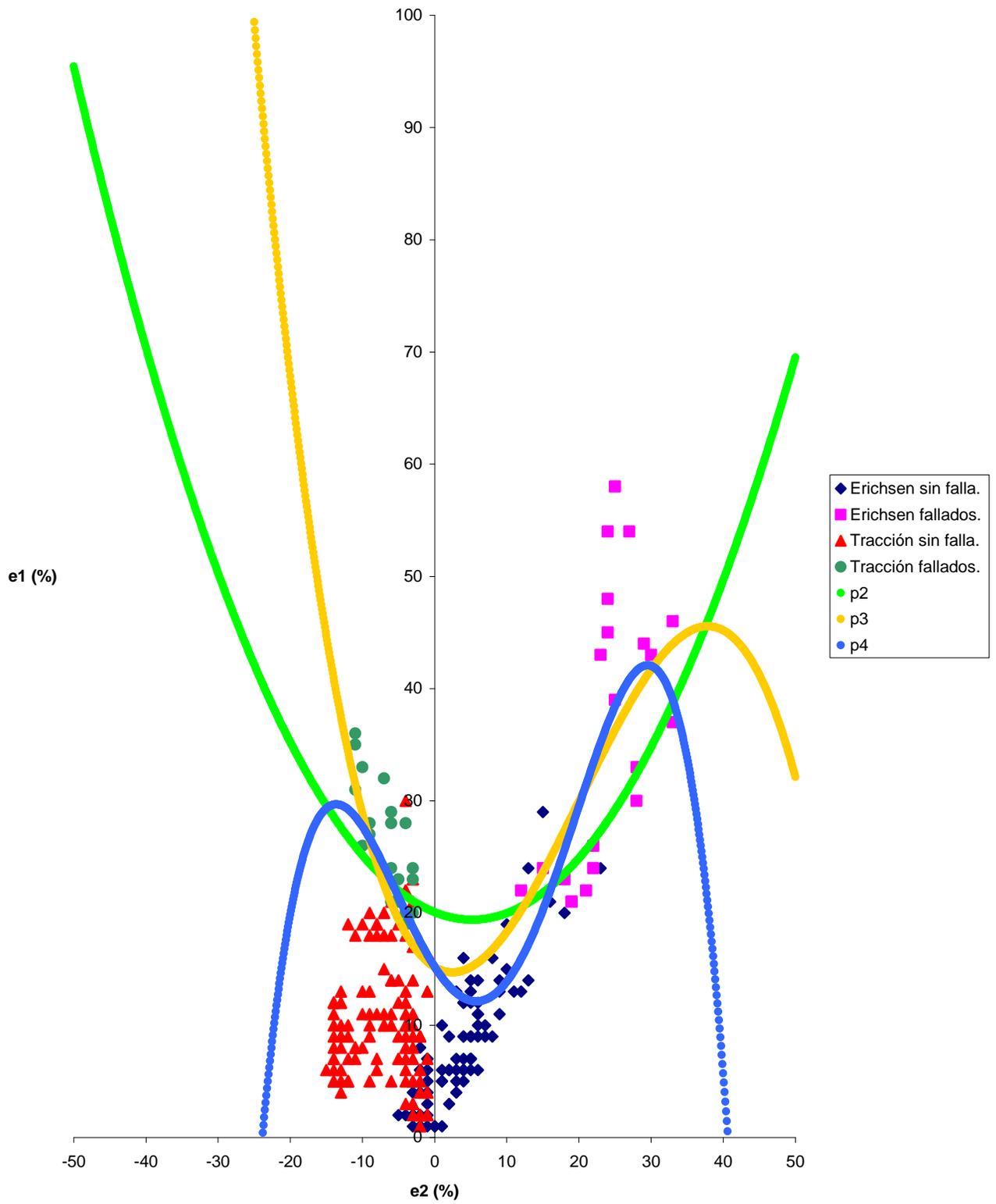


Desplazamiento (mm)
0.857

Tabla 4.15. % de deformación. Lámina aluminizada deformada en frío.

Erichsen sin falla						Erichsen fallados		Tracción sin falla									Tracción fallados		
e2	e1	e2	E1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-5	2	1	10	5	7	12	22	-15	6	-12	7	-7	10	-4	13	-2	2	-11	31
-4	2	1	5	5	6	15	24	-14	10	-12	19	-7	11	-4	8	-2	2	-11	35
-3	4	1	5	5	7	18	23	-14	8	-12	9	-7	18	-4	8	-2	6	-11	36
-3	1	2	3	5	7	19	21	-14	7	-12	5	-7	10	-4	18	-2	9	-10	26
-3	2	2	9	5	7	19	21	-14	11	-12	5	-7	10	-4	30	-2	9	-10	33
-3	2	2	6	6	10	21	22	-14	9	-12	5	-7	18	-4	11	-2	9	-9	28
-2	4	2	6	6	6	22	24	-14	12	-12	5	-7	15	-4	3	-2	9	-9	27
-2	2	3	13	6	11	22	26	-14	12	-11	7	-7	20	-4	10	-1	13	-7	32
-2	1	3	7	6	9	23	43	-14	12	-11	8	-6	10	-4	9	-1	7	-6	24
-2	8	3	4	6	12	24	48	-14	7	-11	8	-6	18	-3	11	-1	2	-6	21
-2	2	3	5	6	11	24	45	-14	5	-11	8	-6	5	-3	9	-1	2	-6	28
-2	6	3	6	6	14	24	54	-14	5	-11	18	-6	10	-3	23	-1	4	-6	29
-2	6	4	6	7	9	25	39	-14	6	-10	13	-6	11	-3	5	-1	4	-5	21
-2	4	4	6	7	10	25	58	-14	5	-10	11	-6	14	-3	8			-5	23
-2	1	4	12	8	9	27	54	-13	9	-10	8	-6	14	-3	7			-4	19
-1	5	4	16	8	16	28	33	-13	9	-10	19	-6	21	-3	5			-4	20
-1	7	4	12	9	14	28	30	-13	12	-9	10	-5	19	-3	2			-4	19
-1	3	4	9	9	13	29	44	-13	13	-9	11	-5	7	-3	3			-4	28
-1	7	4	9	9	11	30	43	-13	10	-9	5	-5	9	-3	9			-3	24
-1	4	4	5	10	15	33	37	-13	9	-9	13	-5	7	-3	21			-3	23
-1	6	4	6	10	19	33	46	-13	8	-9	18	-5	14	-3	17			-3	20
-1	5	4	7	11	13			-13	6	-9	20	-5	12	-3	14				
-1	4	5	9	12	13			-13	12	-9	9	-4	7	-3	10				
-1	2	5	9	13	24			-13	4	-8	18	-4	22	-3	3				
-1	1	5	9	13	14			-13	5	-8	19	-4	22	-3	3				
0	1	5	7	15	29			-13	5	-8	11	-4	5	-2	17				
0	1	5	13	16	21			-13	5	-8	7	-4	12	-2	5				
1	1	5	14	18	20			-13	5	-8	19	-4	10	-2	4				
1	6	5	12	23	24			-12	10	-8	6	-4	6	-2	1				

Gráfica 4.19. Lámina aluminizada deformada en frío. Regresiones lineales.



Gráfica 4.20. Lámina aluminizada deformada en frío. Curva ajustada.

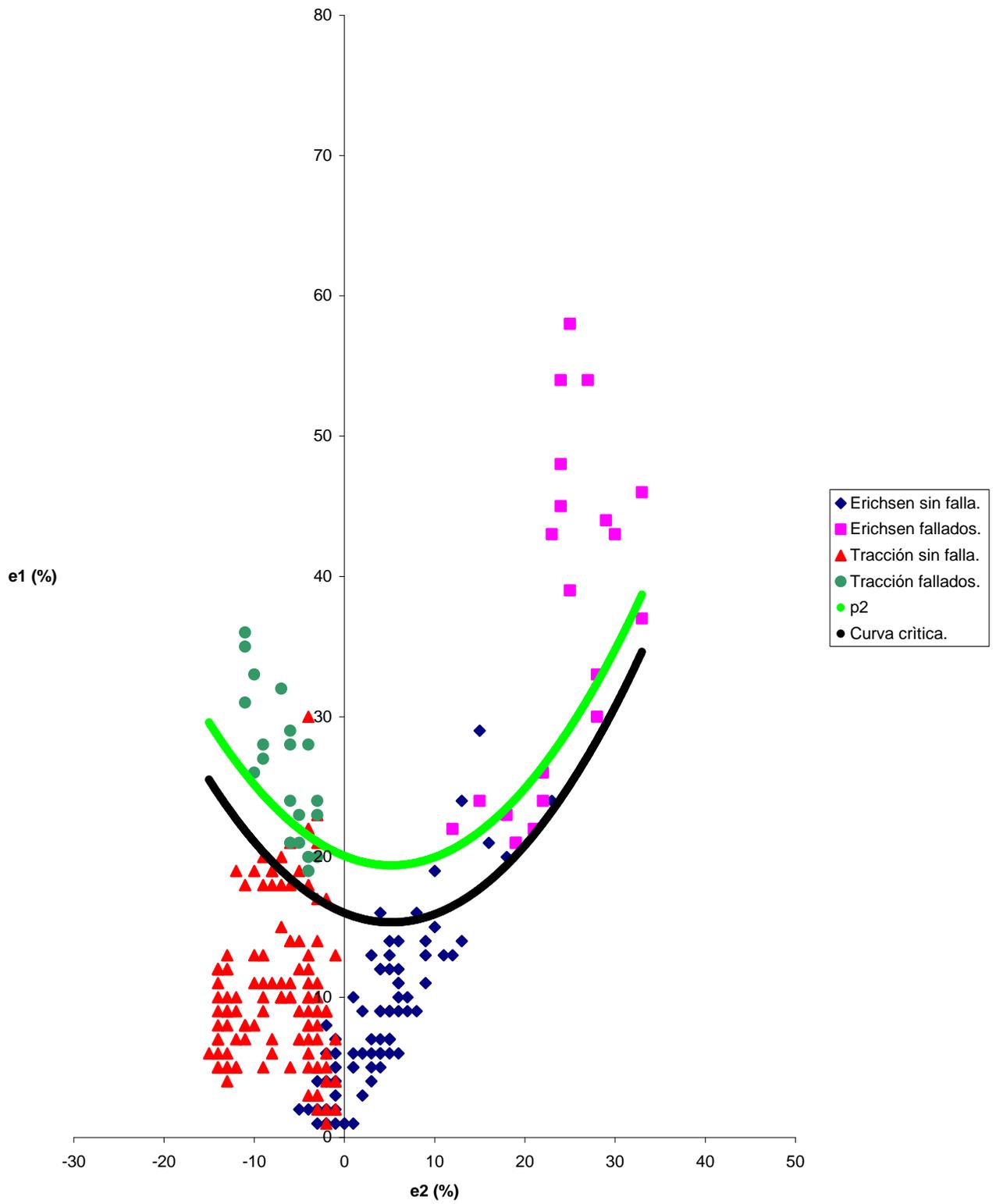
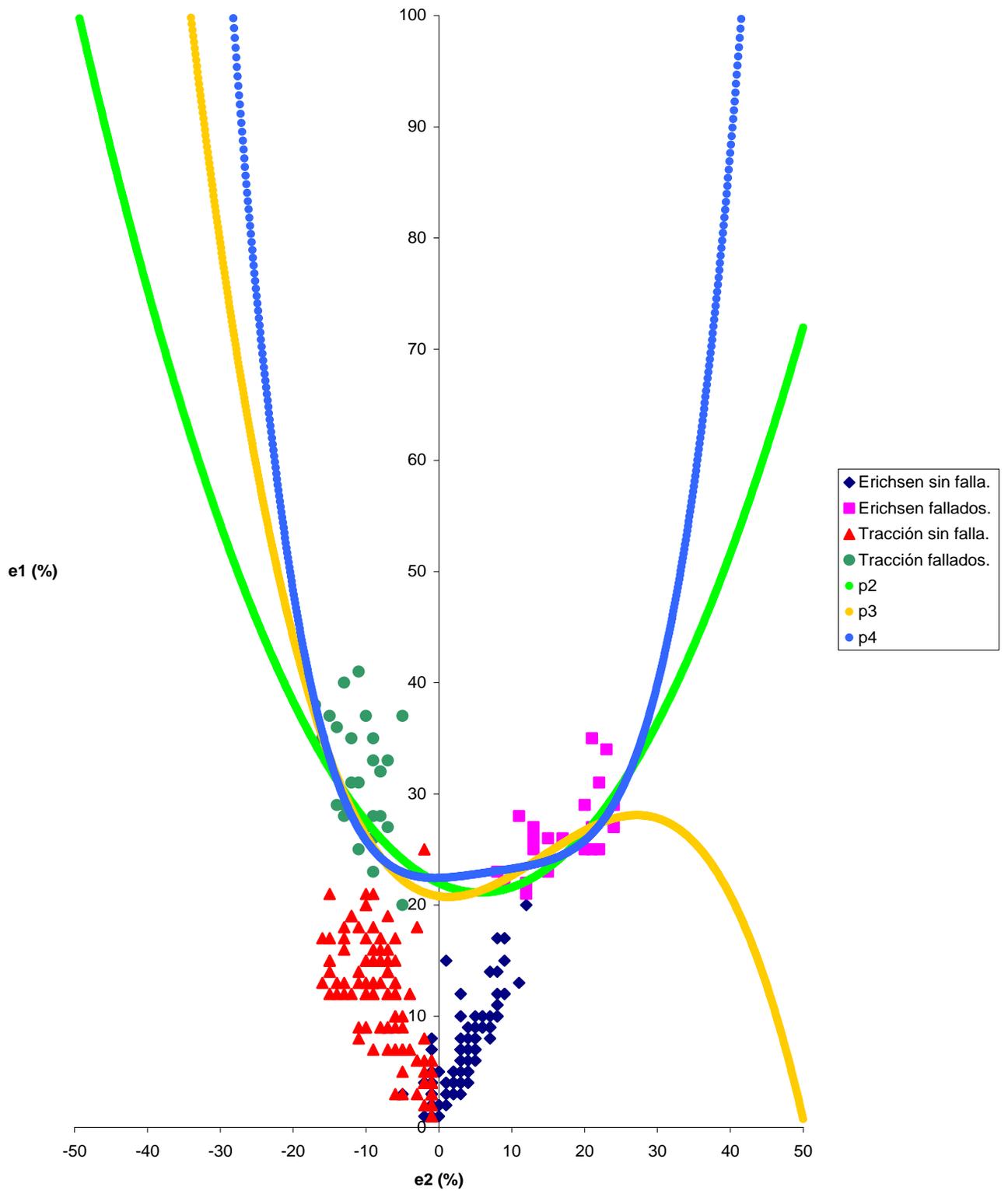


Tabla 4.16. % de deformación. Lámina aluminizada deformada en caliente a 250 °C.

