



**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**

**ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO
PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES
MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO
MINIATURA DE PUNZONADO**



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

AUTOR:

Daniel Lozano Martínez

TUTORES:

**Isidoro Iván Cuesta Segura
Jesús Manuel Alegre Calderón**

JUNIO 2013



ÍNDICE

RESUMEN.....	2
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Objetivos.....	4
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. El ensayo de miniatura de punzonado.....	5
2.3. Resumen histórico del ensayo miniatura de punzonado.....	8
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	15
3.1. Introducción.....	15
3.2. Definición del plan de experimentación general.....	16
3.3. Definición del plan de experimentación para aceros.....	21
3.4. Definición del modelo numérico.....	23



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	32
4.1. Introducción.....	32
4.2. Resultados del plan de experimentación general.....	32
4.3. Resultados del plan de experimentación para aceros.....	43
4.4. Análisis de los resultados.....	51
4.5. Validación numérica.....	63
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	76
5.1. Conclusiones.....	76
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	77
ANEXO 1.....	81
ANEXO 2.....	90
ANEXO 3.....	99
ANEXO 4.....	108



RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Título: ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO

Autor: DANIEL LOZANO MARTÍNEZ

Tutor (es): ISIDORO IVÁN CUESTA SEGURA
JESÚS MANUEL ALEGRE CALDERÓN

RESUMEN

El ensayo miniatura de punzonado (EMP) es utilizado para caracterizar el comportamiento mecánico en aquellos casos que no se dispone de una cantidad suficiente de material para poder realizar ensayos normalizados. Este ensayo consiste básicamente en el punzonado de una probeta miniatura estando sus extremos empotrados por una matriz.

El objetivo del presente estudio es desarrollar un procedimiento para la estimación de propiedades mecánicas mediante el ensayo miniatura de punzonado. Dicho estudio estará basado en la simulación numérica y en el diseño de experimentos. Ambas técnicas permitirán analizar el comportamiento de diferentes configuraciones de la curva de tensión-deformación, con lo que se podrá establecer y prever el comportamiento de un material a partir de una pequeña muestra del mismo a partir del ensayo miniatura de punzonado.

ABSTRACT

The small punch test (SPT) is used to characterize the mechanical behavior in those cases that it has not a sufficient quantity of material available to make normalized tests. This test basically consists of the punch of a miniature test tube being his ends built-in a mould.

The aim of the present study is to develop a procedure for the estimation of mechanical properties by means of the small punch test. The above mentioned study will be based on the numerical simulation and on the experimental design. Both techniques will allow us to analyze the behavior of different configurations of the strain-stress curve, with which will be possible to establish and foresee the behavior of a material from a small sample of the same one from the small punch test.



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

La determinación de las propiedades mecánicas y de fractura de un material, se realiza de forma convencional mediante ensayos normalizados, los cuáles utilizan probetas estándar, como pueden ser las de tracción, Charpy o compactas (CT). En la década de los 80, en el campo nuclear, para solventar el problema que suponía caracterizar material irradiado de componentes en servicio, donde la escasez de material para mecanizar probetas convencionales era un serio inconveniente, se desarrolló el ensayo miniatura de punzonado o Small Punch Test (SPT). Dicho ensayo consiste básicamente en un punzonado sobre una probeta miniatura, mediante un punzón de gran rigidez, estando la periferia de la probeta empotrada por una matriz. Estas probetas miniatura generalmente son cuadradas de dimensiones $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}$, o bien son circulares de diámetro 3 mm . Este reducido tamaño de probeta supone que el ensayo SPT se pueda considerar como un ensayo no destructivo del componente en servicio analizado. Durante el ensayo se recogen los valores de carga aplicada y desplazamiento del punzón, tras el correcto tratamiento de los datos almacenados, se obtiene como resultado del ensayo SPT la curva carga-desplazamiento del punzón.

En las últimas décadas han sido numerosos los autores que han centrado sus investigaciones en la utilización del SPT con el fin de obtener las propiedades mecánicas del material, en los casos que no se dispone de una cantidad suficiente de material para poder realizar ensayos normalizados. Su aplicabilidad se ha extendido a otros campos, a parte del nuclear, como por ejemplo a los procesos de soldadura para la evaluación de las propiedades del material en las zonas afectadas térmicamente.



1.2. OBJETIVOS

El objetivo del presente estudio es desarrollar un procedimiento para la estimación de propiedades mecánicas mediante el ensayo miniatura de punzonado. Dicho estudio estará basado en la simulación numérica y en el diseño de experimentos. Ambas técnicas permitirán analizar el comportamiento de diferentes configuraciones de la curva de tensión-deformación, con lo que se podrá establecer y prever el comportamiento de un material a partir de una pequeña muestra del mismo a partir del ensayo miniatura de punzonado.



CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se ha realizado una recopilación de los principales trabajos de investigación que han hecho uso del ensayo miniatura de punzonado, en diversos campos de aplicación, en especial en la estimación de propiedades mecánicas desde sus orígenes en la década de los 80 hasta la actualidad.

También se define en que consiste en ensayo miniatura de punzonado y se presentan las bases de este estudio.

2.2. EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO

El ensayo miniatura de punzonado comenzó a ser desarrollado en la década de los 80, con el objetivo principal de obtener las propiedades mecánicas del material analizado en aquellos casos en los que no se disponía de material suficiente para la realización de ensayos convencionales. El ensayo consiste básicamente en un punzonado sobre una probeta cuadrada o circular de reducidas dimensiones ($D=6$ mm, $t = 0.5$ mm), mediante un punzón de gran rigidez, estando la periferia de la probeta empotrada mediante dos matrices.

Para evitar deformaciones locales muy elevadas en la probeta, la matriz inferior lleva mecanizado un redondeo, cuyo radio de acuerdo es uno de los parámetros con cierta influencia en los resultados obtenidos. El utillaje del ensayo suele estar diseñado para poder ser acoplado a una máquina universal de ensayo. La compresión de la probeta entre la matriz superior e inferior es de gran importancia para evitar el deslizamiento de la probeta que se traduciría en una interpretación errónea de los resultados



obtenidos. En la Figura 2.1 se presenta un esquema del utillaje típico para el ensayo SPT.

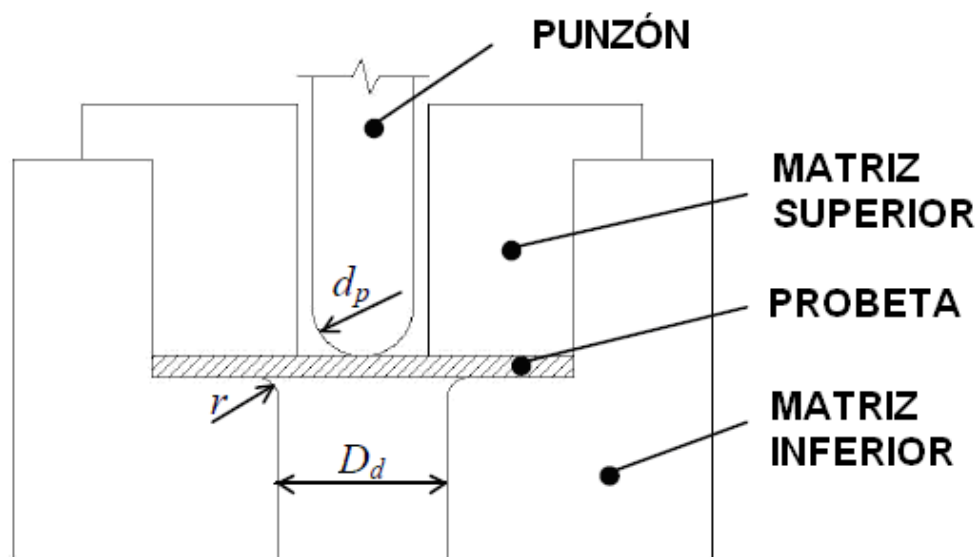


Figura 2.1. Esquema del ensayo SPT.

Durante el ensayo se recogen los valores de carga aplicada y desplazamiento del punzón, y tras el correcto tratamiento de los datos almacenados, se obtiene como resultado del ensayo SPT la curva carga-desplazamiento del punzón. Una curva carga-desplazamiento y el modo de fallo típico para el caso de materiales dúctiles, se puede ver en la Figura 2.2, correspondiente a un ensayo de una probeta SPT convencional de 10x10x0.5 mm. En general, en dicha curva se pueden diferenciar hasta seis zonas, aunque la finalización de una y el comienzo de la siguiente no se puede determinar exactamente. Cada una de las zonas está influenciada por el comportamiento elastoplástico del material, y se explican en detalle en los siguientes párrafos.

Zona I. Es la zona en la que el material tiene un comportamiento puramente elástico. Los parámetros del material que tienen influencia en esta zona son los que definen el comportamiento elástico del mismo. Sin embargo, se observa generalmente una ligera influencia debida a la indentación inicial del punzón sobre la probeta.

Zona II. Es la zona de transición elasto-plástica. El material comienza a plastificar en algunas zonas de la probeta, fundamentalmente la que se encuentra en contacto



con la periferia del punzón, empezando así a tener importancia los parámetros que definen el comportamiento plástico del material. En esta zona también puede comenzar a tener cierta influencia el coeficiente de rozamiento entre la bola y el material ensayado.

Zona III. Es la zona en la que el material alcanza un comportamiento plástico en todos los puntos de la probeta que no están restringidos por las matrices. Podríamos decir que la plastificación va avanzando hasta alcanzar prácticamente toda la probeta. Se alcanzan elevadas deformaciones plásticas en determinadas zonas de la probeta. En muchas ocasiones, el tramo de curva comprendido en esta zona se podría ajustar mediante una recta.

Zona IV. Es la zona en la que se alcanza el valor de carga máxima. Se produce un adelgazamiento importante del espesor de la probeta que está asociado con la inestabilidad plástica local y el inicio de la fractura en determinadas zonas, alcanzando la carga máxima del punzón.

Zona V. Es la zona de ablandamiento de la curva, una vez que en algunas zonas de la probeta se ha alcanzado la condición de rotura. La rotura avanza y la capacidad resistente de la probeta disminuye rápidamente. La fisura comienza a crecer de forma circunferencial entorno al centro de la probeta, como puede observarse en la Figura 2.2.

Zona VI. Representa la rotura final de la probeta, en la que el punzón la atraviesa por completo. En los ensayos experimentales no es una zona de especial interés.

En consecuencia, cada una de las partes en las que se puede dividir la curva carga-desplazamiento parece estar relacionada con una serie de parámetros característicos del material. La primera zona con los parámetros elásticos, la segunda y tercera con las propiedades elastoplásticas y desarrollo del daño local, y la cuarta y quinta con el desarrollo del daño a mayor escala y los parámetros asociados a la rotura del material.

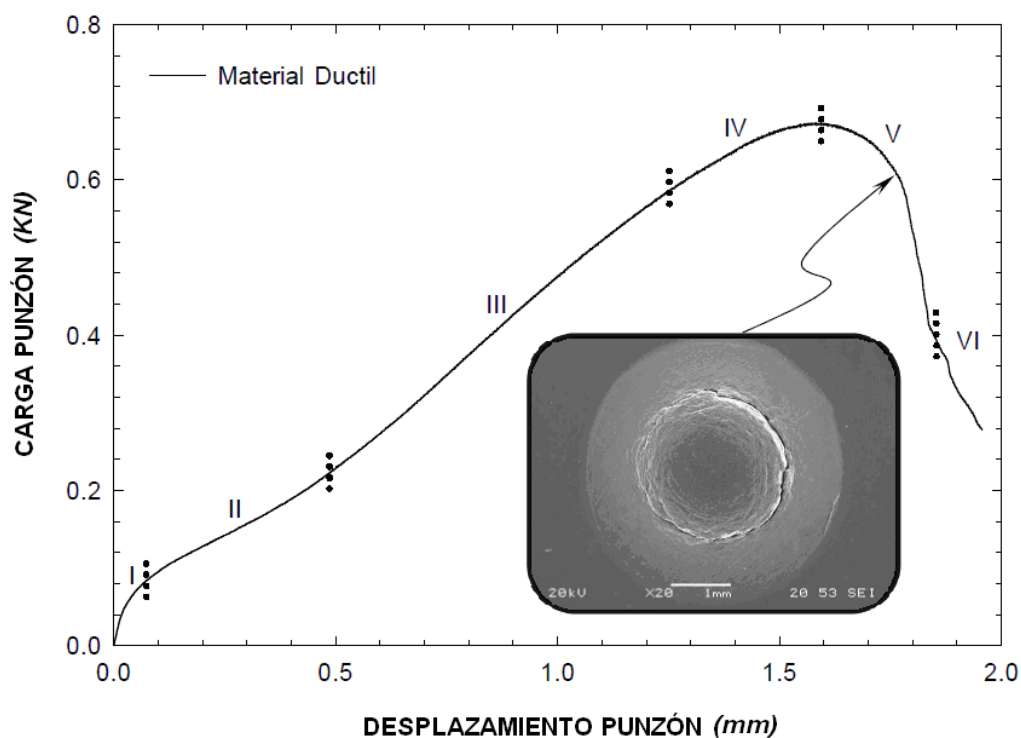


Figura 2.2. Curva carga-desplazamiento típica obtenida en el SPT para el caso de materiales dúctiles.

2.3. RESUMEN HISTÓRICO DEL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO

Los trabajos que han utilizado el ensayo SPT para la determinación de las propiedades mecánicas con relación a este estudio se resumen a continuación.

En la década de los 80, Baik et al.[1] fueron los primeros investigadores en utilizar el SPT con el objetivo de estudiar los efectos que la radiación tenía sobre la temperatura de transición dúctil-frágil en materiales metálicos. Hasta ese momento el ensayo Charpy (CVN) era el método convencionalmente utilizado para la determinación de esa propiedad en materiales metálicos, pero para materiales irradiados las probetas de ese ensayo no era conveniente utilizarlas debido principalmente a su excesivo tamaño para ser irradiadas.

Unos años más tarde en 1986, Kameda et al. [2] ampliaron el estudio anterior [1].



En ese mismo año, Lucas et al. [3] publicaron un trabajo con el objetivo de determinar el efecto de la geometría de la probeta y del utillaje del ensayo en los resultados de los ensayos SPT.

Un año más tarde, en 1987, Mao et al [4, 5] comenzaron un trabajo de investigación con el propósito de desarrollar una técnica para extraer información de las propiedades mecánicas y de fractura de materiales a partir del SPT con probetas circulares

En los últimos años de la década de los 80 y principios de los 90, Misawa et al. [6-10] desarrollaron un sistema de evaluación de degradación por irradiación en aleaciones estructurales candidatas a ser el material de reactores de fusión. Dicho sistema consistía en la utilización del SPT para la determinación de la DBTT, la tenacidad a fractura, la evaluación de la tensión de fallo por corrosión (SCC) y la fragilización por hidrógeno.

Estos estudios representan los primeros intentos de obtener el valor de la tenacidad a fractura del material a partir del ensayo SPT, sirviendo como base de la mayoría de las investigaciones que se llevaron a cabo en los años posteriores. En 1990, Lucas [11] en una recapitulación de los avances que se habían logrado hasta el momento en los ensayos miniatura sobre materiales irradiados, dedica un apartado al SPT en el que hace especial hincapié en dichos estudios.

En los primeros años de la década de los 90, Mao et al. [12-14], siguiendo con sus investigaciones, realizaron una serie de estudios con el objetivo de obtener un procedimiento de ensayo SPT para estimar propiedades mecánicas en materiales cerámicos.

En 1991 Suzuki et al.[15], utilizando como base los trabajos anteriores publicados por algunos de ellos [6-10], realizaron un estudio sobre un acero irradiado por neutrones para la evaluación de la degradación de la tenacidad a fractura. Los resultados que obtuvieron fueron similares a los obtenidos previamente [6-10]. Posteriormente Kameda et al. realizaron una serie de investigaciones enfocadas a determinar las propiedades mecánicas en materiales irradiados [16] y en aleaciones con recubrimientos cerámicos [17].



Chi et al. [18] basándose en un trabajo anterior de Mao et al. [12] realizaron ensayos SPT sobre probetas de acero irradiadas con protones

En 1998 Fleury y Ha [19, 20] realizaron una correlación entre las propiedades mecánicas y de fractura determinadas a partir del SPT y las obtenidas a partir de ensayos convencionales

En ese mismo año Bulloch [21] hizo una recopilación de los resultados que hasta la fecha habían obtenido diversos investigadores de la temperatura de transición con el ensayo SPT y con el ensayo CVN. Esencialmente demostró algunas de las expresiones que ya existían en la literatura que relacionaban dichas temperaturas de transición. Durante esta década, el ensayo SPT también fue utilizado en diversos campos de aplicación.

En la pasada década y en la actual, en el año 2001, Saucedo-Muñoz et al. [22] realizaron un trabajo de correlación determinado a partir del SPT.

Un año más tarde, Shekhter et al. [23] desarrollaron un estudio en una pieza del material sometida a diferentes tratamientos térmicos.

También en el año 2002 Ruan et al. [24] utilizaron el SPT para evaluar las propiedades de un acero martensítico tratado térmicamente.

Se puede destacar, que todos los trabajos analizados hasta el momento han sido realizados utilizando probetas SPT, cuadradas o circulares, sin mecanizarlas ningún tipo de grieta, consiguiendo en mayor o menor medida una buena estimación de las propiedades a fractura del material. Dichas propiedades se determinan convencionalmente con ensayos que utilizan probetas que tienen mecanizada una grieta, como por ejemplo la probeta Charpy en el ensayo CVN o la probeta compacta (CT) en el ensayo de fractura. Por lo que la posibilidad de utilizar probetas SPT con grieta para la determinación de las propiedades a fractura del material, podría suponer una buena alternativa con la que mejorar los resultados obtenidos hasta la fecha.

En este sentido, en el año 2003 Ju et al. [25] realizaron un estudio pionero de SPT utilizando probetas 10x10x0.5 mm con grieta para obtener las propiedades a fractura



de acero. La grieta pasante se mecanizaba en el centro de la probeta, en la Figura 2.3 se puede observar el detalle de la zona central de la probeta donde está ubicada dicha grieta, la cual tiene forma elíptica, así como el fallo frágil a baja temperatura iniciado en esa zona.

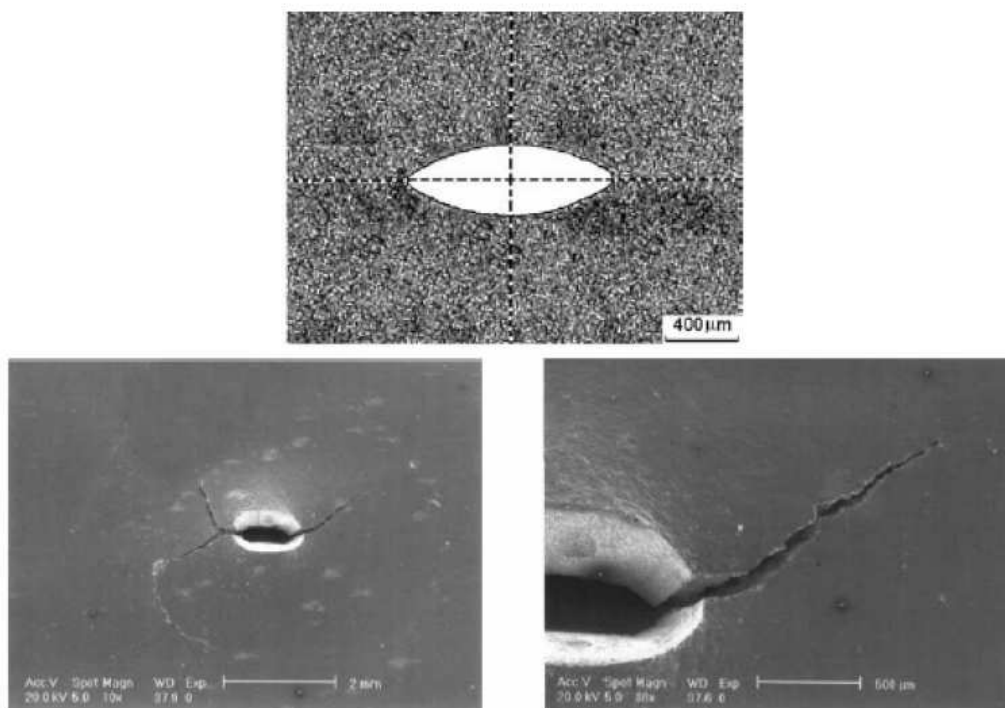


Figura 2.3. Fisura y micrografías del fallo frágil de la probeta utilizada por Ju et al. [25].

Demonstraron la posibilidad de extraer las propiedades a fractura del material analizado a través del SPT, haciendo uso de probetas SPT con una grieta mecanizada inicialmente.

Un año más tarde, en el 2004 Finarelli et al. [26] investigaron sobre las propiedades mecánicas a partir del SPT en materiales irradiados.

En ese mismo año Campitelli et al.[27] utilizaron el SPT y la simulación numérica para determinar las propiedades mecánicas de algunos aceros. Su investigación se centró principalmente en determinar la influencia del espesor de la probeta y del coeficiente de fricción en los resultados obtenidos. Además de esto, concluyeron que la implementación del coeficiente de fricción en la simulación numérica era



fundamental para la correcta reproducibilidad de la curva carga-desplazamiento experimental. A estas mismas conclusiones, llegaron dichos autores en un trabajo posterior [28] realizado sobre probetas irradiadas de acero martensítico.

Recientemente, investigadores de la Universidad de Cantabria [29, 30] proponen el empleo de una metodología experimental basada en la medición del CTOD en probetas miniatura con entalla lateral pasante para la estimación de la tenacidad.

En paralelo, investigadores de la Universidad de Oviedo están trabajando con diferentes configuraciones de entalla no pasante en la probeta miniatura con las que poder estimar las propiedades a fractura del material analizado [31, 32]. Los distintos tipos de entalla utilizados pueden observarse en la Figura 2.5, donde todas ellas son del tipo no pasante en el espesor.

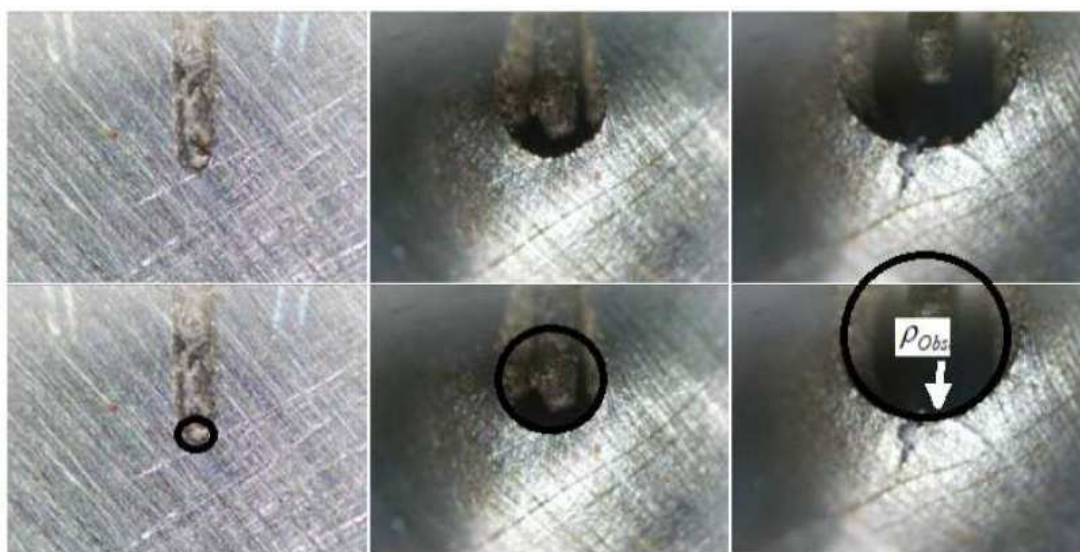


Figura 2.4. *Medición de la evolución del CTOD en probetas miniatura con entalla lateral pasante [30].*

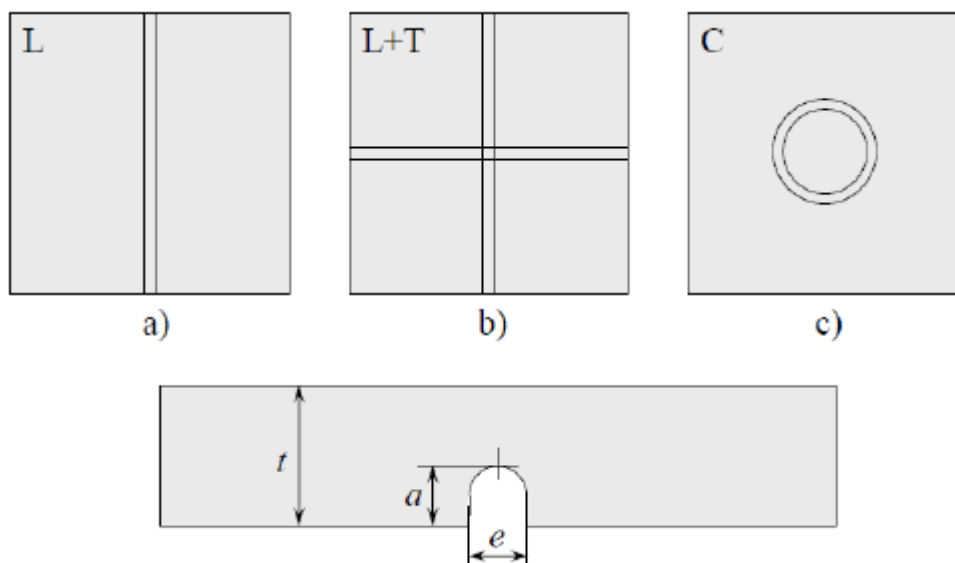


Figura 2.5. Tipos de entalla no pasante en probetas miniatura [31].

En estos últimos años, Rodríguez et al. [33] han realizado una recopilación exhaustiva de los diferentes métodos existentes para obtener el límite elástico del material a partir de la carga de fluencia P_y en el SPT, utilizando para ello una amplia base de materiales metálicos. En la Figura 2.6 se recogen las diversas propuestas que han analizado para la obtención del valor de P_y , de todas ellas destacan el método de las dos tangentes (P_y), propuesto por Mao et al. [4, 5], y el método que consiste en trazar una paralela a la pendiente inicial para un valor de desplazamiento del punzón igual al espesor de probeta partido por diez ($P_{yoffset}$) como los que proveen una mejor estimación del límite elástico del material.

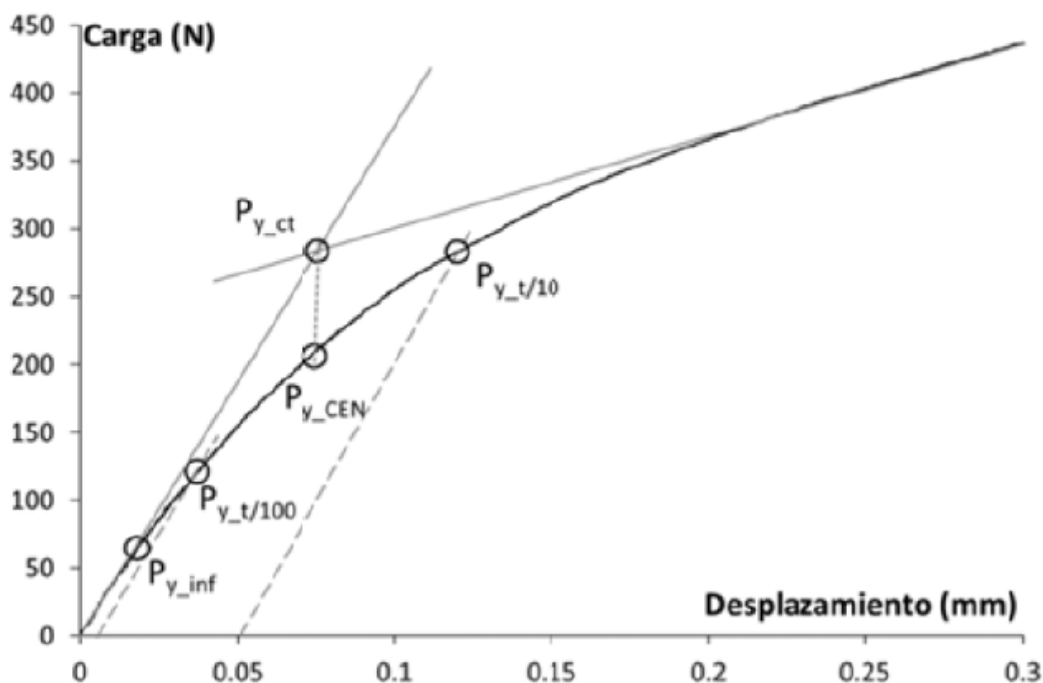


Figura 2.6. Diferentes propuestas para la obtención de P_y [42].

La mayoría de los trabajos anteriores, especialmente los de la década de los 80, representan la base fundamental en la que se apoyan las investigaciones realizadas durante estos últimos años, para la obtención de las propiedades a fractura a partir de ensayos SPT.

Por último, cabe destacar el desarrollo en los últimos años de un código europeo de buenas prácticas para el ensayo miniatura de punzonado [34], el cual se convertirá, muy probablemente en norma europea en los años venideros.



CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

Los dos pilares fundamentales de la metodología desarrollada en el presente estudio son la simulación numérica y el diseño de experimentos basado en superficies de respuesta.

En este capítulo se explican los pasos a seguir para generar un modelo numérico con el que simular el comportamiento de cualquier ensayo miniatura de punzonado. En particular, se ha utilizado el software ABAQUS. Los resultados obtenidos en la simulación numérica servirán para alimentar los diseños de experimentos llevados a cabo.

Para el ensayo miniatura de punzonado analizado se ha diseñado un plan de experimentos con el que poder obtener la superficie de respuesta para los parámetros de control establecidos. En este sentido se ha contado con la ayuda del software NEMRODW.



3.2. DEFINICIÓN DEL PLAN DE EXPERIMENTACIÓN GENERAL

En el presente apartado se define el plan experimental, basado en el diseño de experimentos, con el que obtener la superficie de respuesta de carga de fluencia P_y y el coeficiente adimensional α de cada uno de los dos métodos de resolución adoptados, que se explicarán en el capítulo IV.

Antes de proceder a la determinación de estas superficies de respuesta es necesario apuntar una primera reflexión sobre los parámetros que influyen en los parámetros analizados. Dichos parámetros pueden clasificarse como parámetros geométricos (punzón y matriz superior e inferior) o como parámetros de material (módulo de Young, límite elástico y módulo plástico).

Resulta evidente que es extremadamente complicado obtener una superficie de respuesta que englobe la variación de todos los parámetros que pueden variar el diseño experimental, por lo que es necesario fijar algunos de ellos. En este sentido, se han fijado los parámetros geométricos.

Por lo tanto, el presente estudio se centra en la variación de los parámetros de material antes descritos. En particular, se han analizado el módulo de Young E , el límite elástico σ y el módulo plástico E_p .

La tabla 3.1 recoge los rangos de valores de los tres parámetros variables (E , σ y E_p) analizados, los cuales abarca los valores típicos de los materiales metálicos.

Tabla 3.1. *Parámetros variables en el rango [-1.682,1.682].*

<i>Parámetros variables</i>	
Módulo de Young E	[250000, 500000]
Límite elástico σ	[1200, 50]
Pendiente del módulo plástico E_p	[5000, 100]



En consecuencia los parámetros E , σ y E_p son los que van a gobernar la superficie de respuesta. La relación existente entre estos parámetros y la superficie de respuesta de cada carga de fluencia y coeficiente (P_y , $P_{yoffset}$, α y α_{offset}) se puede expresar como $S = f(E^*, \sigma^*, E_p^*)$, donde f se postula como modelo cuadrático de la forma expresada en la ecuación (3.1), donde E^* , σ^* y E_p^* son las variables codificadas de E , σ y E_p respectivamente.