Erichsen sin falla						Erichsen fallados		Tracción sin falla								Tracción fallados	
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
4	5	2	3	5	9	8	23	-16	17	-10	13	-6	10	-1	6	-17	38
-5	3	2	4	5	8	9	22	-16	13	-10	9	-6	12	-1	4	-16	35
-2	4	2	4	5	9	11	28	-15	15	-10	21	-6	3	-1	2	-15	37
-2	1	3	4	5	7	12	22	-15	14	-9	18	-6	12	-1	1	-14	29
-2	4	3	12	5	7	12	21	-15	21	-9	15	-6	13	-1	3	-14	36
-1	4	3	7	6	10	13	25	-15	15	-9	21	-6	15	-1	4	-13	29
-1	2	3	6	6	9	13	26	-15	12	-9	15	-6	17	-1	1	-13	40
-1	2	3	4	6	9	13	27	-15	17	-9	16	-6	12	-1	4	-13	28
-1	2	3	10	6	10	15	23	-15	17	-9	13	-6	7	-1	6	-12	31
-1	4	3	7	6	9	15	26	-14	13	-9	13	-6	9	-1	5	-12	35
-1	2	3	4	6	9	17	26	-14	12	-9	12	-6	7	-1	3	-11	25
-1	5	3	7	7	8	20	29	-13	16	-9	13	-6	10			-11	31
-1	7	3	5	7	14	20	25	-13	18	-9	7	-6	13			-11	41
-1	1	3	4	7	10	21	35	-13	13	-9	12	-5	3			-10	27
-1	8	3	8	7	9	21	25	-13	17	-8	15	-5	10			-10	27
-1	4	3	6	7	9	21	27	-13	12	-8	17	-5	5			-10	37
-1	3	3	3	7	9	22	25	-12	19	-8	15	-5	7			-9	23
-1	3	4	9	7	9	22	31	-12	19	-8	15	-5	7			-9	35
-1	4	4	5	8	11	23	34	-12	12	-8	13	-5	9			-9	33
0	1	4	5	8	10	24	27	-12	19	-8	9	-4	12			-9	26
0	2	4	5	8	10	24	29	-11	9	-8	9	-4	7			-9	28
0	5	4	7	8	14			-11	13	-8	17	-3	18			-8	32
0	2	4	6	8	10			-11	14	-8	16	-3	3			-8	32
1	3	4	8	8	12			-11	8	-7	19	-3	6			-8	28
1	4	4	4	8	17			-11	18	-7	14	-3	6			-7	27
1	15	4	4	8	11			-10	20	-7	14	-2	25			-7	33
1	4	4	7	9	15			-10	12	-7	15	-2	4			-5	20
1	4	4	5	9	17			-10	17	-7	14	-2	4			-5	37
1	2	5	8	9	17			-10	12	-7	9	-2	2				
2	5	5	7	9	12			-10	9	-7	9	-2	5				
2	5	5	8	9	12			-10	12	-7	16	-2	6				
2	4	5	6	11	13			-10	20	-7	12	-2	8				
2	4	5	10	12	20			-10	15	-7	12	-2	4				
2	3	5	6					-10	15	-7	7	-1	4				

Gráfica 4.21. Lamina aluminizada deformada en caliente a 250 °C. Regresiones lineales.



Gráfica 4.22. Lamina aluminizada deformada en caliente a 250 °C. Curva ajustada.

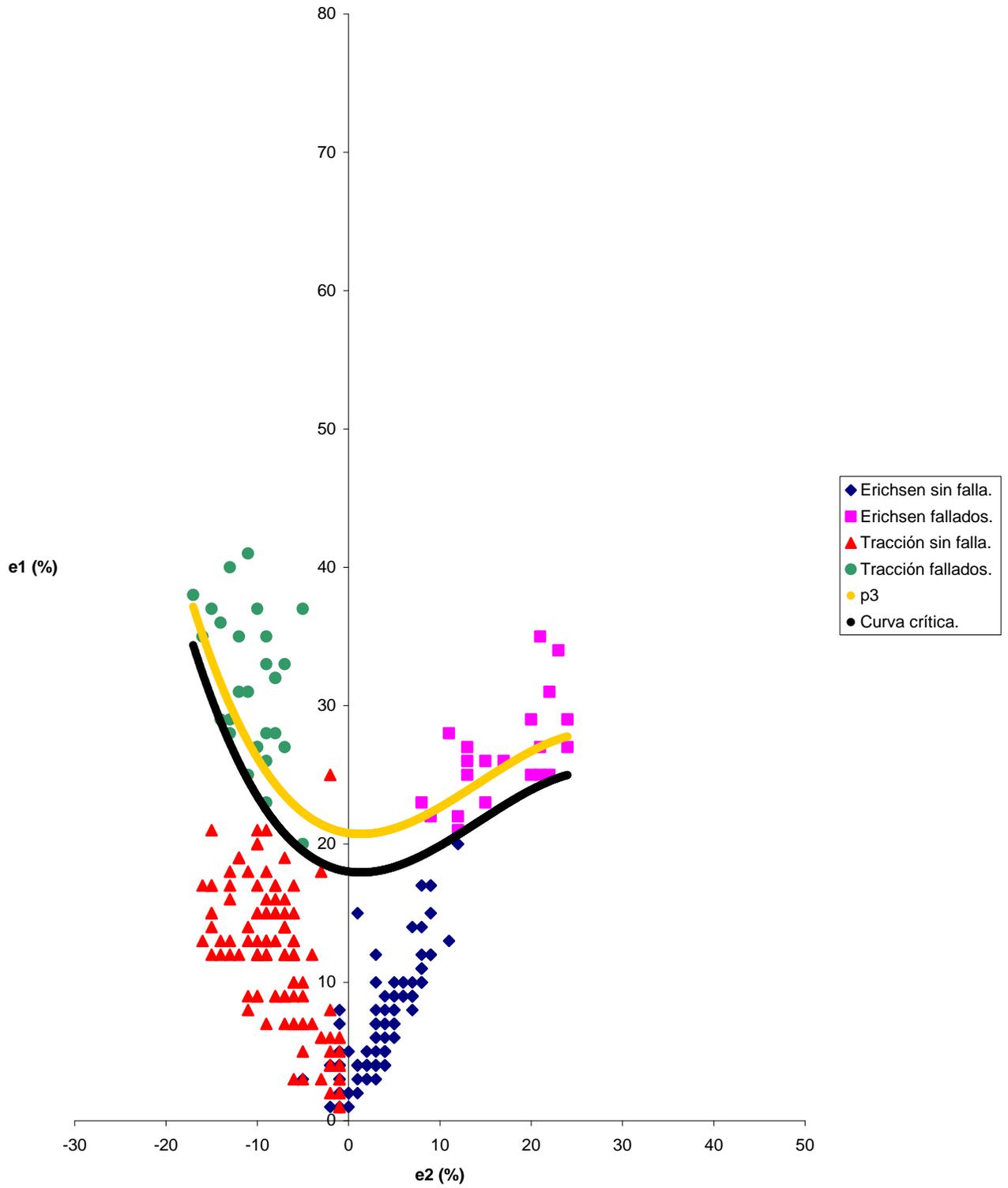
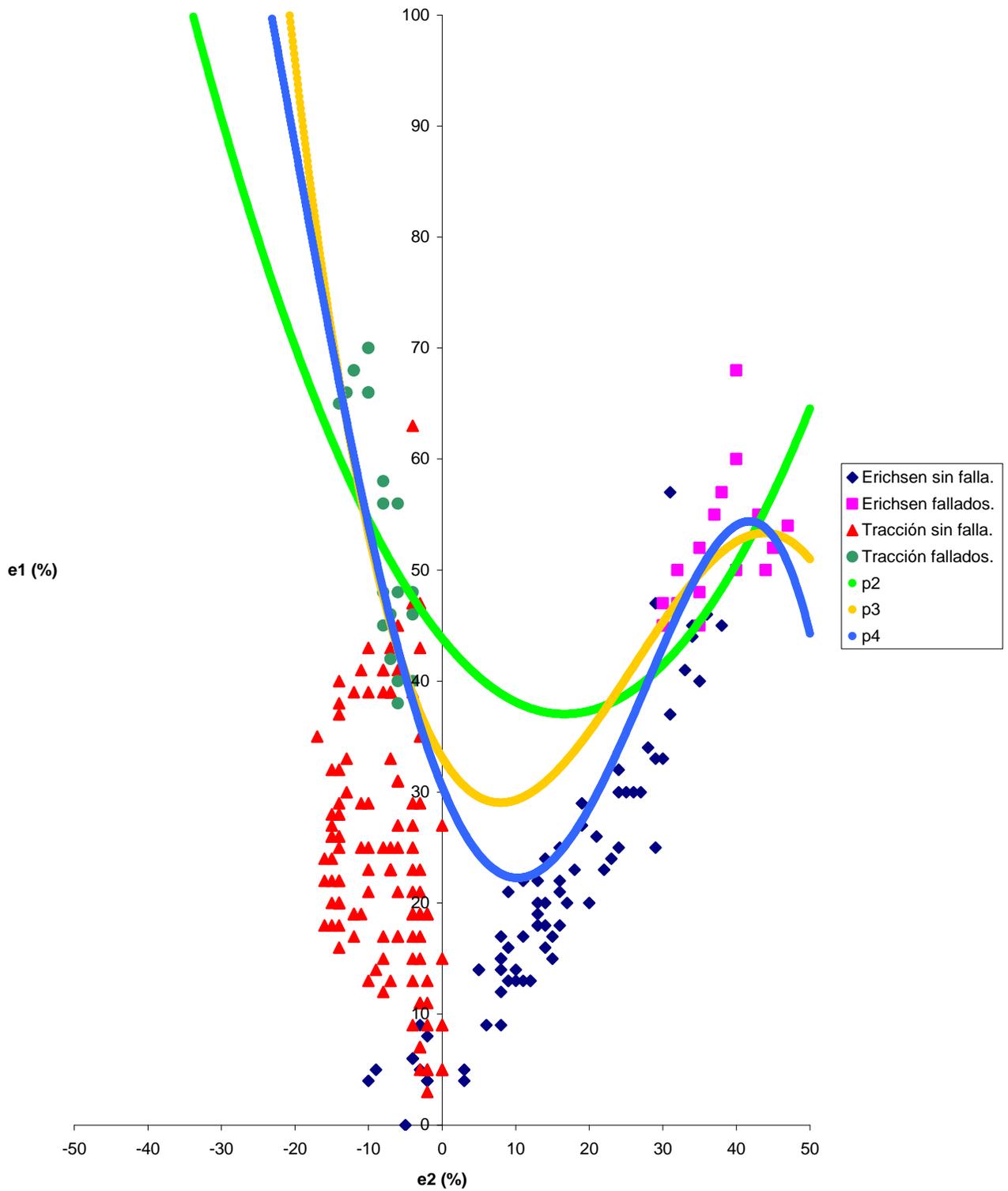


Tabla 4.17 % de deformación. Lámina aluminizada deformada en caliente a 350 °C.