(3.1)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*) = b_0 + b_1 \cdot E^* + b_2 \cdot \sigma^* + b_3 \cdot E_p^* + b_{11} \cdot E^{*2} + b_{22} \cdot \sigma^{*2} + b_{33} \cdot E_p^{*2} + b_{12} \cdot E^* \cdot \sigma^* + b_{13} \cdot E^* \cdot E_p^* + b_{23} \cdot \sigma^* \cdot E_p^*$$

La codificación de los valores reales de los parámetros es necesaria para que todos ellos varíen en el mismo intervalo, como se puede ver en la Figura 3.8, favoreciendo de esta manera la estimación precisa de los coeficientes que definen la función $f(E^*, \sigma^*, E_p^*)$. Para cualquier valor real X_i de los parámetros variables dicha codificación se puede realizar a través de la expresión (3.2), obteniendo el valor codificado x_i correspondiente. Donde X_{iNInf} es el valor real del nivel más bajo del factor i , X_{iNSup} es el valor real del nivel más alto del factor i , y \tilde{X}_i , es la media entre los valores reales del nivel más alto y más bajo del factor i .

$$i \in E^*, \sigma^*, \varepsilon^* \\ x_i = \frac{2 \cdot 1.682 \cdot (X_i - \tilde{X}_i)}{X_{iNSup} - X_{iNInf}} \quad (3.2)$$



La determinación de los coeficientes de la función $S = f(E^*, \sigma^*, E_p^*)$ para cada uno de las cargas de fluencia y coeficientes (P_y , $P_{yoffset}$, α y α_{offset}) se va a realizar a través de un diseño de experimentos central compuesto, utilizando el software NEMRODW. Las principales características de este diseño son:

- Utilización de tres factores, los cuáles son los parámetros E , σ y E_p .
- Dominio esférico de radio clásico, el valor del radio para tres factores es 1.682.
- Codificación de los intervalos de valores de los tres factores recogidos en la Tabla 3.1. para que varíen en $[-1.682, 1.682]$, según la expresión (3.2).
- Matriz de experimentos *composite*, la cual tiene cinco niveles para cada factor, como se puede comprobar en la Figura 3.1.
- Utilización de un modelo cuadrático, definido por la expresión (3.1), para el ajuste de la superficie de respuesta de cada coeficiente de restitución.
- La superficie de respuesta permitirá estimar el comportamiento de cualquier punto codificado dentro de la esfera de radio 1.682.

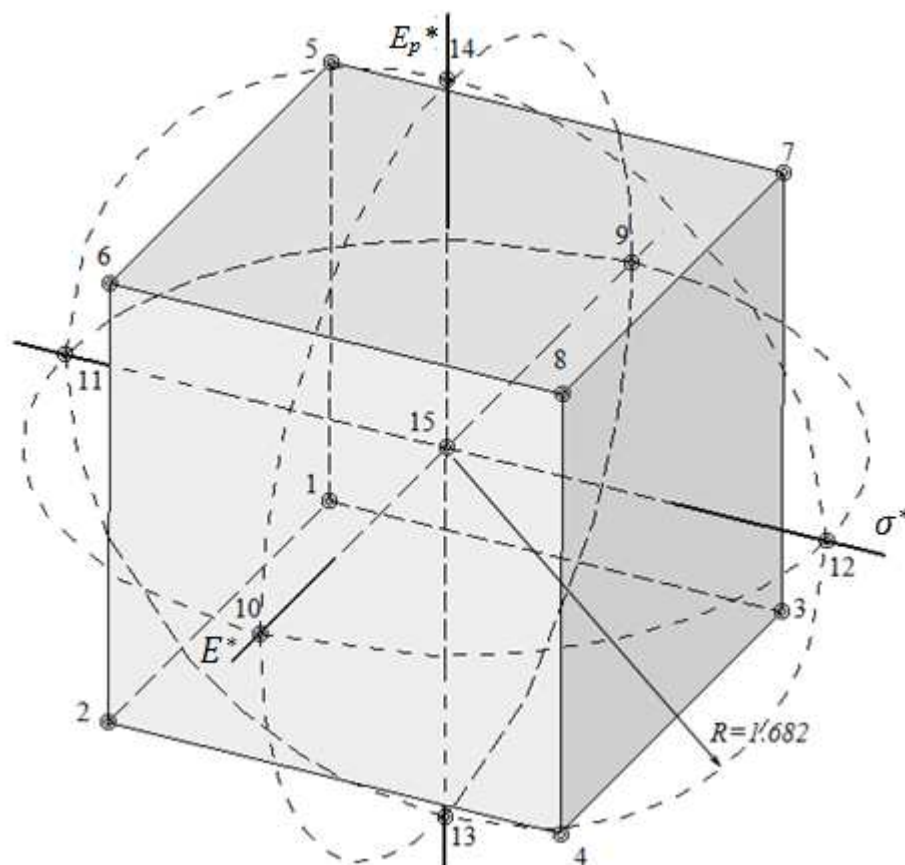


Figura 3. 1. Representación de la matriz de experimentos según las variables codificadas.

La Tabla 3.2. recoge, tanto la matriz de experimentos con las variables codificadas, como la matriz del plan de experimentación con los valores de los factores del diseño de experimentos propuesto para la determinación de los coeficientes de la función $f(E^*, \sigma^*, E_p^*)$.



Tabla 3.2. *Diseño propuesto para obtener la superficie de respuesta de cada uno de los coeficientes.*

Nº Exp.	<i>Matriz de experimentos</i> (Variables codificadas)			<i>Plan de experimentación</i> (Variables reales)		
	E^*	σ^*	E_p^*	E	σ	E_p
1	-1	-1	-1	90540	283	1093.00
2	1	-1	-1	209460	283	1093.00
3	-1	1	-1	90540	967	1093.00
4	1	1	-1	209460	967	1093.00
5	-1	-1	1	90540	283	4007.00
6	1	-1	1	209460	283	4007.00
7	-1	1	1	90540	967	4007.00
8	1	1	1	209460	967	4007.00
9	-1.682	0	0	50001	625	2550
10	1.682	0	0	249999	625	2550
11	0	-1.682	0	150000	50	2550
12	0	1.682	0	150000	1200	2550
13	0	0	-1.682	150000	625	100
14	0	0	1.682	150000	625	5000
15	0	0	0	150000	625	2550

Cada uno de los experimentos del plan de experimentación se realiza a través de una simulación numérica tal y como se describe en el apartado siguiente, con la única salvedad que los valores de E , σ y E_p son los recogidos en la Tabla 3.2, obteniendo como resultado final del experimento el valor de los parámetros P_y , $P_{yoffset}$, α y α_{offset} .

Una vez obtenidos todos los valores de las cargas de fluencia y coeficientes P_y , $P_{yoffset}$, α y α_{offset} , con la ayuda de NEMRODW, es posible determinar los coeficientes de la función $f(E^*, \sigma^*, E_p^*)$, para cada una de las respuestas.

A partir de las funciones $f(E^*, \sigma^*, E_p^*)$ determinadas será posible estimar el valor de la respuesta para cualquier combinación de valores de los parámetros E , σ y E_p ,



previa codificación, siempre y cuando se encuentren dentro del dominio esférico definido anteriormente para este diseño.

3.3. DEFINICIÓN DEL PLAN DE EXPERIMENTACIÓN PARA ACEROS

Procediendo de la misma manera que en el apartado anterior, se realiza un plan de experimentación basado en los mismos parámetros y resultados pero reduciendo el rango de valores del módulo de Young.

Como se observa en la Tabla 3.3., el módulo de Young varía entre 215000 y 190000. Esta reducción del rango se hace para concretar el diseño experimental y la superficie de respuesta para aceros. Sabemos que el módulo de Young de los aceros varía entre el rango seleccionado.

Tabla 3.3. *Parámetros variables en el rango [-1.682,1.682].*

<i>Parámetros variables</i>	
Módulo de Young E	[215000, 190000]
Límite elástico σ	[1200, 50]
Pendiente del módulo plástico E_p	[5000, 100]

La Tabla 3.4. recoge, tanto la matriz de experimentos con las variables codificadas, como la matriz del plan de experimentación con los nuevos valores de los factores del diseño de experimentos propuesto para la determinación de los coeficientes de la función $f(E^*, \sigma^*, E_p^*)$.



Tabla 3.4. *Diseño propuesto para obtener la superficie de respuesta de cada uno de los coeficientes.*

Nº Exp.	<i>Matriz de experimentos</i> (Variables codificadas)			<i>Plan de experimentación</i> (Variables reales)		
	E^*	σ^*	E_p^*	E	σ	E_p
1	-1	-1	-1	195067	283	1093.22
2	1	-1	-1	209933	283	1093.22
3	-1	1	-1	195067	967	1093.22
4	1	1	-1	209933	967	1093.22
5	-1	-1	1	195067	283	4006.78
6	1	-1	1	209933	283	4006.78
7	-1	1	1	195067	967	4006.78
8	1	1	1	209933	967	4006.78
9	-1.682	0	0	190000	625	2550
10	1.682	0	0	215000	625	2550
11	0	-1.682	0	202500	50	2550
12	0	1.682	0	202500	1200	2550
13	0	0	-1.682	202500	625	100
14	0	0	1.682	202500	625	5000
15	0	0	0	202500	625	2550



3.4. DEFINICIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

A continuación se recogen los pasos a seguir en ABAQUS para la generación de un modelo numérico de un ensayo miniatura de punzonado. El modelo consta de varias partes y para su correcto funcionamiento es necesario utilizar varios de los módulos del programa. El software utilizado para la simulación ha sido ABAQUS Explicit.

Cabe destacar que el modelo numérico desarrollado en este apartado es un ejemplo genérico, y que para simular un ejemplo concreto bastará con modificar los parámetros que lo definen, en concreto lo referente al apartado de materiales.

3.4.1. Creación de la geometría del modelo numérico

El primer paso consiste en generar las distintas partes que componen el modelo.

En este caso consta de cuatro partes, una matriz inferior, otra superior, el punzón y la probeta.

Las tres primeras se han modelado como elementos rígidos ya que sus deformaciones durante el ensayo son, prácticamente, despreciables en comparación con las que se producen en la probeta (Figura 3.2.a), mientras que la probeta se ha considerado como un cuerpo deformable elastoplástico (Figura 3.2.b).

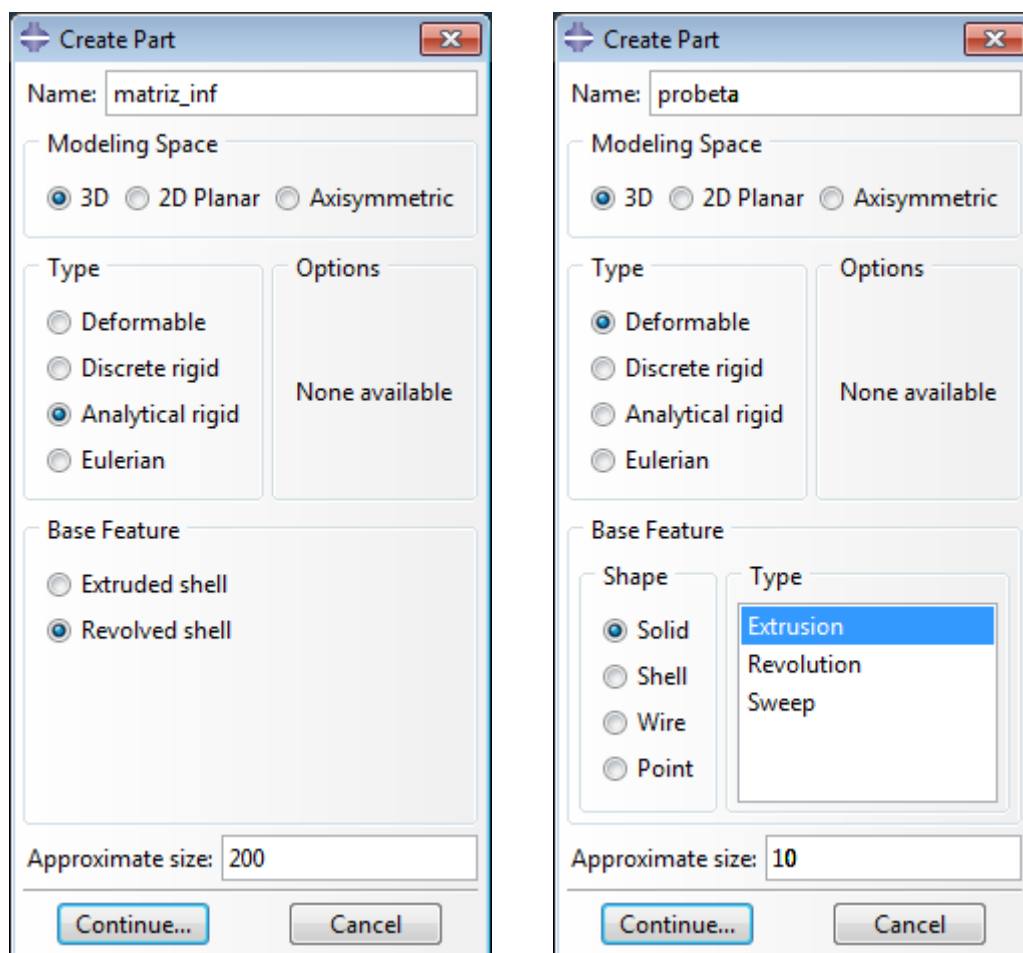


Figura 3.2. a) Creación de la geometría de la matriz inferior, superior y el punzón, b) Creación de la geometría de la probeta del modelo numérico.



La Figura 3.3. y Figura 3.4. muestran las cuatro partes generadas. Las dimensiones de las mismas son:

- Matriz inferior: el diámetro superior mayor de la matriz es de 30 *mm*, el inferior es de 8 *mm*. La altura es de 4 *mm* más 1 *mm* de radio del chaflán.
- Matriz superior: el diámetro inferior mayor de la matriz es de 30 *mm*, el superior es de 5 *mm*. La altura es de 2 *mm* más 1 *mm* de radio del chaflán.
- Probeta: prisma de 10x10x0.5 *mm*., Debido a la simetría que presenta el SPT, se ha modelizado un cuarto de la geometría, utilizando los planos YZ y XY como planos de simetría. Esto se tiene en cuenta más adelante en la obtención de resultados.
-
- Punzón: elemento esférico de radio 2,5 *mm*.

En el caso de los elementos considerados como rígidos, es necesario crear un punto de referencia (*RF*) para controlar su posición y movimiento. En el caso del punzón, que es el punto de referencia de más importancia, se ha generado 1 *mm* por debajo de la superficie del punzón desde su punto central. Dicho punto permitirá extraer en cualquier instante del cálculo resultados numéricos referentes a la misma como datos de posición y movimiento.

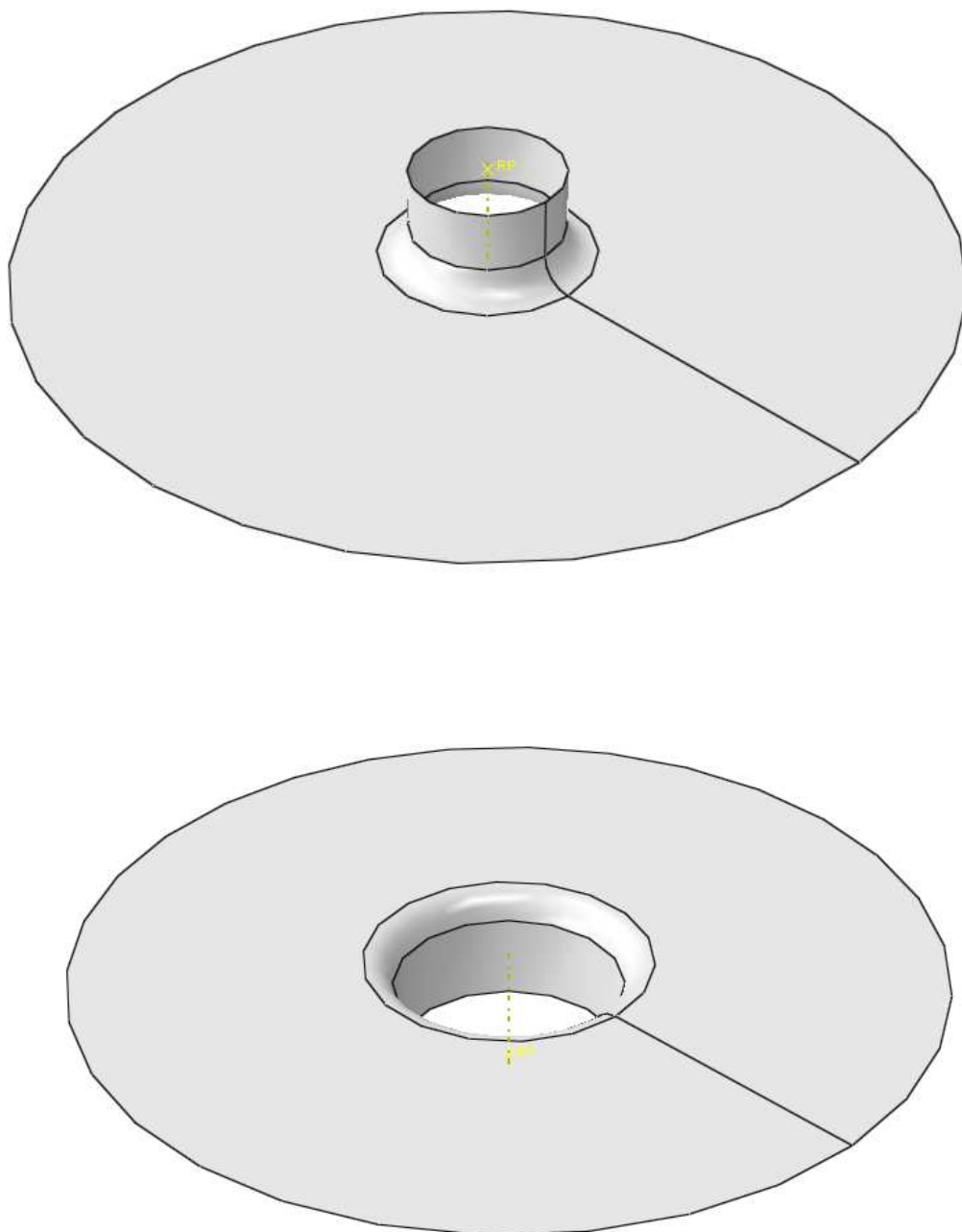


Figura 3.3. Partes del modelo: a) Matriz superior y b) Matriz inferior.