Erichsen sin falla						Erichsen fallados		Tracción sin falla									Tracción fallados		
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-10	4	11	22	25	30	30	45	-17	35	-14	20	-7	23	-4	29	-2	5	-14	65
-9	5	12	13	26	30	30	45	-16	24	-14	29	-7	25	-4	19	-2	5	-13	66
-5	0	12	13	27	30	30	47	-16	22	-14	38	-7	39	-4	19	-2	13	-12	68
-4	6	13	20	28	34	32	47	-16	18	-13	30	-7	23	-4	39	-2	19	-12	68
-4	6	13	18	29	25	32	50	-15	28	-13	33	-7	23	-4	63	-2	19	-10	66
-3	5	13	19	29	47	35	52	-15	24	-12	17	-7	39	-4	25	-2	19	-10	66
-3	9	13	18	29	33	35	45	-15	20	-12	19	-7	33	-4	9	-2	19	-10	70
-2	8	13	22	30	33	35	48	-15	26	-12	19	-7	43	-4	21	0	27	-10	70
-2	4	14	24	31	57	37	55	-15	27	-12	19	-7	23	-4	19	0	15	-8	48
-2	4	14	16	31	37	38	57	-15	26	-12	39	-7	39	-3	23	0	5	-8	45
3	5	14	20	33	41	40	68	-15	26	-11	29	-7	13	-3	19	0	5	-8	56
3	4	14	18	34	45	40	60	-15	32	-11	25	-7	23	-3	47	0	9	-8	58
5	14	15	15	34	44	40	50	-15	18	-11	19	-6	25	-3	11	0	9	-7	42
5	14	15	17	35	40	43	55	-15	22	-11	41	-6	31	-3	17			-7	46
6	9	16	25	35	40	44	50	-14	25	-10	23	-6	31	-3	15			-6	48
8	15	16	22	36	46	45	52	-14	32	-10	25	-6	45	-3	11			-6	40
8	15	16	18	38	45	47	54	-14	20	-10	13	-6	41	-3	5			-6	38
8	9	16	21					-14	20	-10	29	-6	17	-3	7			-6	56
8	17	17	20					-14	26	-10	39	-6	21	-3	19			-4	48
8	14	18	23					-14	28	-10	43	-6	17	-3	43			-4	46
8	12	19	27					-14	22	-10	21	-6	31	-3	35			-4	40
9	16	19	29					-14	20	-9	14	-6	27	-3	29				
9	13	20	20					-14	18	-8	39	-4	17	-3	21				
9	21	21	26					-14	28	-8	41	-4	47	-3	7				
9	13	22	23					-14	26	-8	25	-4	47	-3	7				
10	14	23	24					-14	37	-8	17	-4	13	-2	35				
10	13	24	25					-14	22	-8	41	-4	27	-2	11				
11	17	24	30					-14	16	-8	15	-4	23	-2	9				
11	13	24	32					-14	40	-8	12	-4	15	-2	3				

Gráfica 4.23. Lámina aluminizada deformada en caliente a 350 °C. Regresiones lineales.



Gráfica 4.24. Lámina aluminizada deformada en caliente a 350 °C. Curva ajustada.

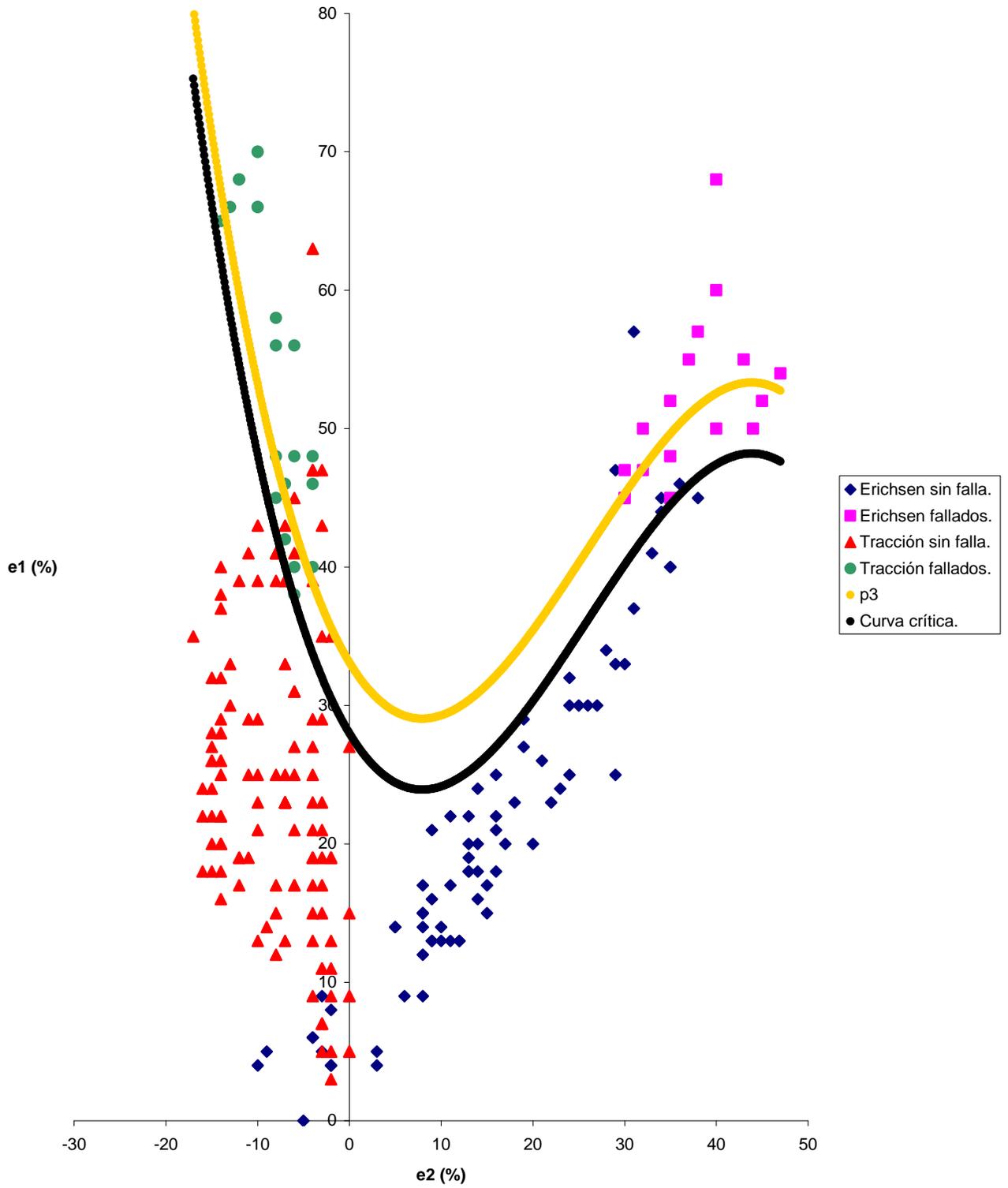
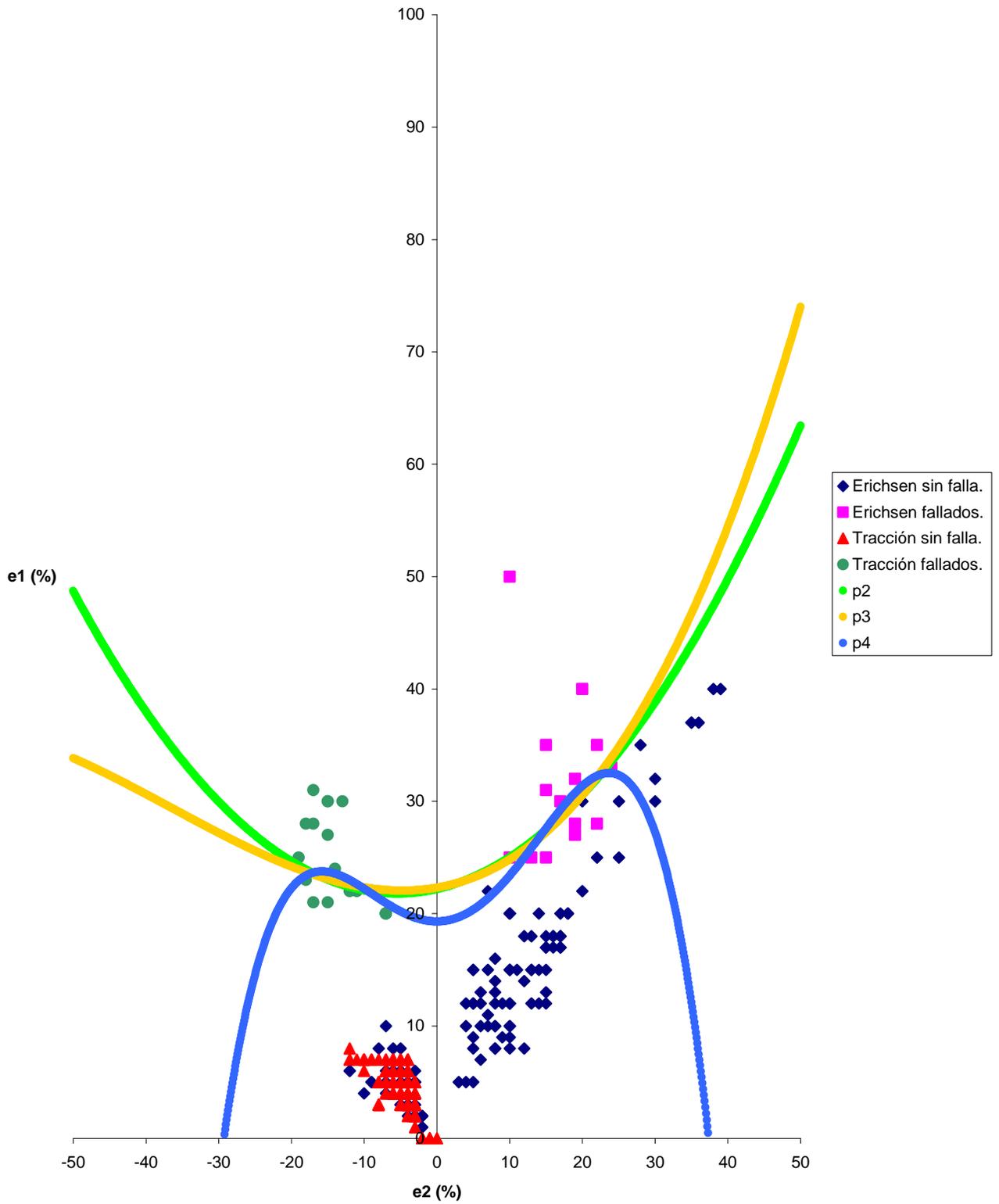


Tabla 4.18. % de deformación. Lámina zinalquizada deformada en frío.

Erichsen sin falla						Erichsen fallados		Tracción sin falla								Tracción fallados	
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-12	6	5	8	13	15	10	50	-12	7	-6	4	-5	4	-4	4	-19	25
-12	6	5	9	13	15	10	25	-12	7	-6	4	-5	3	-3	2	-18	28
-10	4	5	5	13	18	13	25	-12	8	-6	4	-5	3	-3	2	-18	23
-9	5	6	13	14	12	15	35	-11	7	-6	5	-5	3	-3	1	-17	31
-9	5	6	10	14	15	15	25	-10	7	-6	7	-5	5	-3	2	-17	21
-8	8	6	12	14	20	15	31	-10	7	-6	7	-5	5	-3	2	-17	28
-7	6	6	7	15	12	17	30	-10	6	-6	7	-4	3	-3	2	-15	21
-7	10	7	11	15	13	19	32	-10	7	-6	7	-4	3	-3	2	-15	30
-7	4	7	15	15	18	19	27	-10	7	-6	7	-4	4	-3	4	-15	30
-7	5	7	22	15	17	19	28	-10	7	-6	7	-4	2	-3	4	-15	27
-6	6	7	10	15	15	20	40	-10	7	-6	7	-4	4	-3	4	-14	24
-6	8	8	12	15	17	22	28	-10	7	-6	7	-4	4	-3	4	-14	23
-5	5	8	14	16	18	22	35	-9	7	-6	7	-4	4	-3	4	-14	23
-5	3	8	16	16	17	24	33	-9	7	-6	6	-4	6	-3	3	-13	30
-5	3	8	10	16	18			-9	7	-6	7	-4	6	-3	3	-12	22
-5	8	8	8	17	20			-8	7	-6	6	-4	6	-3	3	-11	22
-5	6	8	13	17	17			-8	3	-6	6	-4	6	-3	3	-7	20
-4	3	8	8	17	18			-8	3	-6	6	-4	6	-3	3	-7	20
-4	3	8	10	17	18			-8	3	-6	4	-4	6	-3	2	-7	20
-4	3	9	9	17	17			-8	3	-5	3	-4	6	-3	3	-7	20
-4	2	9	12	18	20			-8	3	-5	5	-4	6	-3	3		
-4	5	10	9	18	20			-8	5	-5	7	-4	6	-3	5		
-3	2	10	20	20	22			-8	5	-5	6	-4	5	-3	5		
-3	2	10	8	20	30			-8	5	-5	7	-4	5	-3	5		
-3	5	10	20	22	25			-7	5	-5	7	-4	7	-3	3		
-3	6	10	15	25	25			-7	6	-5	7	-4	7	-3	3		
-3	3	10	15	25	30			-7	6	-5	7	-4	7	-3	3		
-3	5	10	10	28	35			-7	6	-5	7	-4	7	-3	2		
-2	2	10	12	30	32			-7	4	-5	6	-4	4	-2	0		
-2	1	10	20	30	30			-7	6	-5	6	-4	5	-2	0		
-2	2	10	12	35	37			-7	7	-5	6	-4	5	-1	0		
3	5	10	12	35	37			-7	7	-5	6	-4	6	-1	0		
4	12	10	10	36	37			-7	4	-5	4	-4	6	-1	0		
4	10	10	15	38	40			-6	5	-5	4	-4	6	0	0		
4	5	11	15	39	40			-6	5	-5	4	-4	6				
5	12	12	8					-6	5	-5	4	-4	3				
5	15	12	18					-6	5	-5	4	-4	3				
5	15	12	14					-6	4	-5	4	-4	3				
5	12	13	12					-6	4	-5	4	-4	3				

Gráfica 4.25. Lámina zinalquizada deformada en frío. Regresiones lineales.



Gráfica 4.26. Lámina zinalquizada deformada en frío. Curva ajustada.