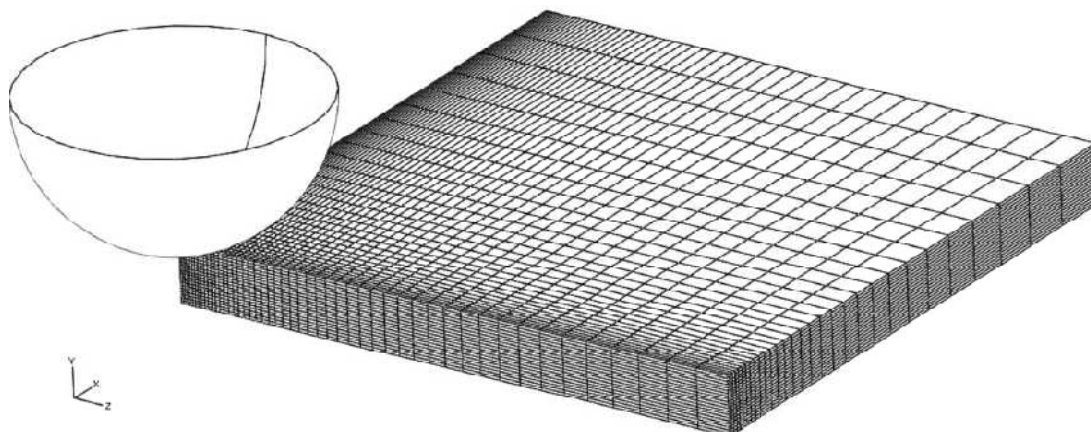


Figura 3.4. Partes del modelo: a) Punzón y b) Probeta de 1/4.

3.4.2. Material

Para el desarrollo del presente trabajo se han empleado el apartado de materiales como punto de partida para el desarrollo de las simulaciones y del plan experimental. En este caso se varían el módulo de Young, el límite elástico y el límite plástico que son los parámetros fundamentales para la definición de las características elastoplásticas de un material.

Para introducir los parámetros en el programa ABAQUS, en el menú de materiales es necesario introducir en el apartado de elasticidad el módulo de Young del experimento y el coeficiente de Poisson, que su valor es constante para todos los diseños experimentales. A continuación, en el apartado plástico, se introducen los datos obtenidos que asemejan la zona plástica de la curva de tensión-deformación a una recta. Dicha recta define los parámetros de límite elástico y módulo plástico.

Con todos estos parámetros se define el material de cada diseño experimental.



3.4.3. Ensamblaje del modelo

Una vez creadas cada una de las partes y asignando el material correspondiente al diseño experimental es necesario generar un ensamblaje con ellas para poder realizar la simulación numérica. Cada una de las partes en el ensamblaje se denomina instancia y tendrá que ser posicionada espacialmente de manera adecuada, por medio de las diferentes herramientas que dispone el software para tal fin, obteniendo finalmente el modelo ensamblado mostrado en la Figura 3.5.

Además de posicionar correctamente cada una de las instancias es necesario definir los diferentes pares de contacto existentes en el modelo. Por un lado, se tiene el par de contacto matriz inferior con probeta y la matriz superior, además del par de contacto entre el punzón y la matriz superior. Estos pares de contacto permiten que el punzón pueda descender y deformar la probeta.

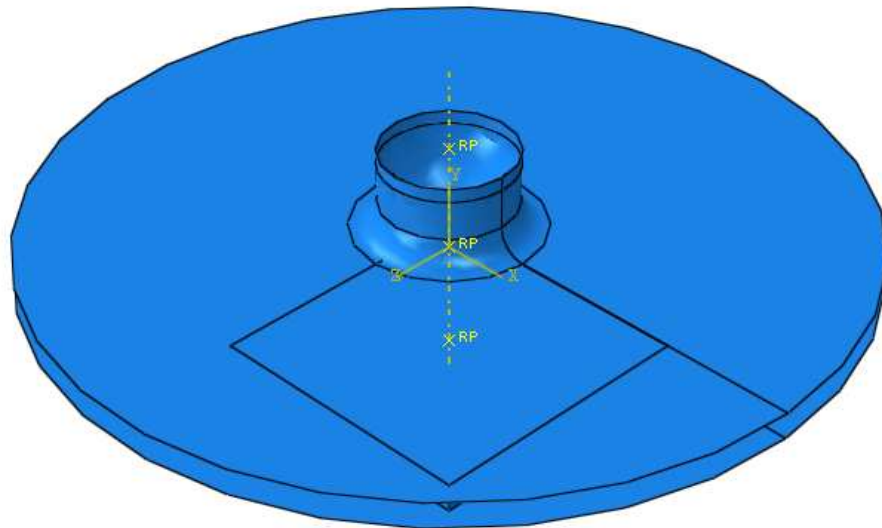


Figura 3. 5. *Ensamblaje del modelo.*



3.4.4. Aplicación de restricciones.

Con el modelo ensamblado es posible aplicar las restricciones necesarias para reproducir el comportamiento real del mismo. En este sentido, hay que tener en cuenta tanto las condiciones de contorno como las cargas existentes.

La condición de entorno que se ha aplicado sobre los puntos de referencia de la matriz inferior y superior, es la condición “*Encastre*”, que restringe los desplazamientos y giros en las tres direcciones del espacio (Figura 3.6.).

Sobre las caras laterales de la probeta se han restringido los giros, pero se permiten los desplazamientos ya que es donde se realiza el ensayo y donde se toma la medida del desplazamiento vertical de la probeta.

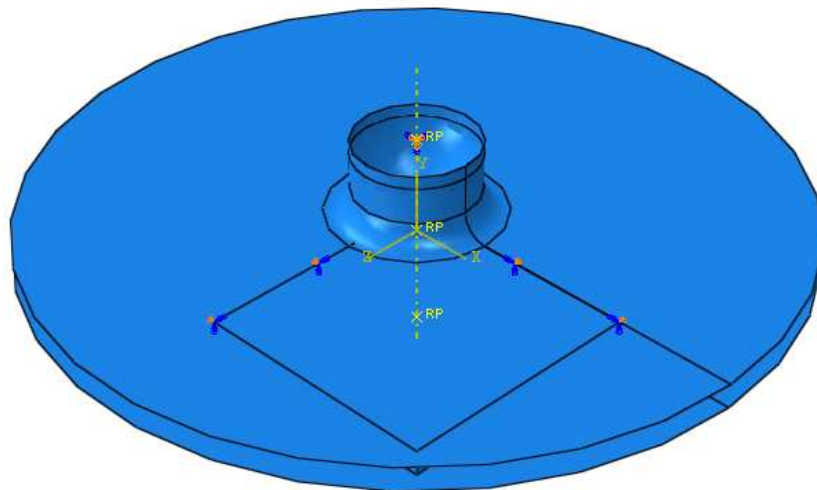


Figura 3. 6. Condición de entorno “*Encastre*” aplicada en el modelo.

En cuanto a las cargas que es necesario aplicar, solamente hay que aplicar el desplazamiento del punzón a su punto de referencia. El punzón desciende medio milímetro en vertical.



3.4.5. Mallado del modelo

Un paso importante dentro del preproceso del modelo es el correspondiente al mallado. La instancia que hay que mallar es la probeta. Se han utilizado elementos hexaédricos de ocho nodos que permiten la creación de un mallado mapeado, siendo el tamaño de elemento empleado de 0.2 mm como puede observarse en la Figura 3.7. Las demás instancias no se les asigna un mallado ya que son rígidos analíticos.

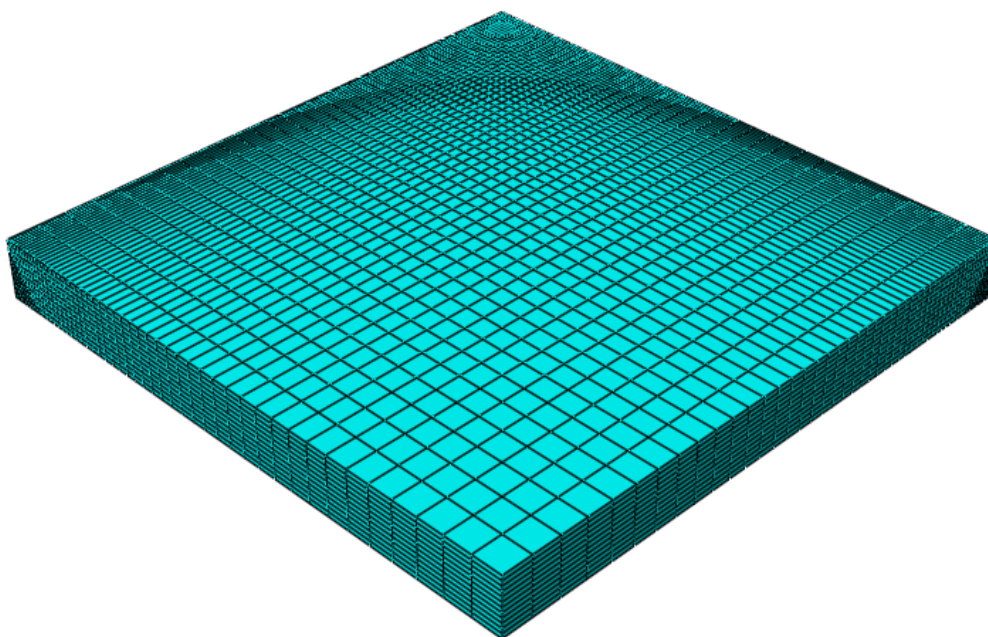


Figura 3. 7. *Mallado del modelo.*

3.4.6. Postproceso de resultados.

Una vez acabado todos los pasos del proceso del modelo numérico es posible lanzar el cálculo obteniendo un fichero de resultados del que se pueden extraer los resultados numéricos necesarios con los que alimentar el diseño de experimentos.

En particular, los datos necesarios para este estudio son las componentes finales (componentes Y) de la fuerza del punto de referencia del punzón durante el ensayo, y su desplazamiento.

A continuación se muestra una imagen de la simulación del ensayo.



“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

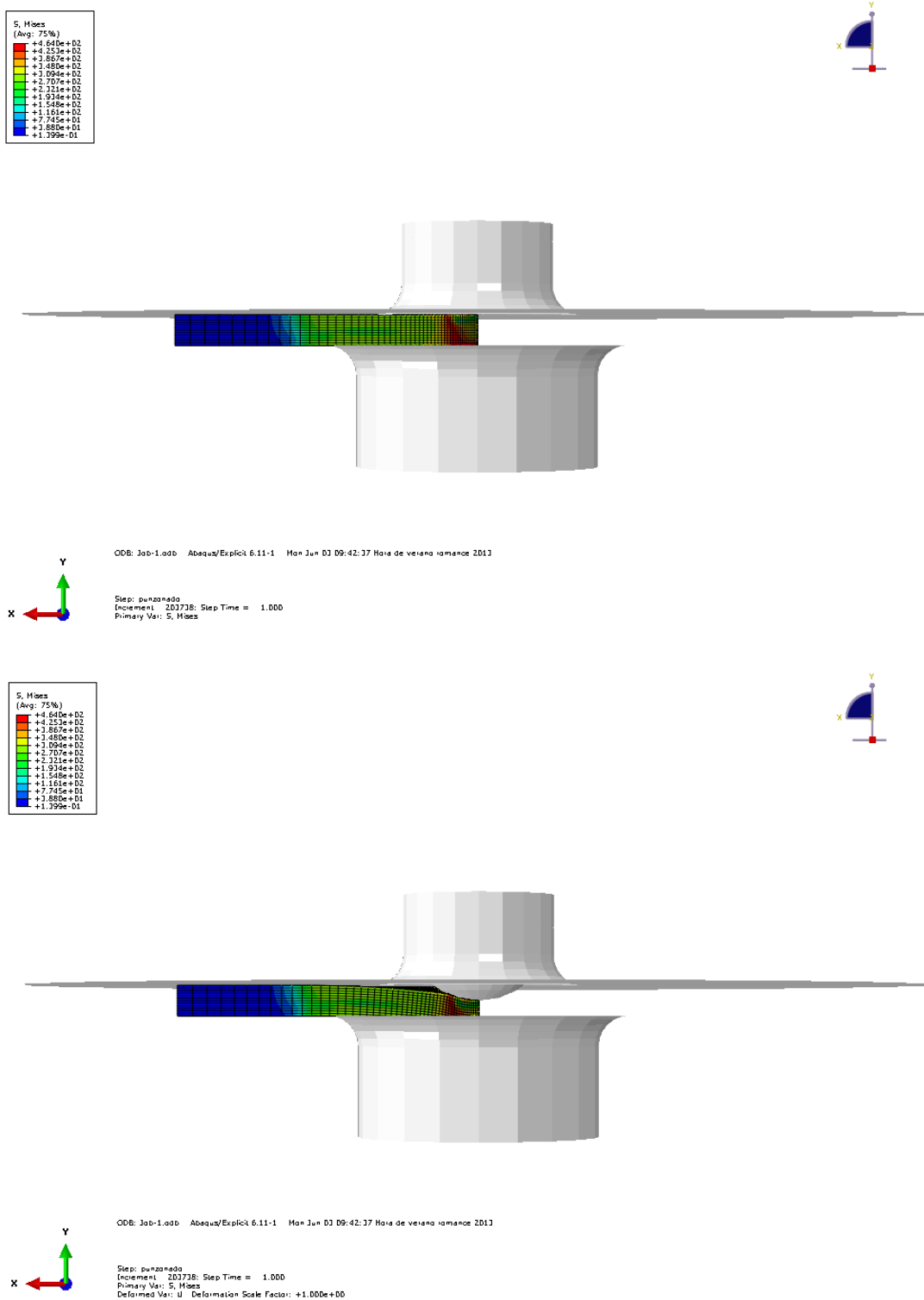


Figura 3. 8. Simulación del ensayo miniatura punzonado, a) Inicio y b) Final.



CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los diseños experimentales llevados a cabo. Se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el programa ABAQUS, así como la superficie de respuesta obtenidas con ayuda del programa NEMRODW.

Los siguientes apartados separan los resultados en función del módulo de Young general y el rango para aceros.

4.2. RESULTADOS DEL PLAN DE EXPERIMENTACIÓN GENERAL

Con estos datos iniciales es necesario realizar una serie de simulaciones numéricas con el programa ABAQUS para poder obtener la superficie de respuesta. Para la creación de dichas simulaciones se procede de la manera comentada en un apartado anterior.

Los resultados obtenidos de las simulaciones son los se utilizan para generar la superficie de respuesta. Los datos obtenidos de las simulaciones son la fuerza y el desplazamiento vertical del punzón, estos datos deben ser tratados anteriormente para poder obtener la superficie de respuestas de los coeficientes requeridos.

Los parámetros variables son el módulo de Young, el límite elástico y el módulo plástico. Estos experimentos siguen el plan de experimentación expuesto en el Capítulo 3.



Primero es necesario transformar las variables reales del plan experimental E , σ y E_p , para obtener la curva de tensión-deformación en forma de dos rectas definidas por la pendiente. Una recta para la zona elástica definida por el módulo de Young y otra para la zona plástica definida por el módulo plástico.