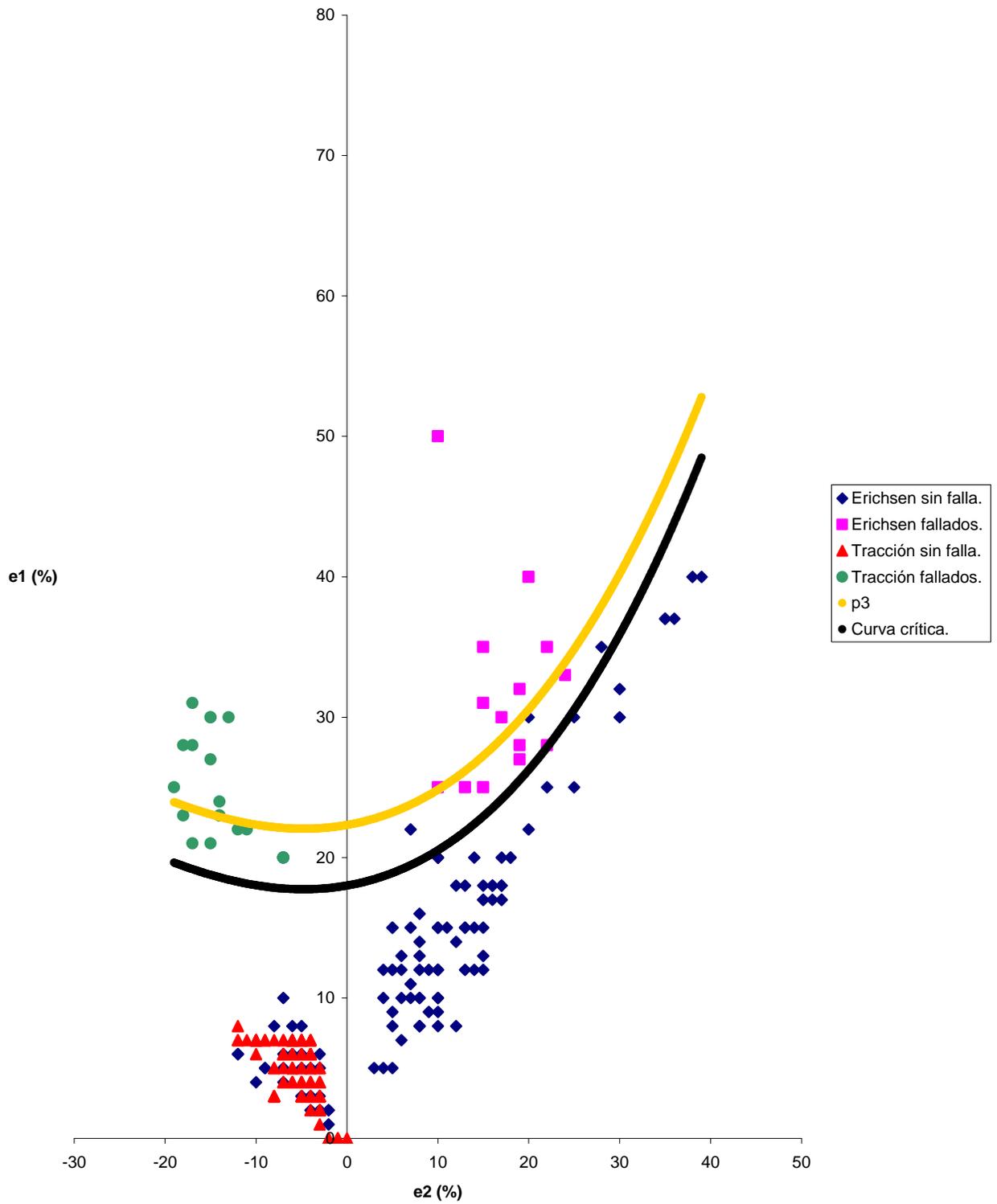
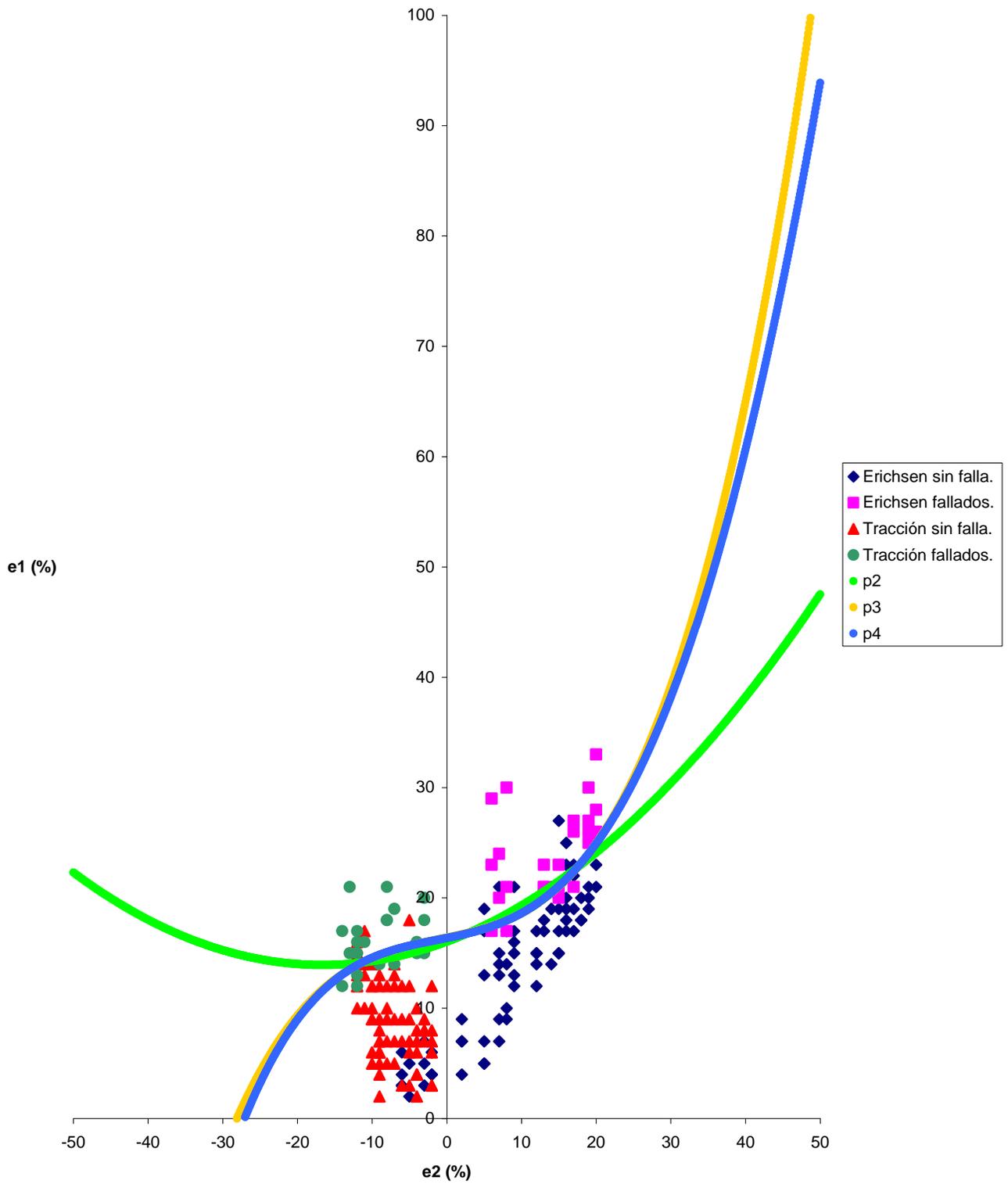


Tabla 4.19. % de deformación. Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250 °C.

Erichsen sin falla						Erichsen fallados		Tracción sin falla						Tracción fallados	
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-6	6	7	13	15	21	6	23	-12	16	-9	6	-5	12	-14	17
-6	4	7	14	15	20	6	29	-12	13	-9	7	-5	18	-14	12
-6	3	7	9	15	15	6	17	-12	10	-9	4	-4	8	-13	15
-6	3	8	9	15	17	7	24	-12	15	-9	2	-4	6	-13	21
-5	5	8	10	15	27	7	20	-12	12	-9	5	-4	2	-12	12
-5	2	8	14	15	19	8	17	-12	12	-8	5	-4	4	-12	17
-3	5	8	17	16	19	8	21	-11	13	-8	9	-4	4	-12	16
-3	7	9	17	16	20	8	30	-11	14	-8	12	-4	7	-12	15
-3	3	9	21	16	25	13	21	-11	17	-8	10	-4	10	-12	13
-2	4	9	13	16	23	13	21	-11	10	-8	9	-4	4	-11	16
-2	4	9	16	16	18	13	23	-11	10	-8	7	-3	7	-9	14
-2	6	9	12	16	19	15	21	-10	10	-7	7	-3	9	-8	18
2	4	9	15	16	17	15	20	-10	9	-7	12	-3	8	-8	18
2	7	12	17	17	19	15	23	-10	12	-7	14	-3	8	-8	21
2	7	12	15	17	23	17	27	-10	14	-7	5	-2	6	-7	19
2	9	12	12	17	17	17	26	-10	12	-7	13	-2	12	-7	14
5	17	12	15	17	22	17	21	-10	6	-7	9	-2	8	-4	15
5	19	12	20	18	18	19	26	-10	5	-6	9	-2	7	-4	16
5	13	12	14	18	20	19	25	-10	9	-6	12	-2	3	-3	18
5	7	13	17	18	18	19	27	-9	9	-6	7	-2	3	-3	15
5	5	13	18	19	21	19	30	-9	8	-6	3			-3	20
5	5	14	14	19	19	20	26	-9	12	-5	3				
7	7	14	19	19	20	20	33	-9	13	-5	7				
7	15	14	21	20	23	20	25	-9	7	-5	9				
7	21	15	15	20	21	20	28	-9	6	-5	6				

Gráfica 4.27. Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250 °C. Regresiones lineales.



Gráfica 4.28. Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250 °C. Curva ajustada.

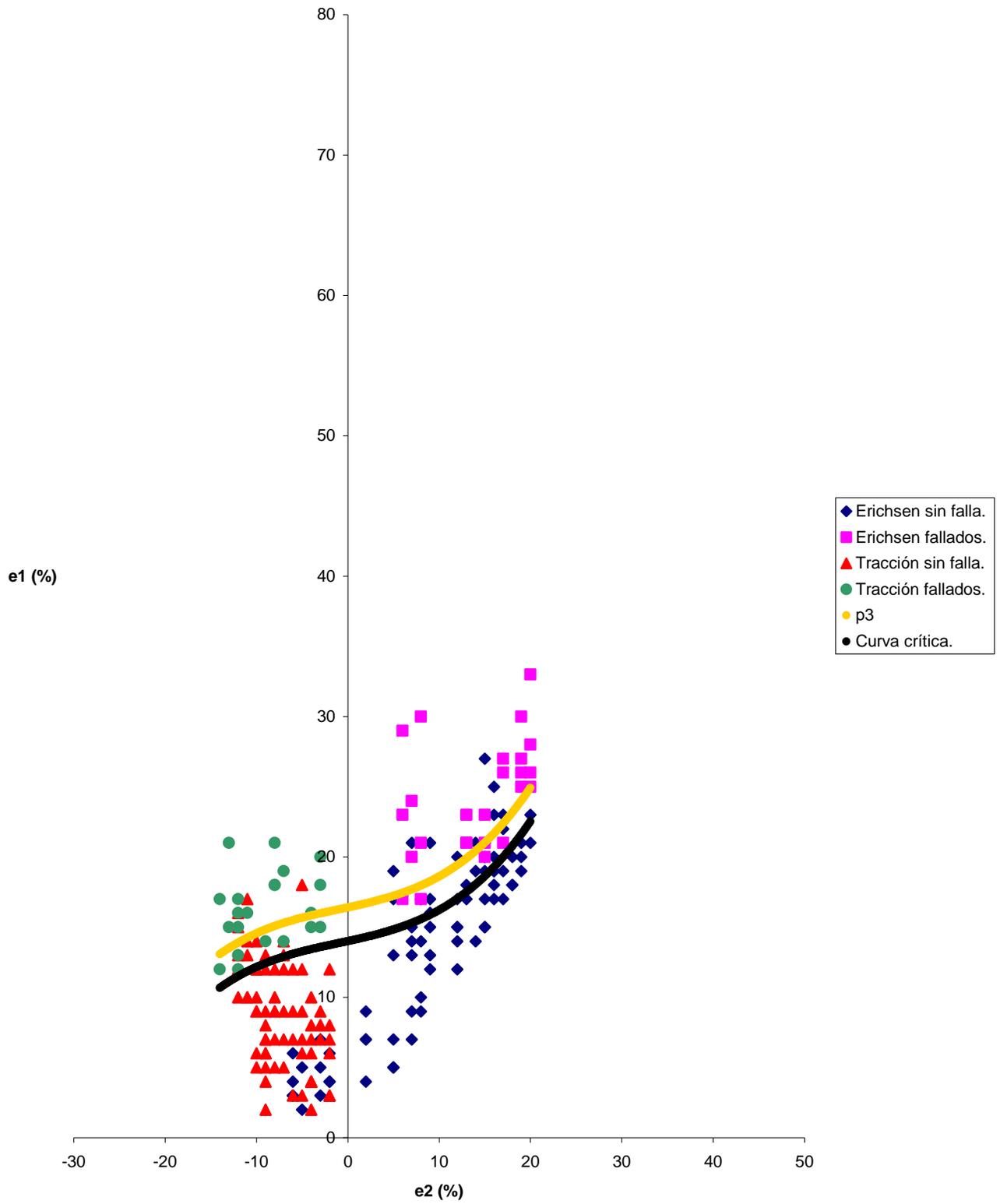
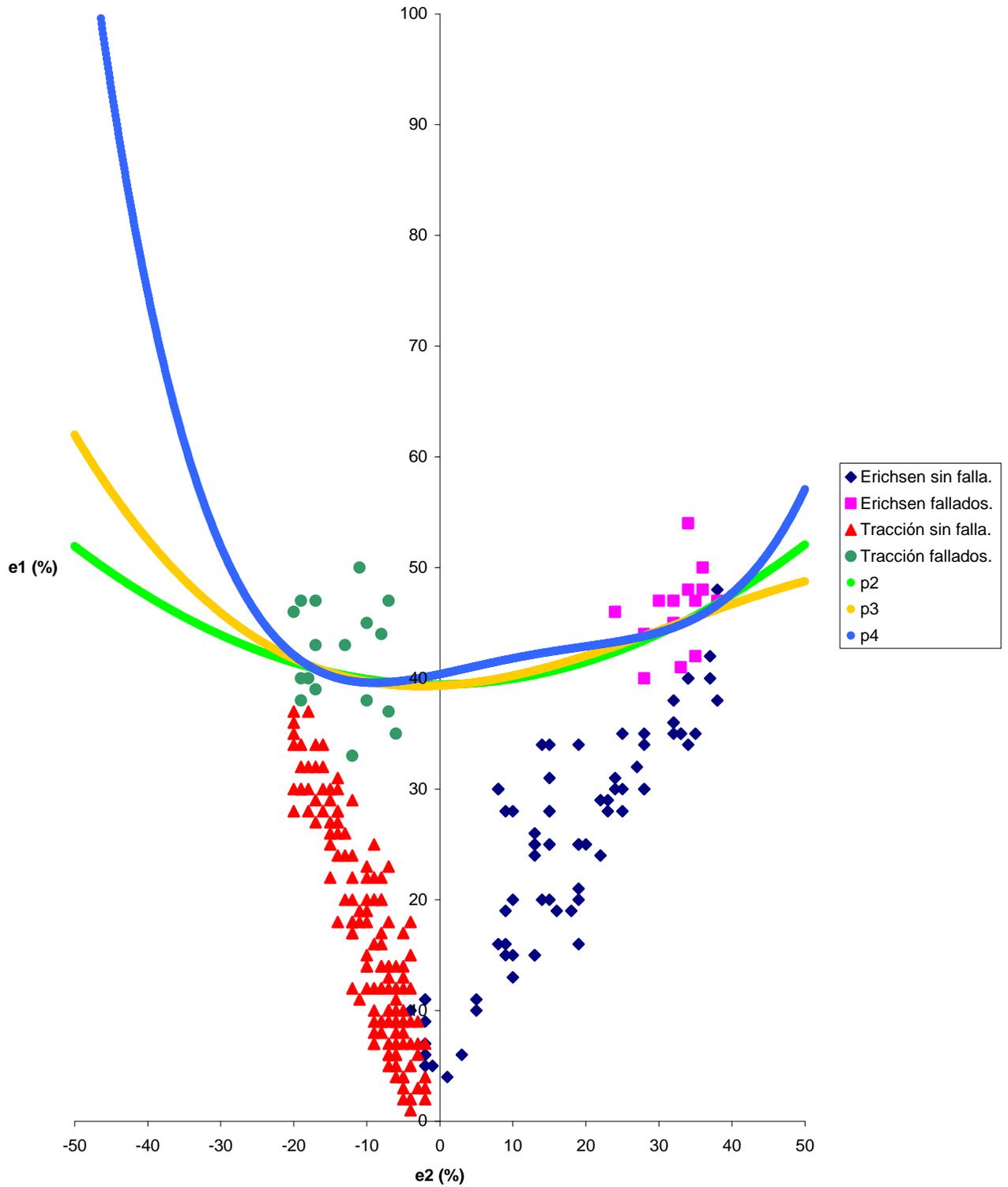


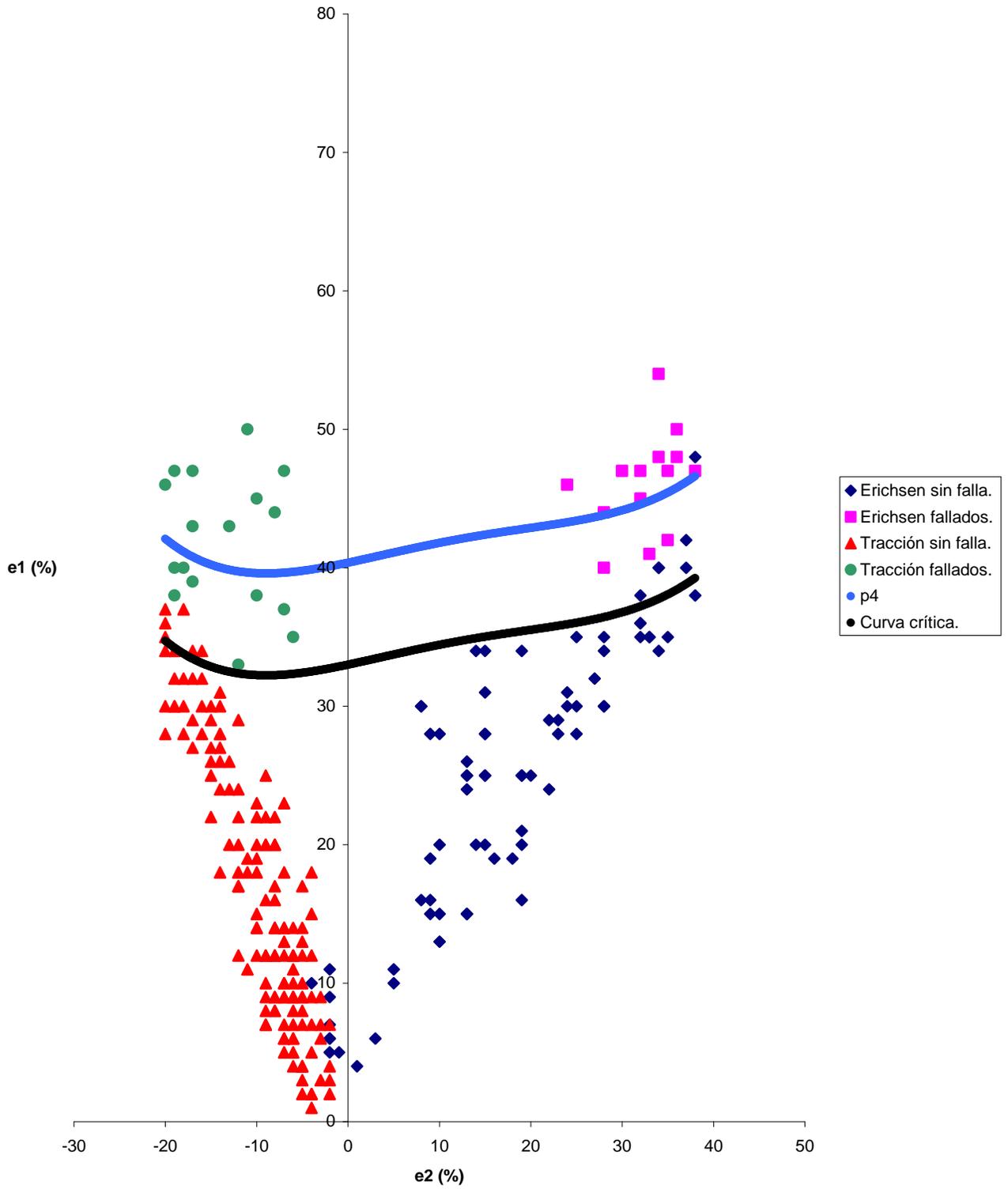
Tabla 4.20. % de deformación. Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350 °C.

Erichsen sin falla				Erichsen fallados		Tracción sin falla								Tracción fallados	
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-4	10	18	19	24	46	-20	34	-12	29	-8	8	-5	9	-20	46
-2	11	19	34	28	44	-20	35	-12	12	-8	20	-5	3	-19	40
-2	6	19	16	28	40	-20	30	-12	17	-8	12	-5	4	-19	47
-2	7	19	21	30	47	-20	28	-12	18	-8	16	-5	2	-19	38
-2	6	19	25	32	45	-20	37	-12	22	-8	20	-5	10	-18	40
-2	9	19	20	32	47	-20	36	-12	24	-8	22	-5	17	-17	43
-2	5	19	25	33	41	-19	30	-12	20	-8	14	-5	14	-17	47
-1	5	20	25	34	54	-19	32	-12	18	-7	9	-5	13	-17	39
1	4	22	29	34	48	-19	34	-12	17	-7	13	-5	12	-13	43
3	6	22	24	35	42	-19	30	-11	11	-7	5	-4	2	-12	33
5	10	23	28	35	47	-18	28	-11	18	-7	6	-4	7	-11	50
5	11	23	29	36	48	-18	37	-11	19	-7	9	-4	5	-10	45
8	16	24	30	36	50	-18	30	-10	22	-7	14	-4	2	-10	38
8	30	24	31	38	47	-18	32	-10	20	-7	10	-4	1	-8	44
8	30	25	35			-17	34	-10	15	-7	7	-4	9	-7	37
9	19	25	30			-17	27	-10	14	-7	6	-4	15	-7	47
9	28	25	28			-17	29	-10	12	-7	12	-4	18	-6	35
9	16	27	32			-17	32	-10	19	-7	10	-4	12		
9	15	28	30			-16	30	-10	23	-7	23	-3	7		
10	13	28	30			-16	32	-10	18	-7	18	-3	3		
10	20	28	34			-16	34	-10	14	-7	14	-3	6		
10	28	28	35			-16	28	-9	9	-6	11	-3	9		
10	15	32	36			-15	25	-9	7	-6	9	-2	2		
13	15	32	38			-15	29	-9	12	-6	6	-2	4		
13	24	32	36			-15	30	-9	16	-6	4	-2	3		
13	26	32	35			-15	27	-9	20	-6	5	-2	7		
13	25	33	35			-15	22	-9	22	-6	7				
13	15	33	35			-15	26	-9	12	-6	9				
13	25	34	34			-14	28	-9	10	-6	8				
14	20	34	40			-14	26	-9	8	-6	12				
14	34	34	40			-14	30	-9	7	-6	6				
15	20	35	35			-14	18	-9	25	-6	9				
15	28	37	40			-14	24	-9	20	-6	14				
15	25	37	42			-14	28	-8	14	-6	12				
15	34	38	48			-14	31	-8	9	-6	10				
15	28	38	38			-14	27	-8	8	-5	9				
15	31					-13	26	-8	12	-5	7				
15	25					-13	24	-8	17	-5	8				
16	19					-13	20	-8	9	-5	4				

Gráfica 4.29. Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350 °C. Regresiones lineales.



Gráfica 4.30. Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350 °C. Curva ajustada.



4.3 Análisis de resultados

Para este análisis utilizaremos las tablas y gráficas presentadas en el punto anterior (4.2).

En las tablas 4.2 a 4.7 (ensayos de tracción), se pueden observar algunas propiedades mecánicas de las laminas estudiadas.

La deformación promedio de cada lámina obtenida de los promedios de las deformaciones máximas a tracción en las direcciones longitudinal, a 45 grados y transversal, se muestran en la siguiente tabla:

Deformación promedio a tracción (%)

<i>Deformación</i>	<i>Al a 0°</i>	<i>Al a 45°</i>	<i>Al a 90°</i>	<i>Promedios</i>
en frío	10.15	10.75	8.955	9.95166667
en caliente a 250°C	10.87	11.6	10.7	11.05666667
en caliente a 350°C	14.58	19.97	10.75	15.1

<i>Deformación</i>	<i>ZiAlCu a 0°</i>	<i>ZiAlCu a 45°</i>	<i>ZiAlCu a 90°</i>	<i>Promedios</i>
en frío	1.864	3.331	1.701	2.29866667
en caliente a 250°C	4.699	3.393	2.268	3.45333333
en caliente a 350°C	7.681	5.017	4.348	5.682

Tabla 4.21. Tabla comparativa de la deformación en los ensayos de tracción.

Los resultados de la anisotropía (ver tabla 4.8), en los que se obtienen los valores de anisotropía normal (r_m) y anisotropía plana (Δ_r) los podemos interpretar de la siguiente manera:

- $r_m=1$, si se cumple esta igualdad entendemos que la lámina al momento de deformarse, lo hará de igual forma, tanto en el plano como en el espesor. De aquí podemos concluir que las láminas mas aptas para un proceso de conformado son la aluminizada deformada en frío y la zinalquizada deformada en frío.
- $\Delta_r=0$, al cumplirse esta otra igualdad lo que esperamos es que no existan variaciones en la deformación de la lámina. Lo que nos lleva a concluir que las láminas que nos ayudaran a obtener productos con espesores mas regulares son la aluminizada deformada en caliente a 350 °C y la zinalquizada deformada en caliente a 350 °C.

Si combinamos ambos criterios, podemos decir en términos generales, que las láminas deformadas en caliente tienen espesores mas regulares y por consiguiente sus propiedades se conservaran mejor a lo largo de la pieza a producir.