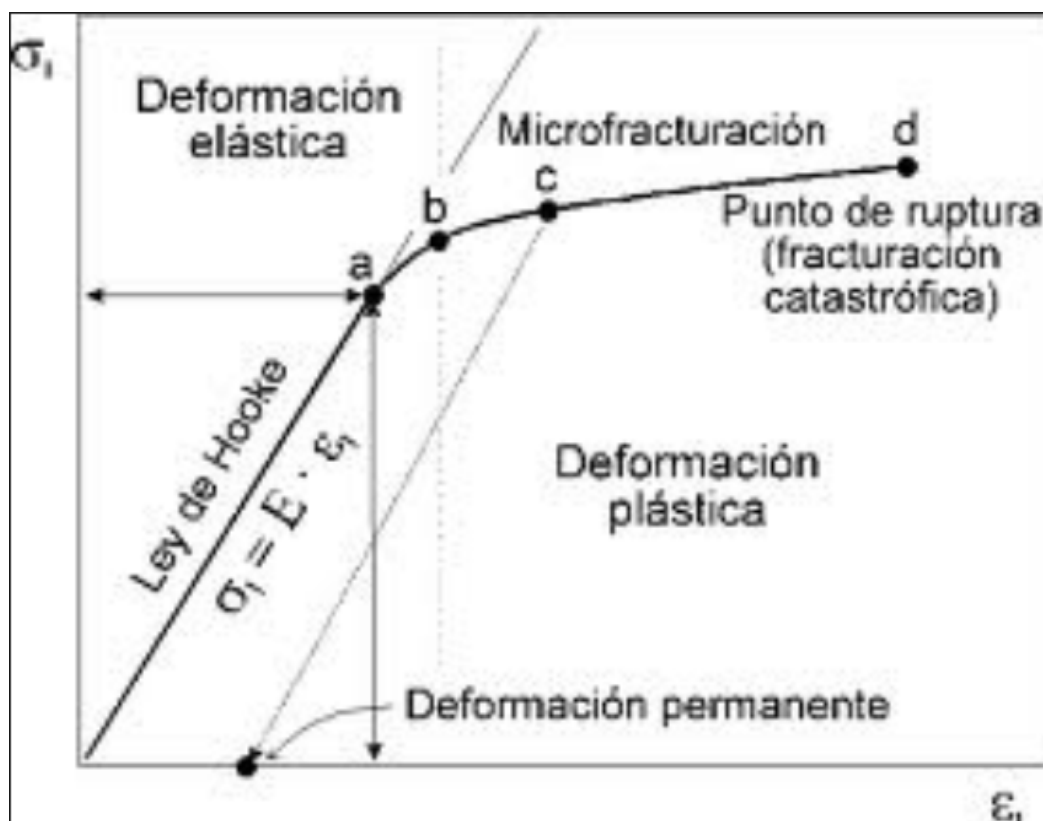


Figura 4. 1. Curva tensión-deformación.

El módulo de Young ya está definido completamente en el plan experimental, y con el límite elástico y el módulo plástico obtenemos dos puntos de la recta correspondiente a la zona plástica mediante una resolución geométrica. Con ayuda de una hoja de cálculo se calculan los puntos necesarios para introducirlos en el programa ABAQUS para cada experimento. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla para cada experimento.



Tabla 4. 1. Datos de entrada de la zona plástica para el programa ABAQUS.

Experimento	Datos Abaqus	
	Yield stress	Plastic strain
1	283	0
	1376.000	0.987927988
2	283	0
	1376.000	0.99478182
3	967	0
	2060.000	0.987927988
4	967	0
	2060.000	0.99478182
5	283	0
	4290.000	0.955743318
6	283	0
	4290.000	0.980869856
7	967	0
	4974.000	0.955743318
8	967	0
	4974.000	0.980869856
9	625	0
	3175.000	0.94900102
10	625	0
	3175.000	0.989799959
11	50	0
	2600.000	0.983
12	1200	0
	3750.000	0.983
13	625	0
	725.000	0.999333333
14	625	0
	5625.000	0.966666667
15	625	0
	3175.000	0.983



4.2.1. Superficie de respuesta para módulo de Young general

En el Anexo 1 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos que conforman el plan de experimentación. Estos resultados mostrados han sido ya modificados para mostrar los resultados reales que se utilizan para calcular los coeficientes para el cálculo de la superficie de respuesta. Ya que los valores obtenidos a través de la simulación de la fuerza vertical, son un cuarto del valor real, ya que la probeta utilizada en la simulación, su superficie es un cuarto de la superficie real.

Con esos valores es posible calcular los coeficientes P_y , $P_{yoffset}$, α y α_{offset} explicados a continuación y recogidos en la Tabla 4.2. que son las respuestas con las que se calculará cada una de las superficies de respuesta.

Una vez realizados los experimentos SPT es necesario realizar un tratamiento adecuado de los datos recogidos. Dichos datos corresponden a los valores de carga aplicada y desplazamiento del punzón. Tras el correcto tratamiento se obtendrá la curva SPT carga-desplazamiento normalizada y los parámetros característicos del ensayo: carga de fluencia (P_y) y carga de fluencia con la línea de referencia desplazada ($P_{yoffset}$).

Tras el correcto tratamiento de los datos almacenados, se obtiene como resultado del ensayo SPT la curva carga-desplazamiento del punzón.

Mediante la ayuda de una hoja Excel es posible realizar todos los pasos requeridos para un tratamiento de los datos satisfactorio. Debido a la influencia que tiene el espesor de la probeta miniatura, la curva tensión-deformación debe ser normalizada a un espesor de referencia (0,5 mm).

Es sobre la curva SPT normalizada en la que se determinan los parámetros característicos del ensayo P_y y $P_{yoffset}$. El valor de P_y se determina a partir del método de las dos tangentes propuesto por Mao et al. [4], que consiste básicamente en trazar una tangente en la región I de la curva SPT y otra en la región II, y obtener su punto de corte, donde la ordenada de dicho punto se toma como el valor de P y (Figura 4.2). El $P_{yoffset}$ se obtiene del corte de la curva carga-desplazamiento y la tangente en



la región I desplazada la décima parte del espesor de la probeta. Como el espesor de la probeta es de 0.5 mm, la tangente estará desplazada 0.05 mm.

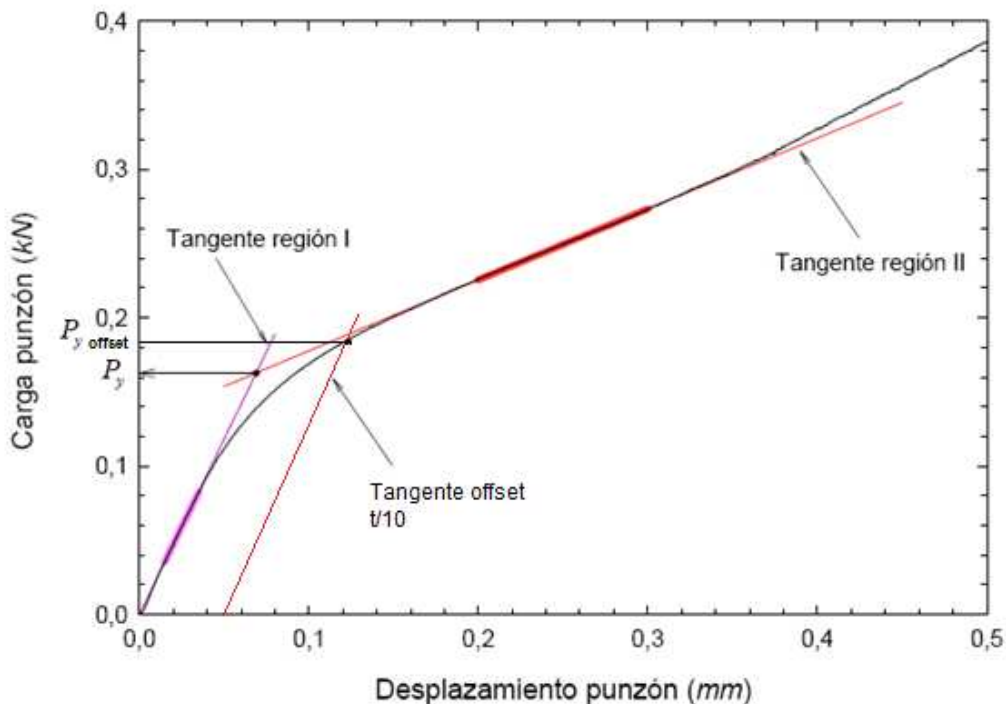


Figura 4. 2. Método de las dos tangentes para determinar P_y .

Una vez realizados los experimentos y extraídos los parámetros característicos de cada experimento es posible estudiar la relación existente entre el límite elástico σ_y y la carga de fluencia en el ensayo miniatura de punzonado, como se muestra en las expresiones (4.1) o (4.2) para obtener el coeficiente α o α_{offset} , respectivamente, sustituyendo los valores obtenidos.

(4.1)

$$\sigma_y = \alpha \cdot \frac{P_y}{t^2}$$

(4.2)

$$\sigma_y = \alpha_{offset} \cdot \frac{P_y}{t^2}$$

Donde t es el espesor y α es un parámetro adimensional característico del material.



Las gráficas para la obtención de los valores de P_y y $P_{yoffset}$ se encuentran en el Anexo 3.

Tabla 4. 2. *Respuestas del plan de experimentación.*

N°Exp	E	σ	E_p	P_y	$P_{yoffset}$	α	α_{offset}
	MPa	MPa	MPa	KN	KN		
1	90540	283	1093	0.708	0.602	99.11	116.63
2	209460	283	1093	0.757	0.658	92.75	106.63
3	90540	967	1093	1.584	1.772	152.98	136.73
4	209460	967	1093	2.153	1.845	112.56	131.36
5	90540	283	4007	0.745	0.722	94.21	97.13
6	209460	283	4007	0.778	0.761	90.18	92.25
7	90540	967	4007	1.686	1.927	143.69	125.74
8	209460	967	4007	2.264	2.015	107.03	120.24
9	50001	625	2550	0.987	1.250	158.25	124.99
10	249999	625	2550	1.608	1.361	97.20	114.77
11	150000	50	2550	0.141	0.181	88.39	69.18
12	150000	1200	2550	2.308	2.286	129.98	131.25
13	150000	625	100	1.408	1.188	110.97	131.53
14	150000	625	5000	1.550	1.415	100.81	110.45
15	150000	625	2550	1.495	1.294	104.51	120.72



Tabla 4. 3. Coeficientes de las superficies de respuesta correspondiente a los valores de P_y y $P_{yoffset}$.

Nombre	P_y		$P_{yoffset}$	
	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %
b_0	1.4931	< 0.01 ***	1.2927	< 0.01 ***
b_1	0.1665	< 0.01 ***	0.0324	0.240 **
b_2	0.6109	< 0.01 ***	0.6119	< 0.01 ***
b_3	0.0373	5.1	0.0681	< 0.01 ***
b_{1-1}	-0.0671	2.82 *	0.0062	50.4
b_{2-2}	-0.0929	0.822 **	-0.0193	7.5
b_{3-3}	-0.0029	90.0	0.0048	60.3
b_{1-2}	0.1331	0.0931 ***	0.0082	32.1
b_{1-3}	-0.0009	96.5	-0.0002	97.5
b_{2-3}	0.0194	35.6	0.0127	14.9

Tabla 4. 4. Coeficientes de las superficies de respuesta correspondiente a los valores de α y α_{offset} .

Nombre	α		α_{offset}	
	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %
b_0	105.141	< 0.01 ***	120.226	< 0.01 ***
b_1	-13.923	0.112 **	-3.144	7.7
b_2	15.373	0.0710 ***	15.071	0.0126 ***
b_3	-2.884	22.4	-6.697	0.518 **
b_{1-1}	7.333	6.6	0.385	86.3
b_{2-2}	0.779	81.3	-6.569	2.71 *
b_{3-3}	-0.387	90.6	0.779	72.9
b_{1-2}	-8.337	2.78 *	0.502	79.7
b_{1-3}	0.763	79.0	0.624	74.9
b_{2-3}	-0.918	74.9	1.470	46.2



En la Tabla 4.3. aparecen los coeficientes de la superficie de respuesta para la carga de fluencia en ambos métodos P_y y $P_{yoffset}$ obtenidos con el software NENROWD. En la Tabla 4.4. se muestran los coeficientes de la superficie de respuesta para los coeficientes α y α_{offset} . Se puede destacar que el coeficiente b_0 , el coeficiente independiente, siempre va a ser significativo para todas las respuestas y materiales.

Para el coeficiente P_y , los coeficientes significativos son el b_1 , b_2 , b_{1-1} , b_{2-2} y b_{1-2} . Los dos primeros corresponden a los parámetros del plan experimental, módulo de Young (E) y límite elástico (σ). Además tiene importancia el b_{1-2} , que es la interacción del módulo de Young y el límite elástico ($E*\sigma$). También es influyente el b_{1-1} correspondiente al módulo de Young al cuadrado (E^2) y el b_{2-2} correspondiente al cuadrado del límite elástico (σ^2), aunque son menos importantes que los anteriores.

Para el coeficiente $P_{yoffset}$, los coeficientes significativos son el b_1 , b_2 y b_3 . Los dos últimos corresponden a dos de los parámetros del plan experimental, el límite elástico y el módulo plástico (σ y E_p). Además es influyente el b_1 , correspondiente a otro parámetro del plan experimental, el módulo de Young (E), aunque es menos importante que los anteriores. Esta respuesta se rige por los tres parámetros del plan experimental.

Para el coeficiente α , los coeficientes significativos son el b_1 , b_2 y b_{1-2} . El más influyente corresponde al b_2 que es un parámetro del plan experimental, el límite elástico (σ). El siguiente más influyente es el b_1 correspondiente al módulo de Young (E). Y por último, el b_{1-2} , correspondiente a la interacción entre el módulo de Young y el límite elástico ($E*\sigma$). Por lo tanto esta respuesta únicamente se rige por dos parámetros.

Para el coeficiente α_{offset} , los coeficientes significativos son el b_2 , b_3 y b_{2-2} . El más influyente corresponde al b_2 que es un parámetro del plan experimental, el límite elástico (σ). El siguiente más influyente es el b_3 correspondiente el módulo plástico (E_p). Y por último, el b_{2-2} , correspondiente al cuadrado del límite elástico (σ^2). Por lo tanto esta respuesta únicamente se rige por dos parámetros.



A continuación se observa en la Figura 4.3 y Figura 4.4., cuatro gráficas en cada una correspondientes a las cuatro respuestas P_y , $P_{yoffset}$, α y α_{offset} . Las gráficas que se encuentran a la derecha muestran cómo obtener los valores máximos y mínimos de las respuestas variando los parámetros variables en el plan de experimentación. La línea azul (1) corresponde al módulo de Young, la roja (2) al límite elástico y la verde (3) al módulo plástico. Las gráficas de la izquierda muestran los valores máximos y mínimos que se pueden obtener de la respuesta para cada uno de los coeficientes P_y , $P_{yoffset}$, α y α_{offset} .

Para obtener un valor máximo del P_y , que sería de 2.5 según la gráfica, es necesario que el módulo de Young adquiera un valor codificado de 0.75, el límite elástico sea -1.5 y el módulo plástico tome un valor cercano a 0.2, como se observa en la Figura 4.2.a.

Para obtener un valor máximo del $P_{yoffset}$, según la Figura 4.2.b, aproximadamente de 2.3, se necesita que el módulo de Young tenga un valor codificado de aproximadamente 0.1, el límite elástico debe ser el correspondiente al 1.6 y el módulo plástico esté muy cercano a 0.25.

Para obtener un valor máximo del α , según la Figura 4.3.a, que sería de 170, es necesario que el módulo de Young adquiera un valor codificado de -1.5, el límite elástico sea aproximadamente 1 y el módulo plástico tome un valor codificado de -0.2.

Para obtener un valor máximo del α_{offset} , según la Figura 4.3.b, que sería de aproximadamente 150, es necesario que el módulo de Young adquiera un valor codificado de -0.75, el límite elástico sea aproximadamente 0.5 y el módulo plástico tome un valor codificado de -1.5.

Para obtener los valores mínimos o cualquier otro se procederá de manera análoga.

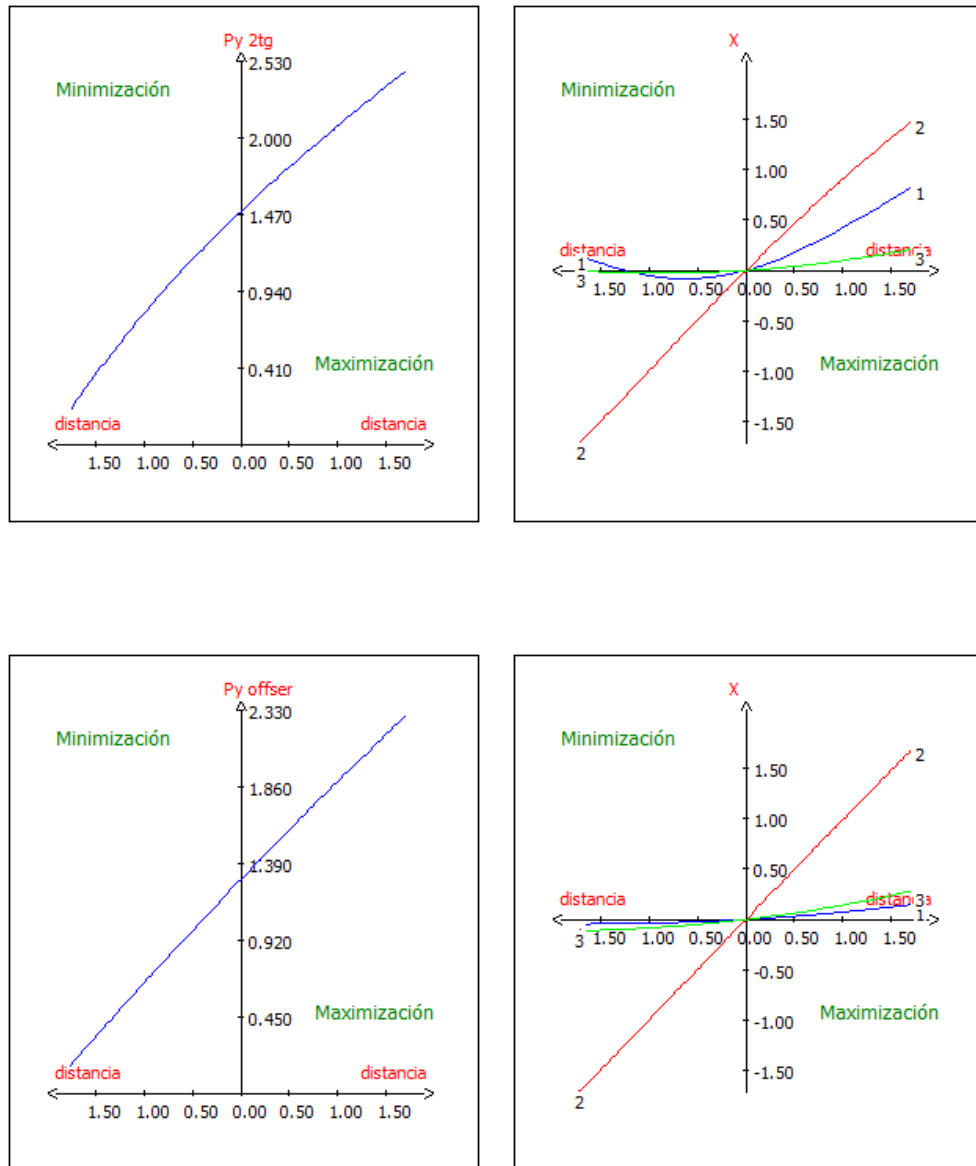


Figura 4. 3. Estudio del camino óptimo de la respuesta: a) P_y y b) P_{offset} .



“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

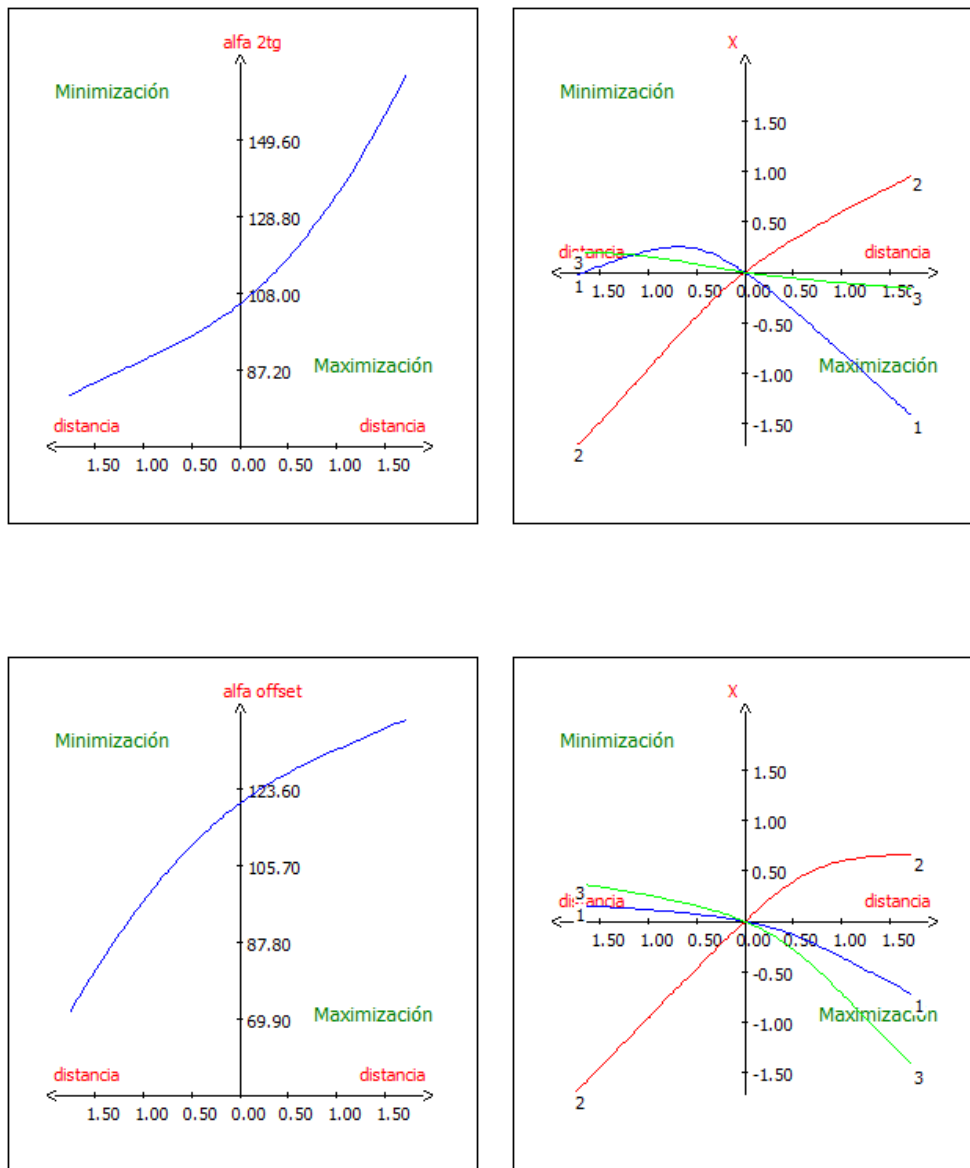


Figura 4. 4. Estudio del camino óptimo de la respuesta: a) α y b) α_{offset} .



4.3. RESULTADOS DEL PLAN DE EXPERIMENTACIÓN PARA ACEROS

La forma de proceder en este apartado es de igual manera al anterior.

Primero es necesario transformar las variables reales del plan experimental E , σ y E_p , para obtener la curva de tensión-deformación en forma de dos rectas definidas por la pendiente.

Con ayuda de una hoja de cálculo Excel se calculan los puntos necesarios para introducirlos en el programa ABAQUS para cada experimento. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla para cada experimento.



Tabla 4. 5. Datos de entrada de la zona plástica para el programa ABAQUS.

Experimento	Datos Abaqus	
	Yield stress	Plastic strain
1	283.102379	0
	1376.321211	0.994395688
2	283.102379	0
	1376.321211	0.994792524
3	966.897621	0
	2060.116453	0.994395688
4	966.897621	0
	2060.116453	0.994792524
5	283.102379	0
	4289.883547	0.979459508
6	283.102379	0
	4289.883547	0.98091396
7	966.897621	0
	4973.678789	0.979459508
8	966.897621	0
	4973.678789	0.98091396
9	625	0
	3175	0.986578947
10	625	0
	3175	0.988139535
11	50	0
	2600	0.987407407
12	1200	0
	3750	0.987407407
13	625	0
	725	0.999506173
14	625	0
	5625	0.975308642
15	625	0
	3175	0.987407407



4.3.1. Superficie de respuesta para aceros

En el Anexo 2 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos que conforman el plan de experimentación. Estos resultados se encuentran modificados como se ha explicado en el apartado anterior.

La forma de calcular los coeficientes P_y , $P_{yoffset}$, α y α_{offset} es de igual manera que en el punto 4.2.1. y están recogidos en la Tabla 4.6

Las gráficas para la obtención de los valores de P_y y $P_{yoffset}$ se encuentran en el Anexo 4.

Tabla 4. 6. *Respuestas del plan de experimentación.*

NºExp	E	σ	E_p	P_y	$P_{yoffset}$	α	α_{offset}
	MPa	MPa	MPa	KN	KN		
1	195067	283	1093	0.753	0.651	93.19	107.8410
2	209933	283	1093	0.758	0.659	92.62	106.5070
3	195067	967	1093	2.143	1.905	113.09	127.1762
4	209933	967	1093	2.184	1.918	110.96	126.3559
5	195067	283	4007	0.778	0.752	90.25	93.3289
6	209933	283	4007	0.777	0.761	90.29	92.2529
7	195067	967	4007	2.246	2.036	107.89	118.9952
8	209933	967	4007	2.267	2.015	106.88	120.2709
9	189999	625	2550	1.605	1.466	97.37	106.6058
10	215001	625	2550	1.580	1.337	98.91	116.8639
11	202500	50	2550	0.142	0.180	88.05	69.4117
12	202500	1200	2550	2.596	2.377	115.56	126.2334
13	202500	625	100	1.486	1.195	105.18	130.7017
14	202500	625	5000	1.602	1.443	97.53	108.2926
15	202500	625	2550	1.568	1.307	99.66	119.5532



Tabla 4. 7. Coeficientes de las superficies de respuesta correspondiente a los valores de P_y y $P_{yoffset}$.

Nombre	P_y		$P_{yoffset}$	
	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %
b_0	1.5696	< 0.01 ***	1.3065	< 0.01 ***
b_1	0.0018	70.9	-0.0153	21.9
b_2	0.7251	< 0.01 ***	0.6404	< 0.01 ***
b_3	0.0313	0.105 **	0.0620	0.231 **
b_{1-1}	0.0061	41.7	0.0341	9.1
b_{2-2}	-0.0728	0.0133 ***	-0.0094	58.8
b_{3-3}	-0.0110	17.2	0.0050	77.2
b_{1-2}	0.0073	28.0	-0.0033	82.7
b_{1-3}	-0.0031	62.9	-0.0042	78.1
b_{2-3}	0.0179	3.12 *	0.0031	83.4

Tabla 4. 8. Coeficientes de las superficies de respuesta correspondiente a los valores de α y α_{offset} .

Nombre	α		α_{offset}	
	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %
b_0	99.62815	< 0.01 ***	119.0725 8	< 0.01 ***
b_1	-0.07908	80.3	1.12012	49.0
b_2	8.69426	< 0.01 ***	13.79753	0.0257 ***
b_3	-2.00747	0.113 **	-5.91056	1.10 *
b_{1-1}	-0.49333	32.4	-2.09915	39.5
b_{2-2}	0.80245	13.5	-7.01792	2.66 *
b_{3-3}	0.64335	21.3	0.64525	78.6
b_{1-2}	-0.32625	44.4	0.35818	86.2
b_{1-3}	0.21625	60.5	0.29424	88.7
b_{2-3}	-0.50125	25.8	1.81254	39.8



En la Tabla 4.7. aparecen los coeficientes de la superficie de respuesta para la carga de fluencia en ambos métodos P_y y $P_{yoffset}$. En la Tabla 4.8. se muestran los coeficientes de la superficie de respuesta para los coeficientes α y α_{offset} . Se puede destacar que el coeficiente b_0 , el coeficiente independiente, siempre va a ser significativo para todas las respuestas y materiales. También destaca que en este diseño el coeficiente b_1 , correspondiente al módulo de Young, y sus interacciones no son significativos.

Para el coeficiente P_y , los coeficientes significativos son el b_2 , b_{2-2} , b_3 y b_{2-3} . El primero corresponde al parámetro del plan experimental límite elástico (σ). Además tiene importancia el b_{2-2} correspondiente al cuadrado del límite elástico (σ^2). También son significativos pero menos que los anteriores, el b_3 correspondiente al módulo plástico (E_p) y el b_{2-3} , el menos significativo, que es la interacción en el límite elástico y el módulo plástico ($\sigma * E_p$).

Para el coeficiente $P_{yoffset}$, los coeficientes significativos son el b_2 y b_3 . El primero corresponde al parámetro del plan experimental límite elástico (σ). También es significativo pero menos que el anterior, el b_3 correspondiente al módulo plástico (E_p).

Para el coeficiente α , los coeficientes significativos son el b_2 y b_3 . El más influyente corresponde al b_2 que es un parámetro del plan experimental, el límite elástico (σ). El otro coeficiente es el b_3 , correspondiente al módulo plástico (E_p).

Para el coeficiente α_{offset} , los coeficientes significativos son el b_2 , b_3 y b_{2-2} . El primero y más significativo corresponde a un parámetro del plan experimental, el límite elástico (σ). Los otros dos son menos significativos y corresponden el b_3 a un parámetro del plan experimental, el módulo plástico (E_p) y el b_{2-2} correspondiente al cuadrado del límite elástico (σ^2).



A continuación se observa en la Figura 4.5 y Figura 4.6., cuatro gráficas en cada una correspondientes a las cuatro respuestas P_y , $P_{yoffset}$, α y α_{offset} . Las gráficas que se encuentran a la derecha muestran cómo obtener los valores máximos y mínimos de las respuestas variando los parámetros variables en el plan de experimentación. La línea azul (1) corresponde al módulo de Young, la roja (2) al límite elástico y la verde (3) a la pendiente del módulo plástico (E_p). Las gráficas de la izquierda muestran los valores máximos y mínimos que se pueden obtener de la respuesta para cada uno de los coeficientes P_y , $P_{yoffset}$, α y α_{offset} .

Para obtener un valor máximo del P_y , que sería de 2.66 según la gráfica, es necesario que el módulo de Young adquiera un valor codificado de 0, el límite elástico sea 1.6 y el módulo plástico tome un valor cercano a 0.2, como se observa en la Figura 4.5.a.

Para obtener un valor máximo del $P_{yoffset}$, según la Figura 4.5.b, aproximadamente de 2.42, se necesita que el módulo de Young tenga un valor codificado aproximadamente de -0.1, el límite elástico debe ser el correspondiente al 1.6 y el módulo plástico esté muy cercano a 0.25.

Para obtener un valor máximo del α , según la Figura 4.6.a, que sería de 120, es necesario que el módulo de Young adquiera un valor codificado de -0.1, el límite elástico sea aproximadamente 1.65 y el módulo plástico tome un valor codificado de -0.5.

Para obtener un valor máximo del α_{offset} , según la Figura 4.6.b, que sería de aproximadamente 130, es necesario que el módulo de Young adquiera un valor codificado de -0.15, el límite elástico sea aproximadamente 0.5 y el módulo plástico tome un valor codificado de 0.5.

Para obtener los valores mínimos o cualquier otro se procederá de manera análoga.