La tabla siguiente (4.22) contiene los valores promedio de la profundidad de la copa Erichsen, para cada lámina.

Descripción	Profundidad (mm)
Lámina aluminizada deformada en frío.	9.6
Lámina aluminizada deformada en caliente a 250°C.	9.97
Lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C.	10.2
Lámina zinalquizada deformada en frío.	9.6
Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250°C.	8
Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350°C.	9.9

Tabla 4.22. Tabla comparativa de la profundidad de la copa Erichsen.

Esta tabla muestra que la lámina con mayor capacidad de deformación es la aluminizada deformada en caliente a 350°C, seguida de la aluminizada deformada en caliente a 250°C, posteriormente sigue la zinalquizada deformada en cliente a 350°C, luego la aluminizada deformada en frío junto con la zinalquizada deformada en frío, y la menos deformable es la zinalquizada deformada en cliente a 250°C. El parámetro comparativo es la profundidad de la copa Erichsen.

Las tablas de la 4.15 a la 4.20 contienen las mediciones realizadas de estados de deformación en las probetas Erichsen y en las de tracción, distinguiendo los puntos fallados de los sin falla.

Los puntos se graficaron en un diagrama de estados de deformación, para obtener la conformabilidad límite de cada lámina.

El procedimiento utilizado, y que se propone en este trabajo, para ubicar la curva límite es el siguiente:

Hacer una regresión estadística con los puntos de menor ordenada (e1 mínima) para cada conjunto de estados de deformación fallados de igual abcisa (e2). Luego desplazar la curva resultado de la regresión, disminuyendo únicamente sus ordenadas, hasta que todos los puntos fallados se encuentren por encima de la curva desplazada.

Las seis tablas siguientes contienen los estados de deformación que se utilizaron para obtener las regresiones estadísticas, el porcentaje en que se disminuyeron las ordenadas y las ecuaciones de las curvas críticas o límite resultantes.

Lámina aluminizada deformada en frío									
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-11	31	-4	19	18	23	23	43	28	30
-10	26	-3	20	19	21	24	45	29	44
-9	27	12	22	21	22	25	39	30	43
-6	21	15	24	22	24	27	54	33	37
-5	21								
Disminución de las ordenadas en la curva crítica: 4.07%									
$y=249.629E-4x^2-259.457E-3x+16$									

Lámina aluminizada deformada en caliente a 250°C									
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-17	38	-12	31	-7	27	12	21	21	25
-16	35	-11	25	-5	20	13	25	22	25
-15	37	-10	27	8	23	15	23	23	34
-14	29	-9	23	9	22	17	26	24	27
-13	28	-8	28	11	28	20	25		
Disminución de las ordenadas en la curva crítica: 2.39%									
$y = -853.355E-6x^3 + 365.532E-4x^2 - 947.206E-4x + 18$									

Lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C									
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-14	65	-8	45	30	45	38	57	45	52
-13	66	-7	42	32	47	40	50	47	54
-12	68	-6	38	35	45	43	55		
-10	66	-4	40	37	55	44	50		
Disminución de las ordenadas en la curva crítica: 5.13%									
$y = -104.745E-5x^3 + 813.975E-4x^2 - 109.447E-2x + 28$									

Lámina zinalquizada deformada en frío									
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-19	25	-14	23	-7	20	17	30	24	33
-18	23	-13	30	10	25	19	27		
-17	21	-12	22	13	25	20	40		
-15	21	-11	22	15	25	22	28		
Disminución de las ordenadas en la curva crítica: 4.31%									
$y = 115.681E-6x^3 + 126.433E-4x^2 + 112.451E-3x + 18$									

Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250°C									
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-14	12	-9	14	-3	15	13	21	20	25
-13	15	-8	18	6	17	15	20		
-12	12	-7	14	7	20	17	21		
-11	16	-4	15	8	17	19	25		
Disminución de las ordenadas en la curva crítica: 2.39%									
$y = 625.571E-6x^3 + 181.516E-5x^2 + 140.224E-3x + 14$									

Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350°C									
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-20	46	-13	43	-8	44	28	40	34	48
-19	38	-12	33	-7	37	30	47	35	42
-18	40	-11	50	-6	35	32	45	36	48
-17	39	-10	38	24	46	33	41	38	47
Disminución de las ordenadas en la curva crítica: 7.36%									
$y = 645.264E-8x^4 - 299.321E-6x^3 + 272.609E-5x^2 + 139.292E-3x + 33$									

El procedimiento seguido, y propuesto, para definir la curva crítica en los diagramas de conformabilidad límite, tiene las siguientes ventajas:

Es sencillo y práctico; evita recurrir a apreciaciones subjetivas o arbitrarias, para aplicarlo sistemáticamente no se requiere experiencia previa, y sobre todo mediante la regresión se refleja la respuesta de la lámina en los intervalos en que hay estados de deformación obtenidos experimentalmente, permitiendo además obtener una ecuación para la curva crítica.

Los criterios que comprende el procedimiento son:

La curva de la regresión se desplaza gradualmente hacia abajo, hasta que comprenda o envuelva a todos los puntos de falla.

Entre las posibles curvas de regresión, se escoge la que con menor cantidad de puntos de inflexión (polinomio de menor grado), tenga la forma más adecuada para que al desplazarla y convertirse en crítica, los puntos fallados queden por encima.

La tabla 4.23 muestra las áreas bajo la curva límite, en cada uno de los diagramas de conformabilidad. Son el resultado de integrar las ecuaciones de la curva límite de cada lámina, en su intervalo correspondiente, y restarle el área bajo la recta $e_1=e_2$ en dicho intervalo. (Por definición en esta área no pueden existir estados de deformación).

Área bajo la curva límite de los DCL.			
Descripción	Área	e2 inferior	e2 superior
Lámina aluminizada deformada en frío.	438.53	-15	33
Lámina aluminizada deformada en caliente a 250°C.	611.74	-17	24
Lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C.	1331.16	-17	47
Lámina zinalquizada deformada en frío.	690.76	-19	39
Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250°C.	315.82	-14	20
Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350°C.	1284.17	-20	38

Tabla 4.23. Tabla comparativa del área bajo la curva límite de los DCL.

Las seis gráficas siguientes ilustran la aplicación del procedimiento propuesto. La séptima, es el diagrama comparativo de la conformabilidad límite de las seis láminas estudiadas.

Lámina zinalquizada deformada en frío.

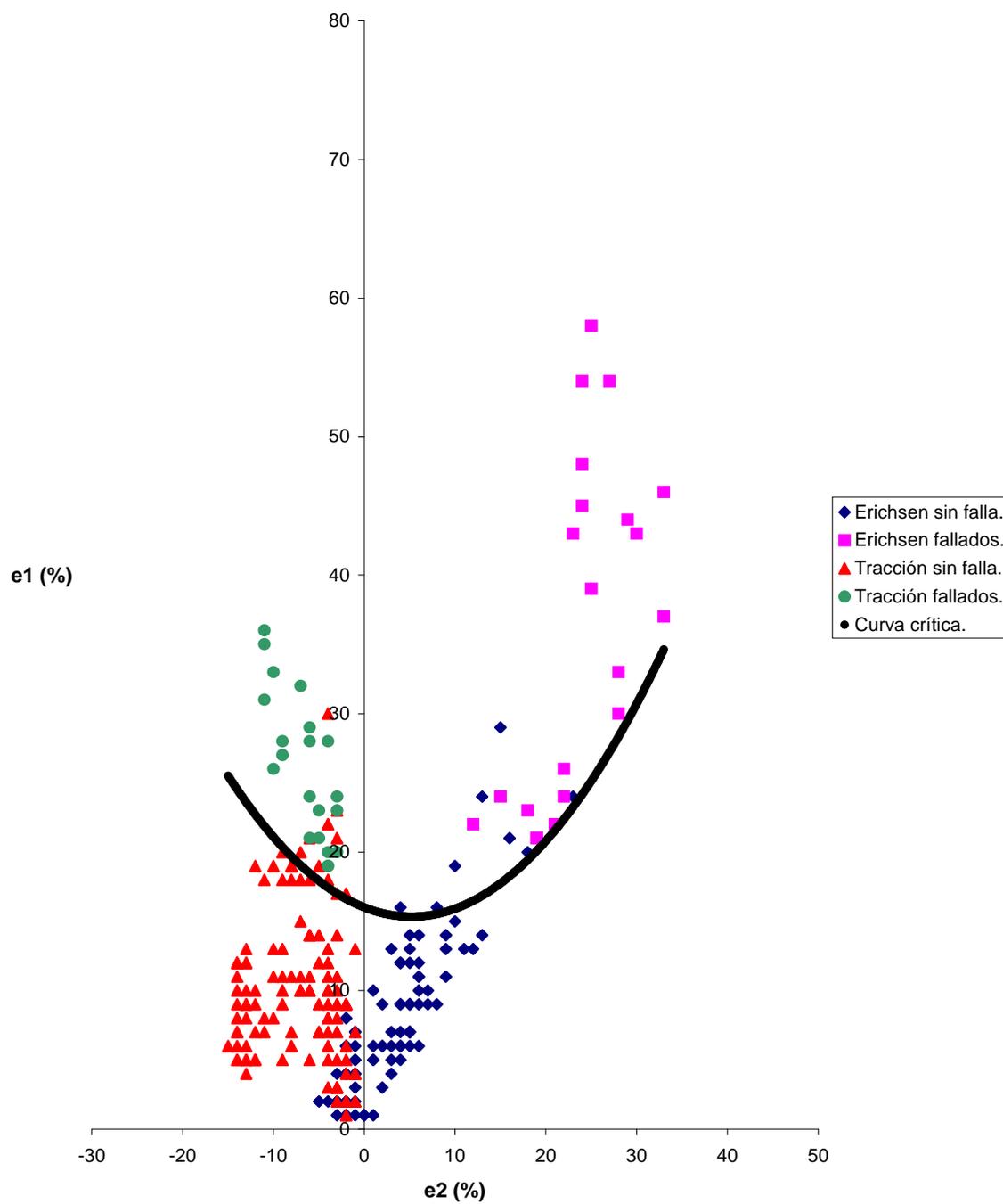


Lámina aluminizada deformada en caliente a 250 °C.

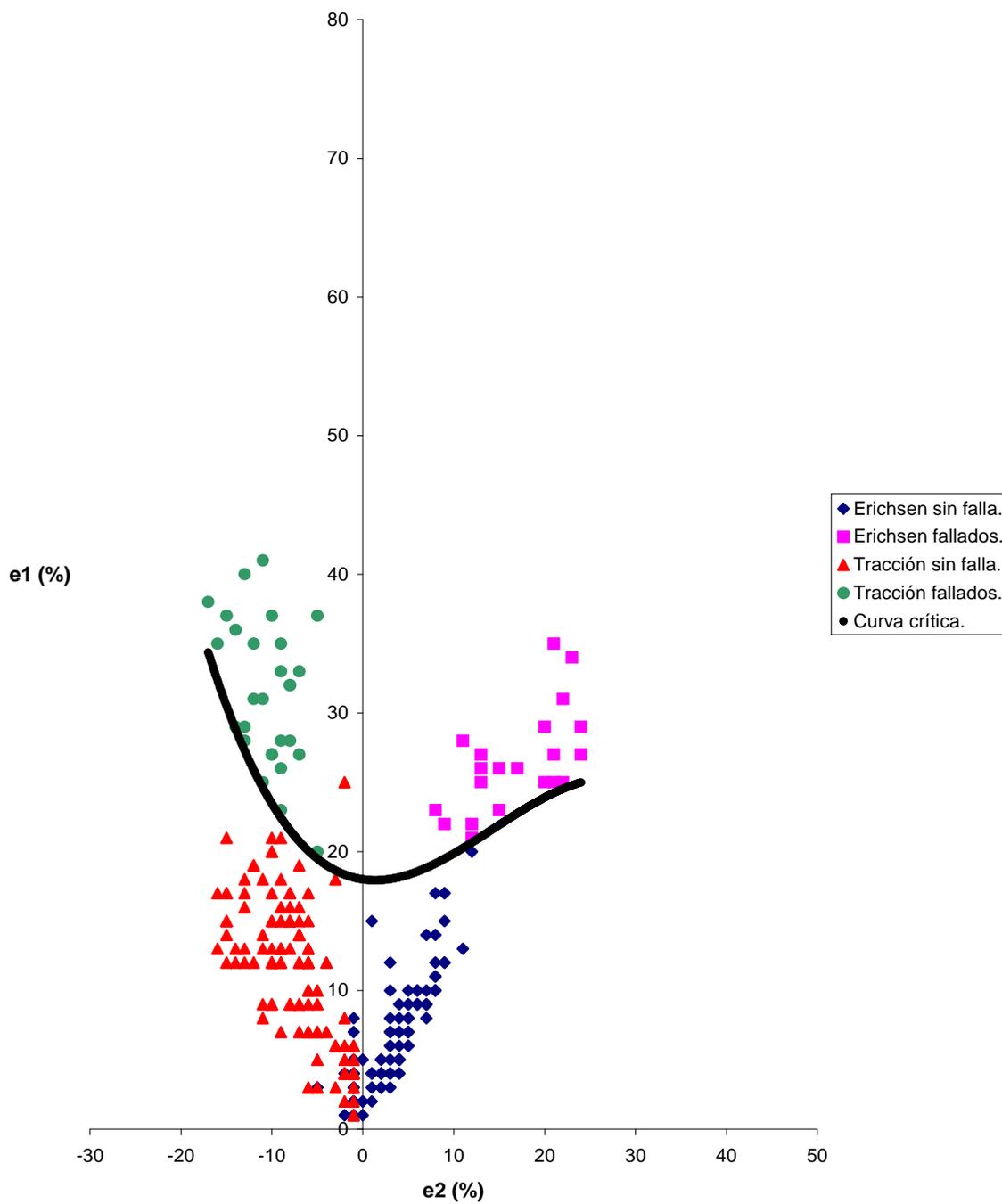


Lámina aluminizada deformada en caliente a 350 °C.

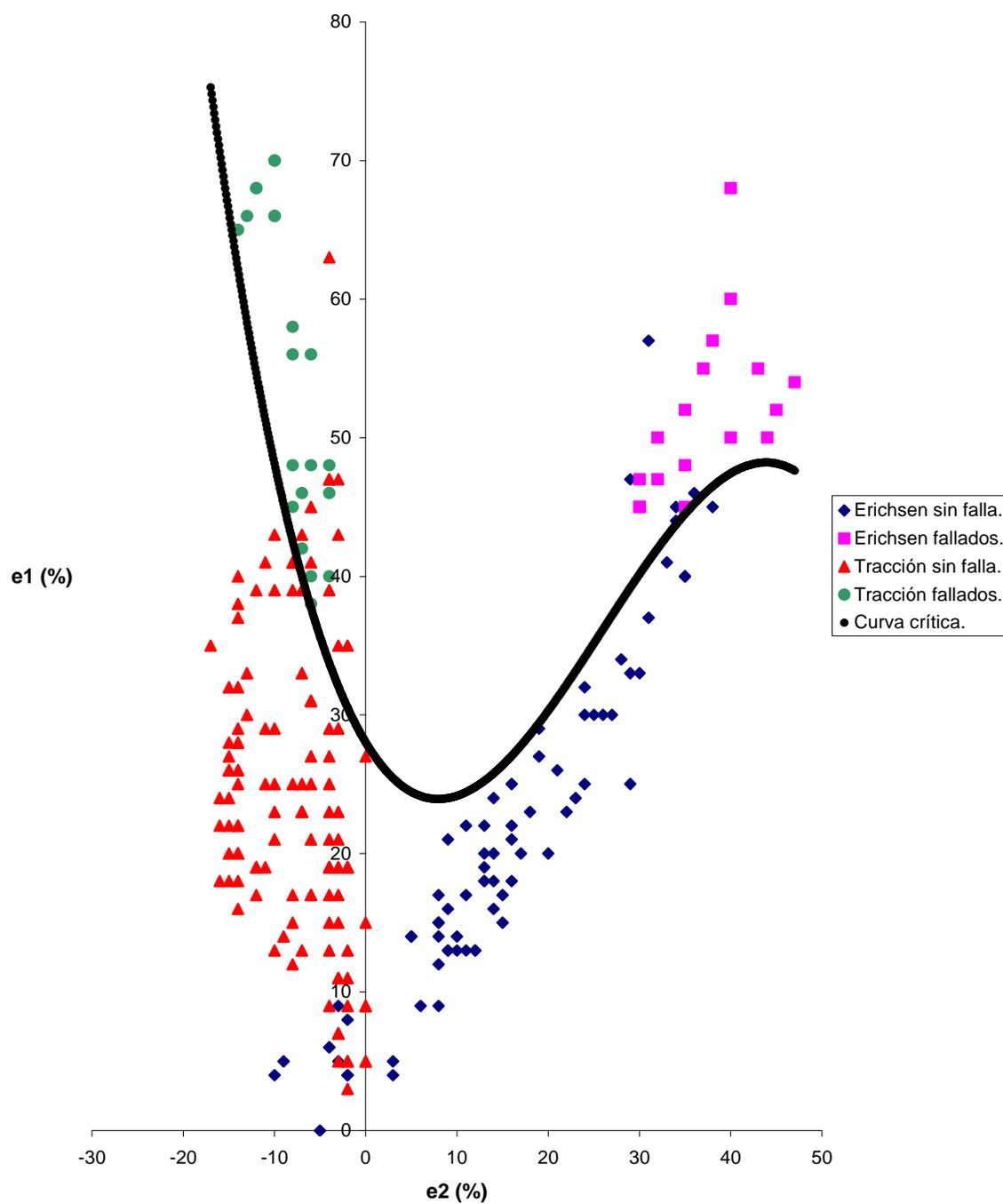


Lámina zinalquizada deformada en frío.

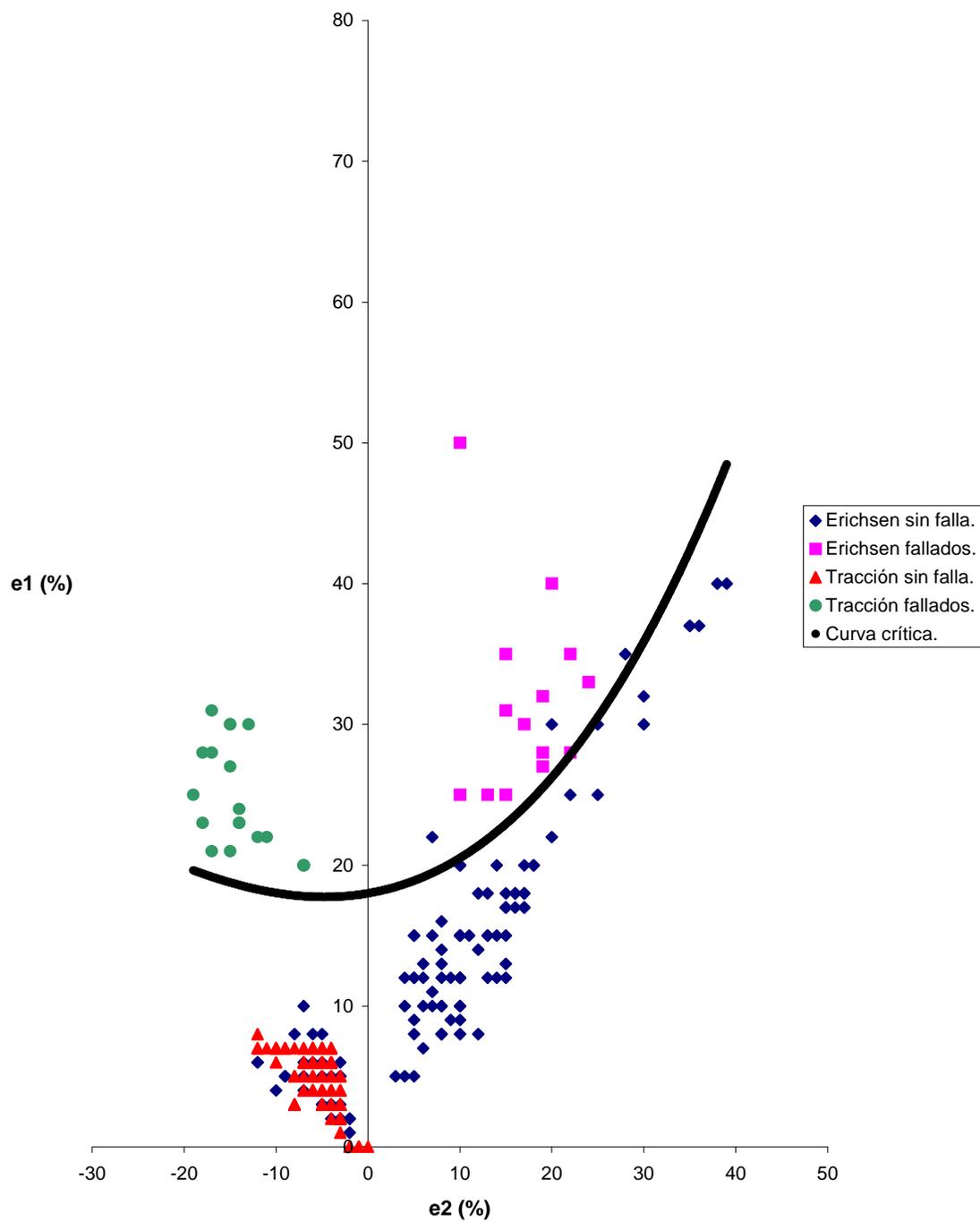


Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250 °C.