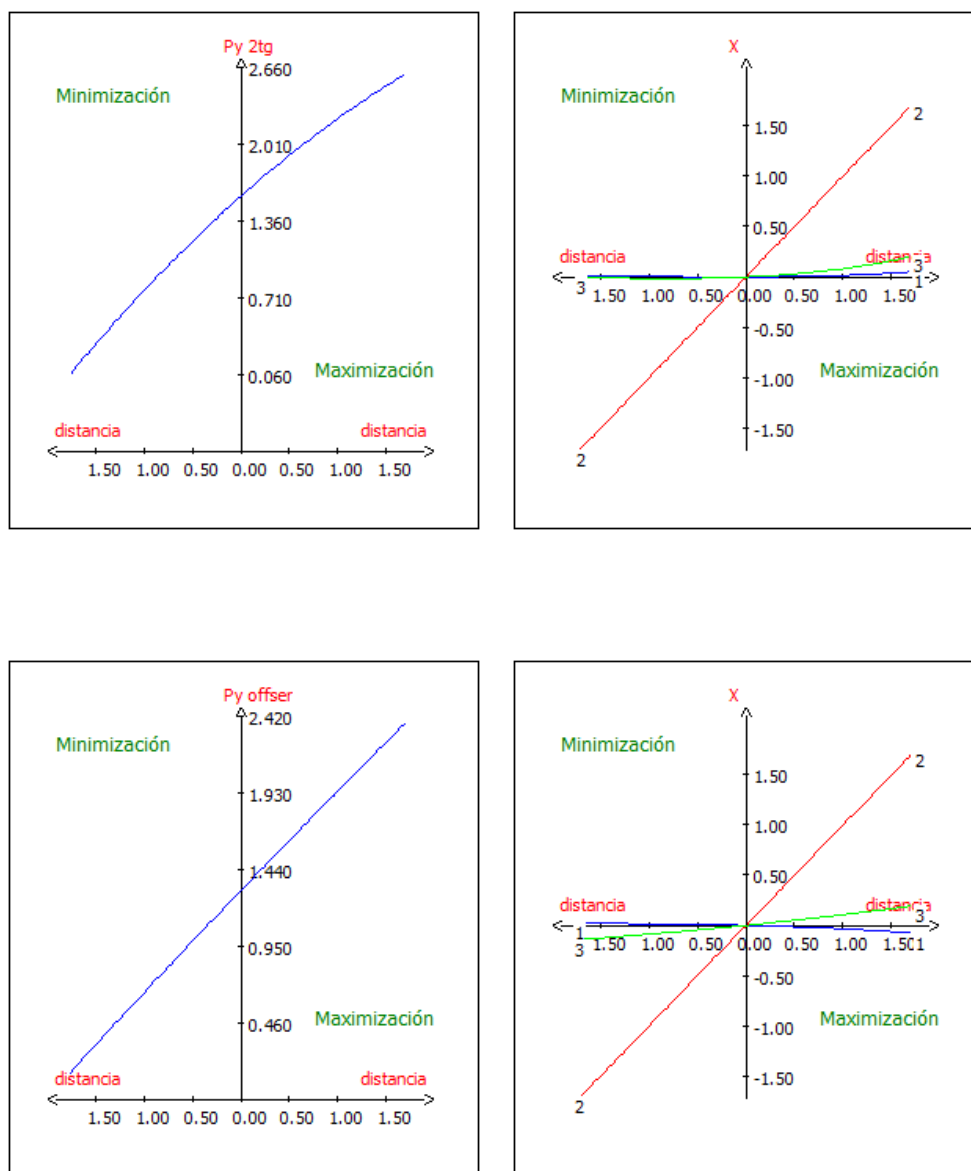


Figura 4. 5. Estudio del camino óptimo de la respuesta: a) P_y y b) $P_{yoffset}$.

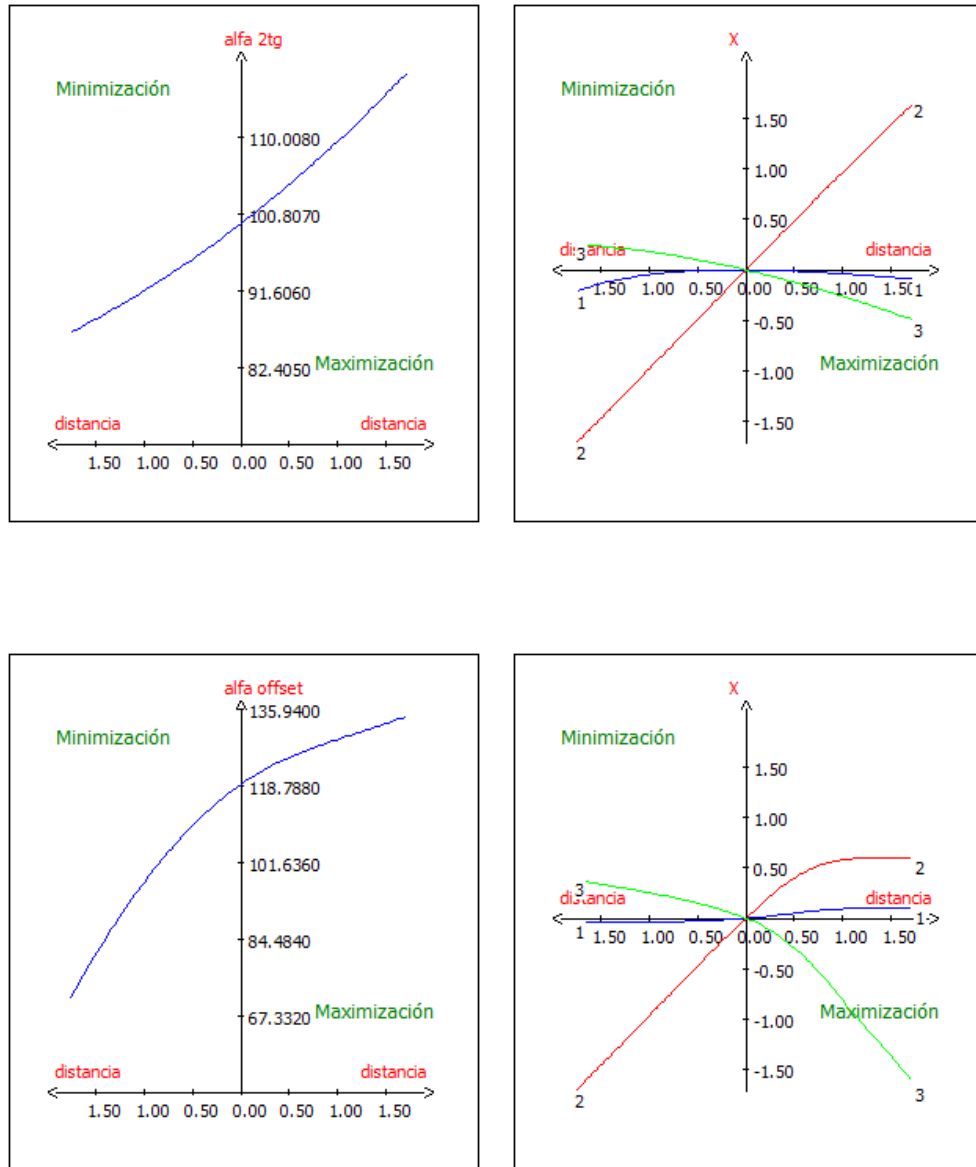


Figura 4. 6. Estudio del camino óptimo de la respuesta: a) α y b) α_{offset} .



4.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para la realización del análisis de los resultados obtenidos se procede a la sustitución de los coeficientes obtenidos en la ecuación de la superficie de respuesta. Una vez realizado este paso, se puede sustituir en la ecuación los parámetros conocidos y obtener así los parámetros desconocidos resolviendo la ecuación.

4.4.1 Superficie de respuesta para módulo de Young general.

Se muestran a continuación las ecuaciones del diseño experimental aplicando los coeficientes obtenidos por el software para cada uno de los coeficientes P_y , $P_{yoffset}$,

α y α_{offset}

(4.3)

$$\begin{aligned} f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_y} &= 1.4931 + 0.1665 \cdot E^* + 0.6109 \cdot \sigma^* + 0.0373 \cdot E_p^* - 0.0671 \cdot E^{*2} \\ &\quad - 0.0929 \cdot \sigma^{*2} - 0.0029 \cdot E_p^{*2} + 0.1331 \cdot E^* \cdot \sigma^* - 0.0009 \cdot E^* \cdot E_p^* \\ &\quad + 0.0194 \cdot \sigma^* \cdot E_p^* \end{aligned}$$

(4.4)

$$\begin{aligned} f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_{yoffset}} &= 1.2927 + 0.0324 \cdot E^* + 0.6119 \cdot \sigma^* + 0.0681 \cdot E_p^* + 0.0062 \cdot E^{*2} \\ &\quad - 0.0193 \cdot \sigma^{*2} + 0.0048 \cdot E_p^{*2} + 0.0082 \cdot E^* \cdot \sigma^* - 0.0002 \cdot E^* \cdot E_p^* \\ &\quad + 0.0127 \cdot \sigma^* \cdot E_p^* \end{aligned}$$

(4.5)

$$\begin{aligned} f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha} &= 105.141 - 13.923 \cdot E^* + 15.373 \cdot \sigma^* - 2.884 \cdot E_p^* + 7.333 \cdot E^{*2} \\ &\quad + 0.779 \cdot \sigma^{*2} - 0.387 \cdot E_p^{*2} - 8.337 \cdot E^* \cdot \sigma^* + 0.763 \cdot E^* \cdot E_p^* - 0.918 \\ &\quad \cdot \sigma^* \cdot E_p^* \end{aligned}$$

(4.6)

$$\begin{aligned} f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha_{offset}} &= 120.226 - 3.144 \cdot E^* + 15.071 \cdot \sigma^* - 6.697 \cdot E_p^* + 0.385 \cdot E^{*2} \\ &\quad - 6.569 \cdot \sigma^{*2} + 0.779 \cdot E_p^{*2} + 0.502 \cdot E^* \cdot \sigma^* - 0.624 \cdot E^* \cdot E_p^* + 1.47 \cdot \sigma^* \\ &\quad \cdot E_p^* \end{aligned}$$



Para obtener los valores de E^* , σ^* y E_p^* bastaría con igualar cada ecuación al valor que buscamos del coeficiente que corresponda, obtenido mediante el ensayo miniatura de punzado o bien realizar lo opuesto, determinar los valores finales del ensayo conociendo los parámetros de módulo de Young, límite elástico y plástico.

También se pueden deducir los valores buscados de forma gráfica, utilizando las superficies de respuesta obtenidas que se muestran a continuación siguiendo el siguiente orden:

- **Figura 4.7.** Variación de la respuesta P_y en función de E , σ y E_p .
- **Figura 4.8.** Variación de la respuesta $P_{yoffset}$ en función de E , σ y E_p .
- **Figura 4.9.** Variación de la respuesta α en función de E , σ y E_p .
- **Figura 4.10.** Variación de la respuesta α_{offset} en función de E , σ y E_p .

Para ello, ha sido necesario fijar uno de los tres parámetros para realizar la representación gráfica. En cada uno de los tres casos, se fija uno de los parámetros con el valor de su variable codificada en 0.

Se muestran a continuación en la siguiente tabla los valores de las variables fijadas para cada una de las tres representaciones gráficas de cada una de las Figuras descritas anteriormente.

Tabla 4. 9. Valores fijados en las representaciones gráficas.

E	150000 MPa
E_p	2550 MPa
σ	625 MPa



“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

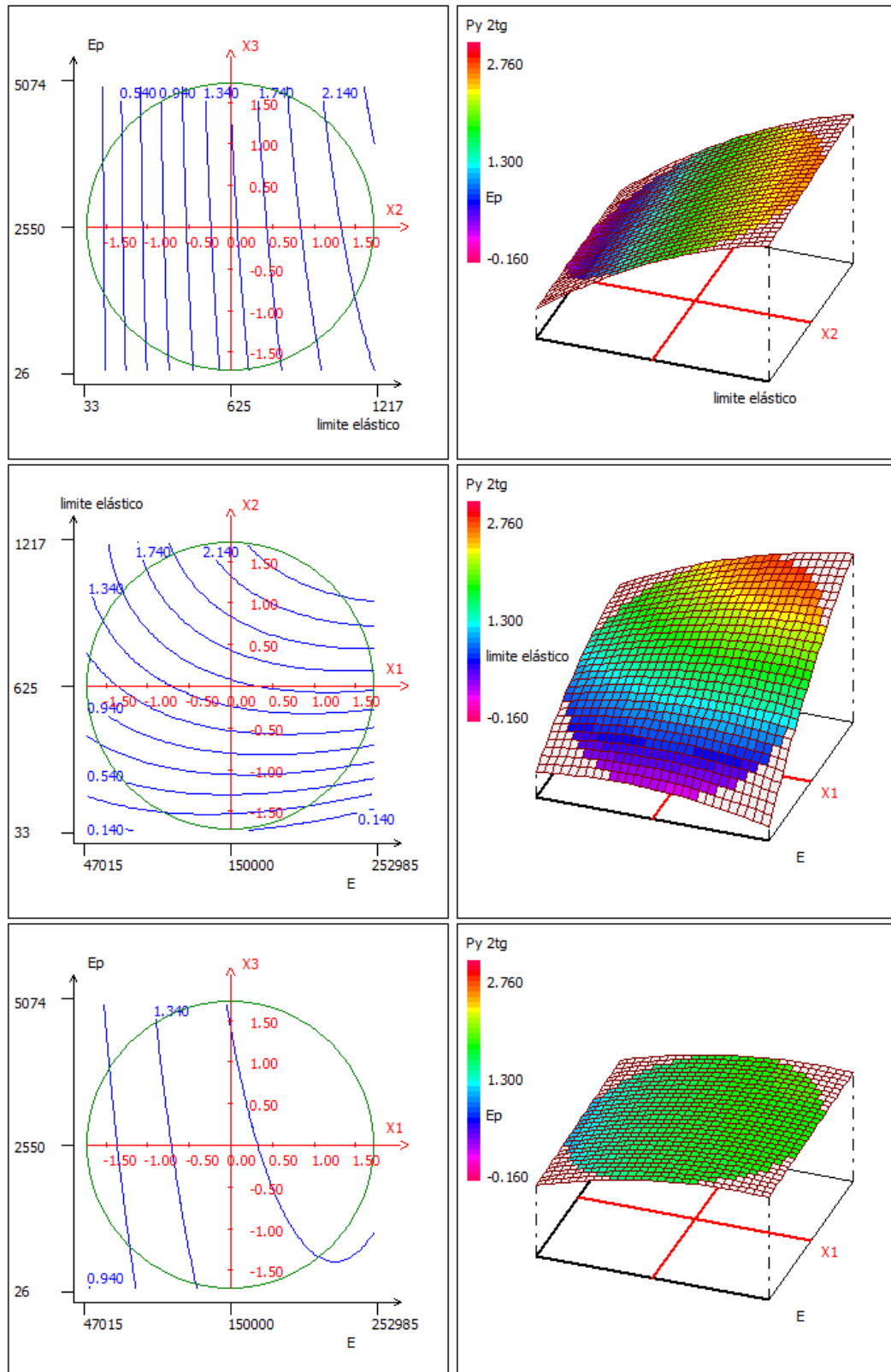


Figura 4.7. Variación de la respuesta P_y en función de E , σ y E_p .



“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

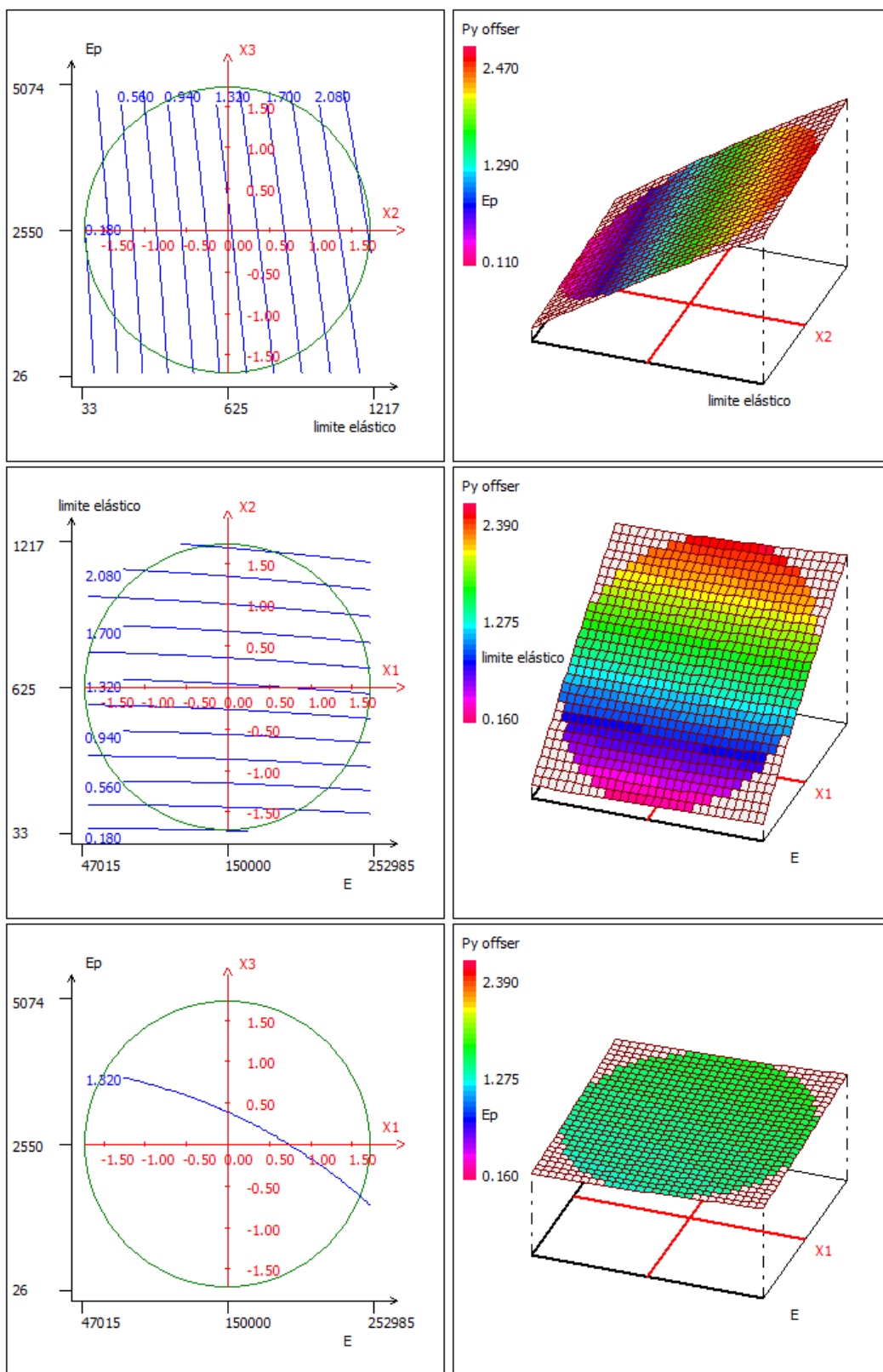


Figura 4.8. Variación de la respuesta $P_{yoffset}$ en función de E , σ y E_p .