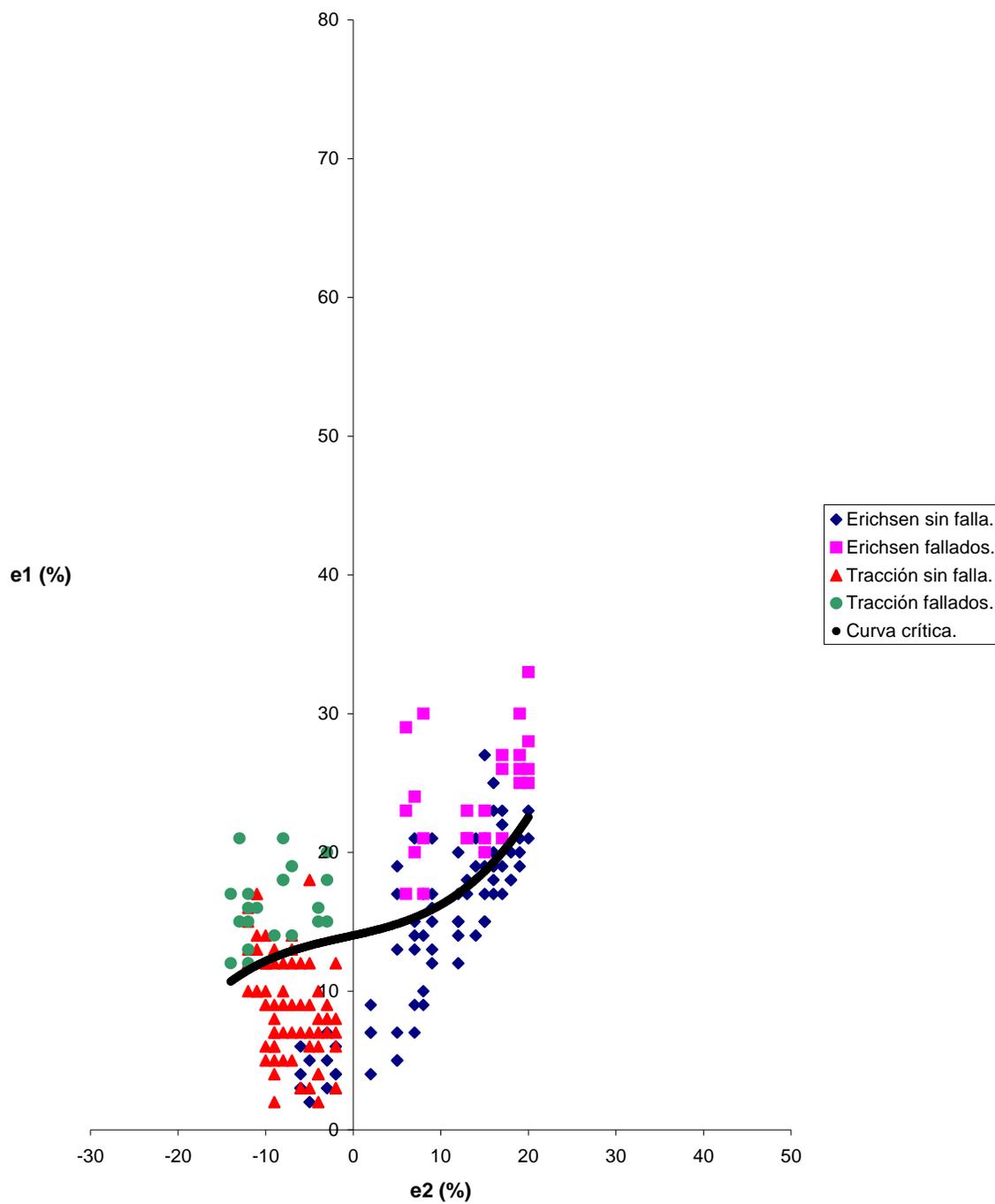
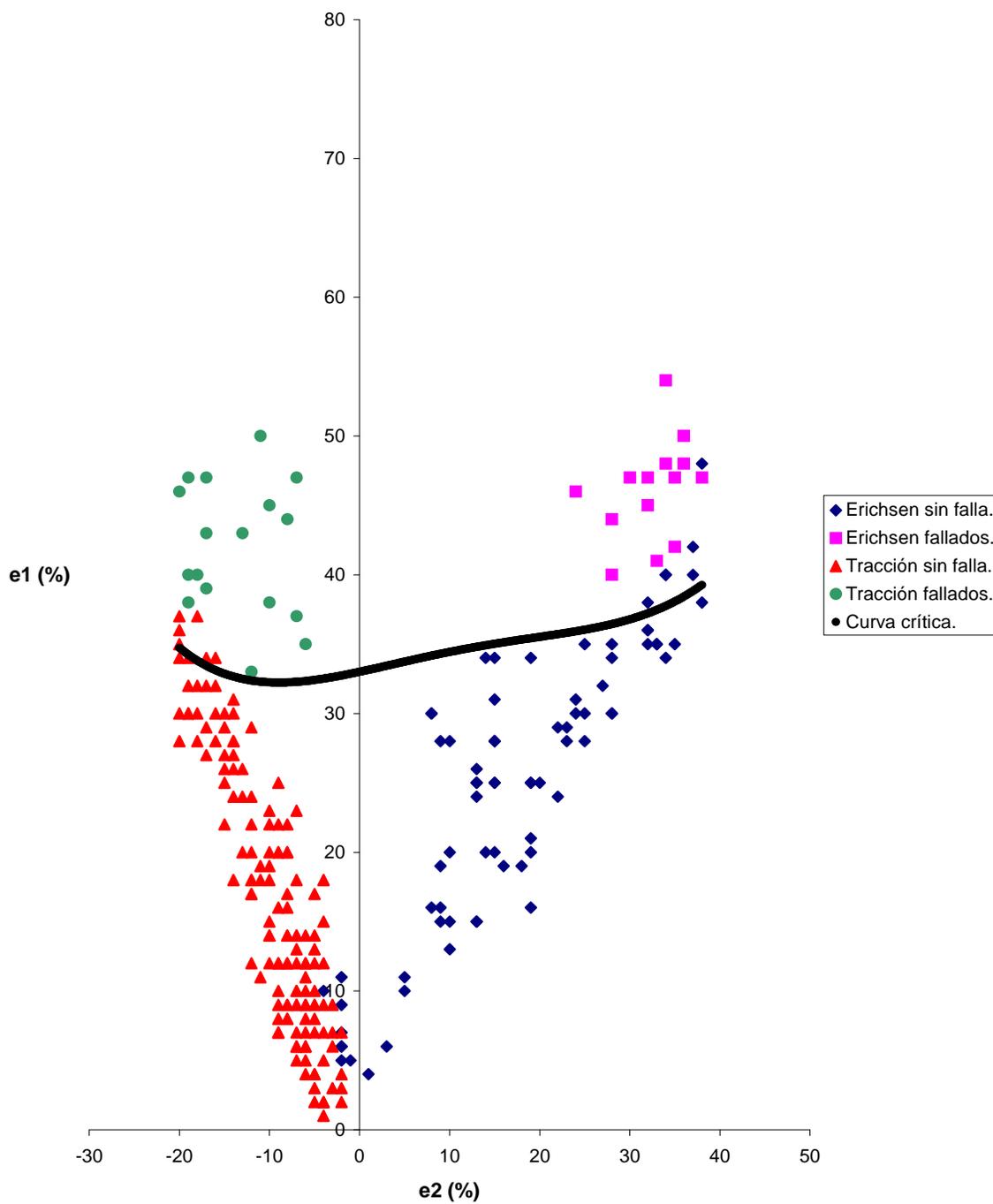
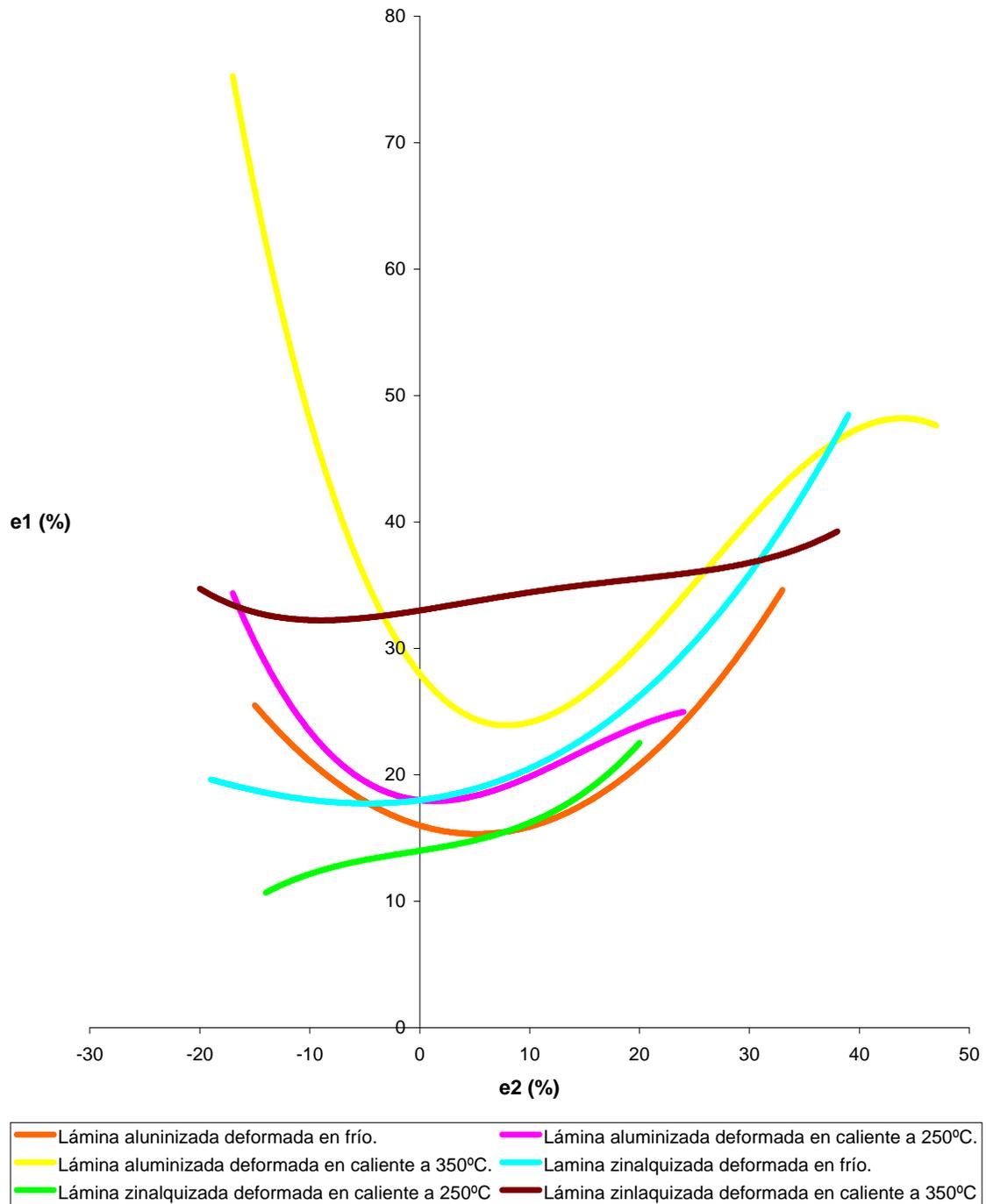


Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350 °C.



Gráfica comparativa de Diagramas de Conformabilidad Límite.



Si comparamos los resultados de los tres parámetros utilizados (la deformación máxima promedio en el ensayo de tracción, la profundidad de la copa Erichsen y el área bajo la curva límite de los DCL), resulta que las láminas aluminizada y zinalquizada deformadas en caliente a 350 °C son mas conformables que las deformadas en caliente a 250 °C, y estas a su vez mas conformables que las deformadas en frío.

El área bajo la curva límite permite evaluar, con mayor utilidad práctica, la conformabilidad de láminas. Es el parámetro para hacer consideraciones, cuantitativas y cualitativas, referentes a los distintos estados de deformación (embutido, tracción, estirado) a que puede ser sometido el material durante la manufactura de productos específicos. Supera las limitaciones de otros parámetros ligados, mas bien, a la respuesta del material llevado a estados de máxima deformación (que siendo indeseables, deben evitarse en el diseño y fabricación de partes).

Así en una consideración general, es valido afirmar que las láminas zinalquizada y aluminizada deformadas en caliente a 350 °C, superan a las otras en conformabilidad ya que el área bajo la curva y la amplitud del intervalo son mayores (ver tabla 4.23). Es decir que la cantidad de posibles estados de deformación o pares de valores (e_1 , e_2) es mayor.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo se concluye lo siguiente.

- De acuerdo con el objetivo, se lograron obtener los diagramas de conformabilidad límite de recubrimientos de zinalco y aluminio aplicados sobre acero SAE 1018 haciendo uso de ensayos habituales (tracción y embutido por el método de Erichsen) y aprovechándolos al máximo al someter las probetas a un proceso de mallado, que permite evaluar con mayor precisión la deformación que experimente el material.
- El método empleado para evaluar la conformabilidad de los recubrimientos realizados fue el de diagrama de conformabilidad límite (que define y muestra gráficamente los estados de deformación que no producen falla, separándolos de los que la producen). El procedimiento y los criterios descritos en este trabajo para obtener la curva crítica y su ecuación, se definieron a partir de la propia experimentación realizada (ya que en la literatura revisada no se especificaba el método a seguir; sino sólo ejemplos de DCL de algunos materiales y sus aplicaciones).
- El procedimiento empleado para ubicar la curva límite en el DCL es útil y objetivo; pero si se realizan más pruebas y se relacionan con resultados de aplicaciones reales en la industria, se puede enriquecer y perfeccionar.
- De acuerdo a este estudio y de los diagramas de conformabilidad límite, se establece que el acero recubierto con aluminio cuando es deformado en frío permite un 18% de deformación, siendo ésta de un 29% en promedio cuando es deformado en caliente (350°C). En relación con los recubrimientos de zinalco, se establece que el zinalco en frío no presenta una satisfactoria capacidad de deformación, fracturándose a deformaciones de hasta el 10%, manteniendo este comportamiento a temperaturas inferiores a 300°C. Sin embargo a 350°C la capacidad de deformación de este material es superior a 35%, lo que es de esperarse dado el carácter super-plástico de esta aleación, los que nos lleva a sugerir lo siguiente: en el proceso de conformado de lamina zinalquizada, deberemos de contar con un horno que nos permita llegar a temperaturas mayores a 300°C y, posteriormente contar con un equipo para deformar la pieza ya sea dentro del horno, o manipularla caliente y deformarla fuera del horno; la segunda opción sería deformar la pieza primero y luego aplicar el recubrimiento de zinalco. Es importante considerar que las dimensiones de la pieza a elaborar, la disponibilidad de un horno con las dimensiones adecuadas y la tolerancia requerida en las piezas a fabricar, son algunas de las más importantes

razones a considerar antes de decidir algunas de las dos opciones propuestas. Es conveniente también señalar que el cálculo de la anisotropía corrobora los resultados obtenidos en los diagramas de conformabilidad límite para ambos tipos de recubrimiento.

- Así mismo, se puede afirmar, en lo particular: que tratándose de estados de deformación producto de tracción (zona a la izquierda del eje vertical, en el diagrama comparativo) la lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C superará a las otras en su capacidad para soportar, sin falla, deformaciones relativas o porcentuales mayores, y que, análogamente, en la zona de estados de deformación producidos por estiramiento biaxial (a la derecha del eje vertical) este material tiene mayor capacidad de deformación que los demás recubrimientos. En el caso del acero recubierto con zinalco y deformado a 350°C, la capacidad de deformación por tracción es menor, sin embargo presenta un buen nivel de deformación uniaxial uniforme y mayor capacidad de deformación por estiramiento biaxial. En general los dos materiales ensayados a 350°C presentan buen nivel de deformación.
- Cabe mencionar que, comparando los resultados de los tres parámetros utilizados (la deformación máxima promedio en el ensayo de tracción, la profundidad de la copa Erichsen y el área bajo la curva límite de los DCL), resulta, como es lógico, que las probetas recubiertas con aluminio y zinalco deformadas a 350°C son las que ofrecen las mejores condiciones de deformación, por lo cual esta condición de deformación, se recomienda como adecuada cuando se requiera una deformación posterior a la aplicación de recubrimiento de zinalco o de aluminio sobre acero SAE1018.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Dieter, George. ***Mechanical Metallurgy***. Mc Graw -Hill, Singapur, 1988, 751 pp.
2. Beer, Ferdinand; Johnston, Russell. ***Mecánica de Materiales***. Mc Graw-Hill, Colombia, 1993, 2ª Ed., 738 pp.
3. Askilland, Donald. ***La ciencia e ingeniería de los materiales***. Mc Graw-Hill, México, 1985, 556 pp.
4. Schärer, Ulrich, et al. ***Ingeniería de Manufactura***. Edit. CECSA, México, 1984, 735 pp.
5. Mikell, Groover. ***Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, Procesos y Sistemas***. Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 1997, 1062 pp.
6. L. Semiatin, et al. ***Metals Handbook, Vol 14, Forming and Forging***. Edit. ASM International, USA, 1988, 9ª Ed., 978 pp.
7. Kurt, Lange. ***Handbook of Metal Forming***. Mc Graw-Hill, USA, 1985.
8. Keeler, ST. P. ***Determination of Forming Limits in Automotive Stamping***. "Sheet Met. Ind.", 46, 1969, p. 683-691.
9. Keeler, St. P. ***Circular Grid System -A Valuable Aid for Evaluating Sheet-Metal Forming-***. "Sheet Met. Ind.", 45,1968, p. 633-641.
10. Cervantes Cabello, José Javier. ***Desarrollo de la tecnología para la obtención de materiales compuestos laminados zinalco-aluminio***. El autor, México, 1996, 79 pp.
11. Cervantes Cabello, José Javier. ***Desarrollo de la tecnología para la obtención y caracterización de aceros de bajo carbono recubiertos con zinalco***. El autor, México, 2004, 197 pp.
12. Boljanovic, Vukota. ***Sheet Metal Forming Processes and Die Design***. Industrial Press, USA, 2004, 215 pp.
13. Hosford, William F. ***Metal Forming: Mechanics and Metallurgy***. Prentice Hall, USA, 1993, 2ª Ed., 364 pp.
14. Wagoner, Robert H. ***Fundamentals of Metal Forming***. J Wiley, USA, 1996.
15. Pearce, Roger. ***Sheet Metal Forming***. Hilger, USA, 1991, 275pp.