“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

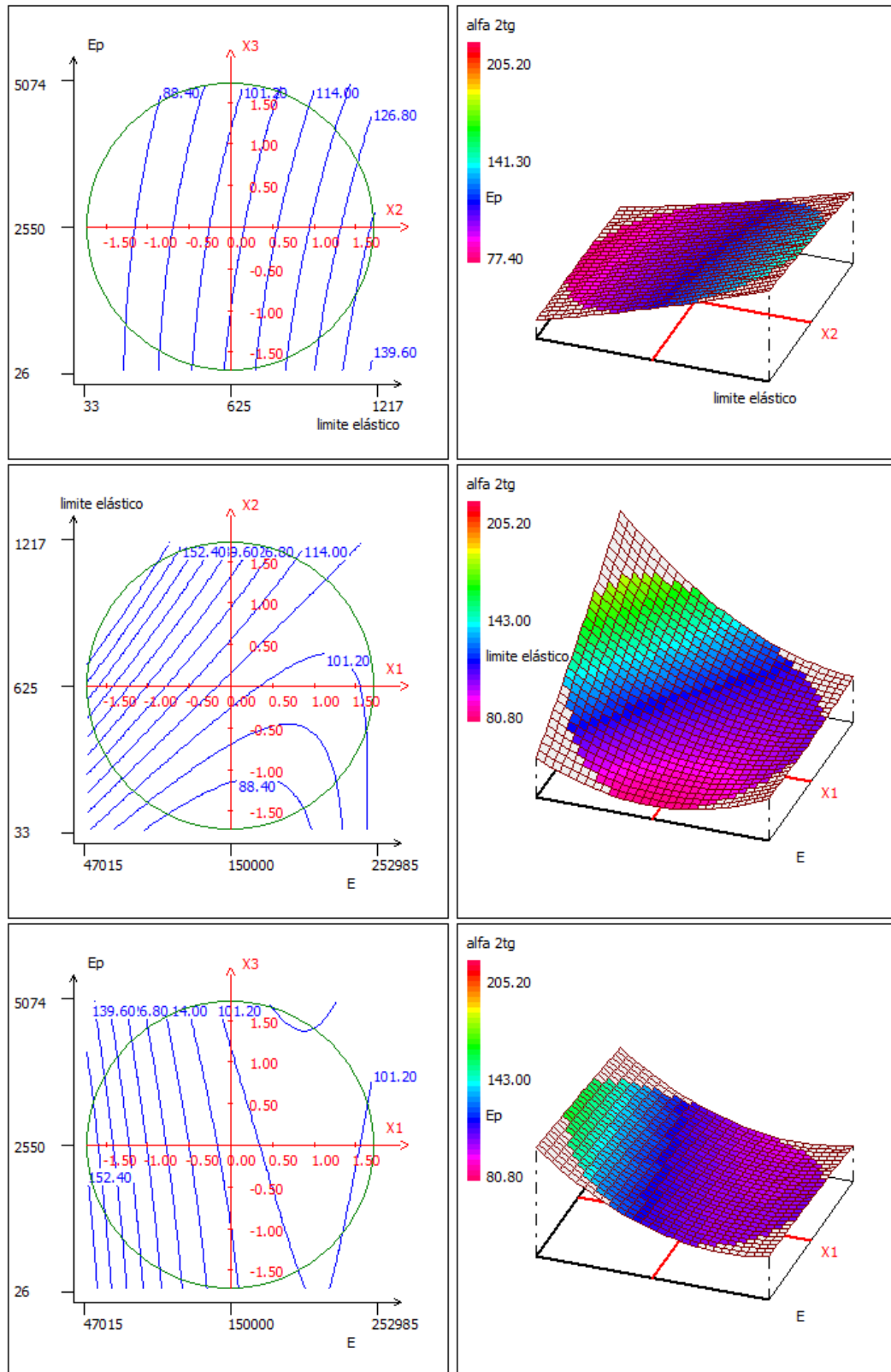


Figura 4.9. Variación de la respuesta α en función de E , σ y E_p .



“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

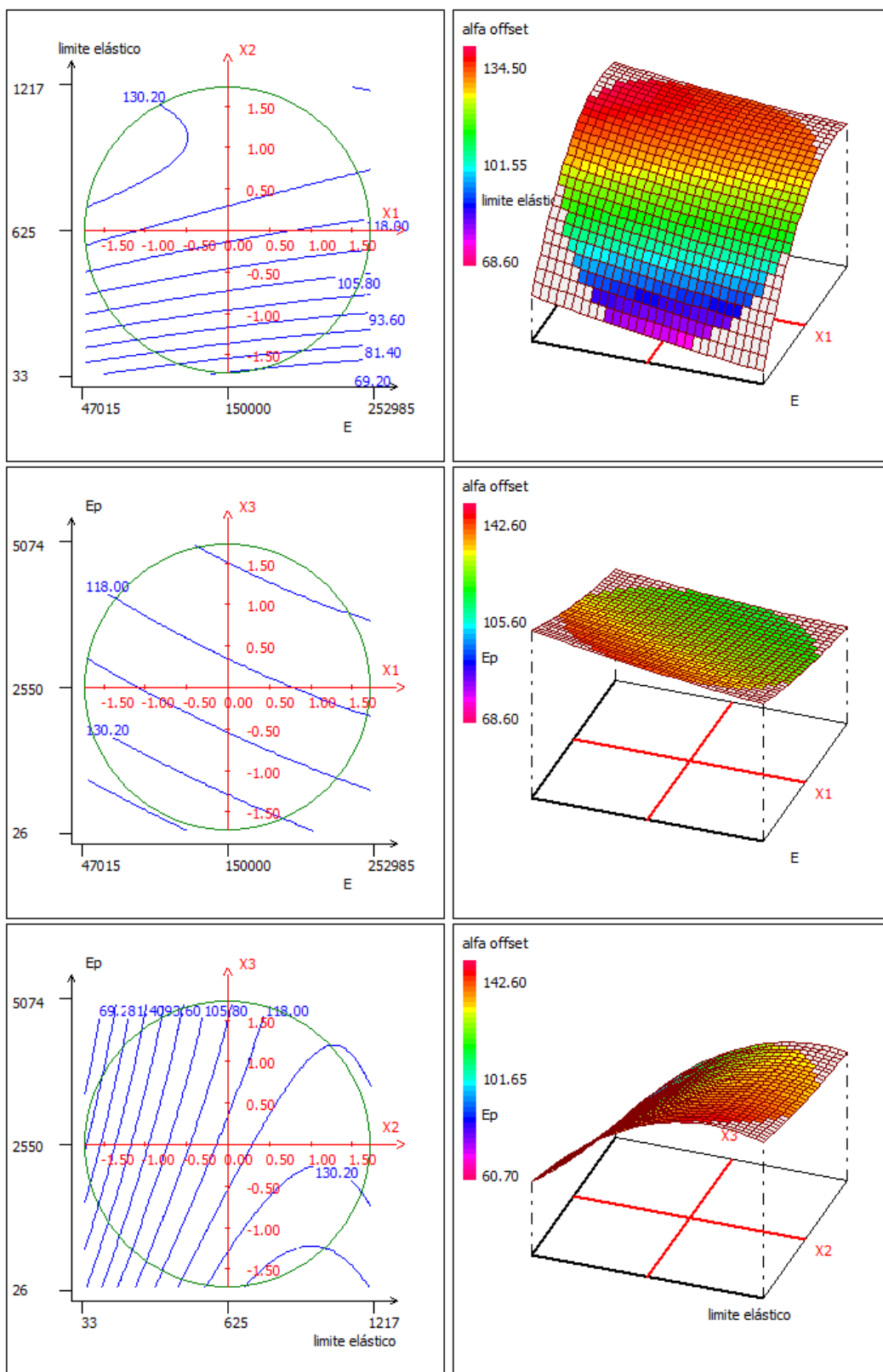


Figura 4.10. Variación de la respuesta α_{offset} en función de E , σ y Ep .



4.4.2 Superficie de respuesta para aceros

Se muestran a continuación las ecuaciones del diseño experimental aplicando los coeficientes obtenidos por el software para cada uno de los coeficientes P_y , $P_{yoffset}$,

α y α_{offset} .

(4.7)

$$\begin{aligned} f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_y} = & 1.5696 + 0.0018 \cdot E^* + 0.7251 \cdot \sigma^* + 0.0313 \cdot E_p^* + 0.0061 \cdot E^{*2} \\ & - 0.0728 \cdot \sigma^{*2} - 0.0110 \cdot E_p^{*2} + 0.0073 \cdot E^* \cdot \sigma^* - 0.0031 \cdot E^* \cdot E_p^* \\ & + 0.0179 \cdot \sigma^* \cdot E_p^* \end{aligned}$$

(4.8)

$$\begin{aligned} f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_{yoffset}} = & 1.3065 - 0.0153 \cdot E^* + 0.6404 \cdot \sigma^* + 0.0620 \cdot E_p^* + 0.0341 \cdot E^{*2} \\ & - 0.0094 \cdot \sigma^{*2} + 0.0050 \cdot E_p^{*2} - 0.0033 \cdot E^* \cdot \sigma^* - 0.0042 \cdot E^* \cdot E_p^* \\ & + 0.0031 \cdot \sigma^* \cdot E_p^* \end{aligned}$$

(4.9)

$$\begin{aligned} f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha} = & 99.62815 - 0.07908 \cdot E^* + 8.69426 \cdot \sigma^* - 2.00747 \cdot E_p^* - 0.49333 \\ & \cdot E^{*2} + 0.80245 \cdot \sigma^{*2} + 0.64335 \cdot E_p^{*2} - 0.32625 \cdot E^* \cdot \sigma^* + 0.21625 \cdot E^* \\ & \cdot E_p^* - 0.50125 \cdot \sigma^* \cdot E_p^* \end{aligned}$$

(4.10)

$$\begin{aligned} f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha_{offset}} = & 119.07258 + 1.12012 \cdot E^* + 13.79753 \cdot \sigma^* - 5.91056 \cdot E_p^* - 2.09915 \\ & \cdot E^{*2} - 7.01792 \cdot \sigma^{*2} + 0.64525 \cdot E_p^{*2} + 0.35818 \cdot E^* \cdot \sigma^* + 0.29424 \cdot E^* \\ & \cdot E_p^* + 1.81254 \cdot \sigma^* \cdot E_p^* \end{aligned}$$



Para obtener los valores de E^* , σ^* y E_p^* se procede de la misma manera que en el apartado anterior.

También se pueden deducir los valores buscados de forma gráfica, utilizando las superficies de respuesta obtenidas que se muestran a continuación siguiendo el siguiente orden:

- **Figura 4.11.** Variación de la respuesta P_y en función de E , σ y E_p .
- **Figura 4.12.** Variación de la respuesta $P_{yoffset}$ en función de E , σ y E_p .
- **Figura 4.13.** Variación de la respuesta α en función de E , σ y E_p .
- **Figura 4.14.** Variación de la respuesta α_{offset} en función de E , σ y E_p .

Se muestran a continuación en la siguiente tabla los valores de las variables fijadas para cada una de las tres representaciones gráficas de cada una de las Figuras descritas anteriormente.

Tabla 4. 10. Valores fijados en las representaciones gráficas.

E	202500 MPa
σ	625 MPa
E_p	2550 MPa



“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

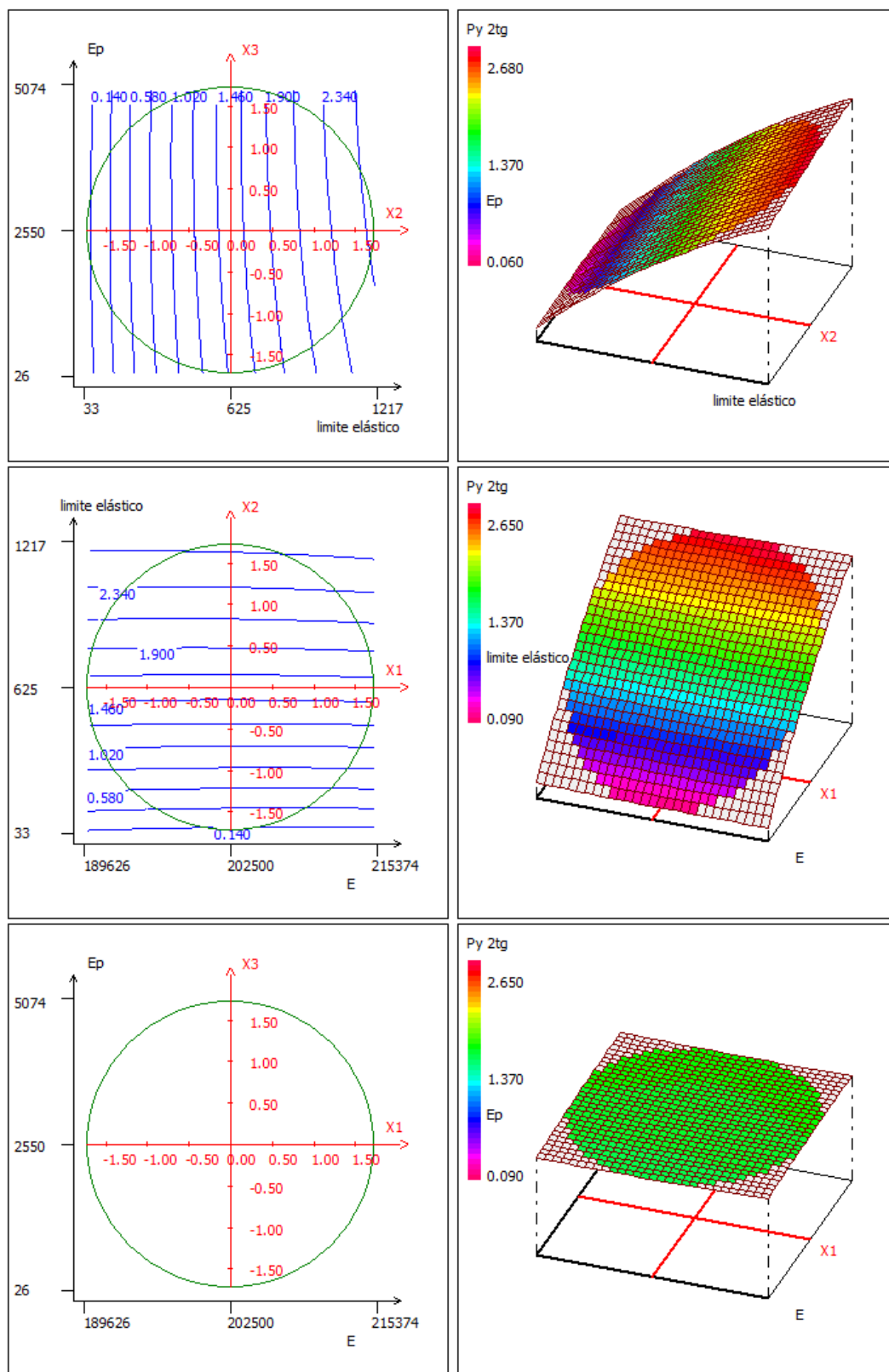


Figura 4.11. Variación de la respuesta P_y en función de E , σ y E_p .



“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

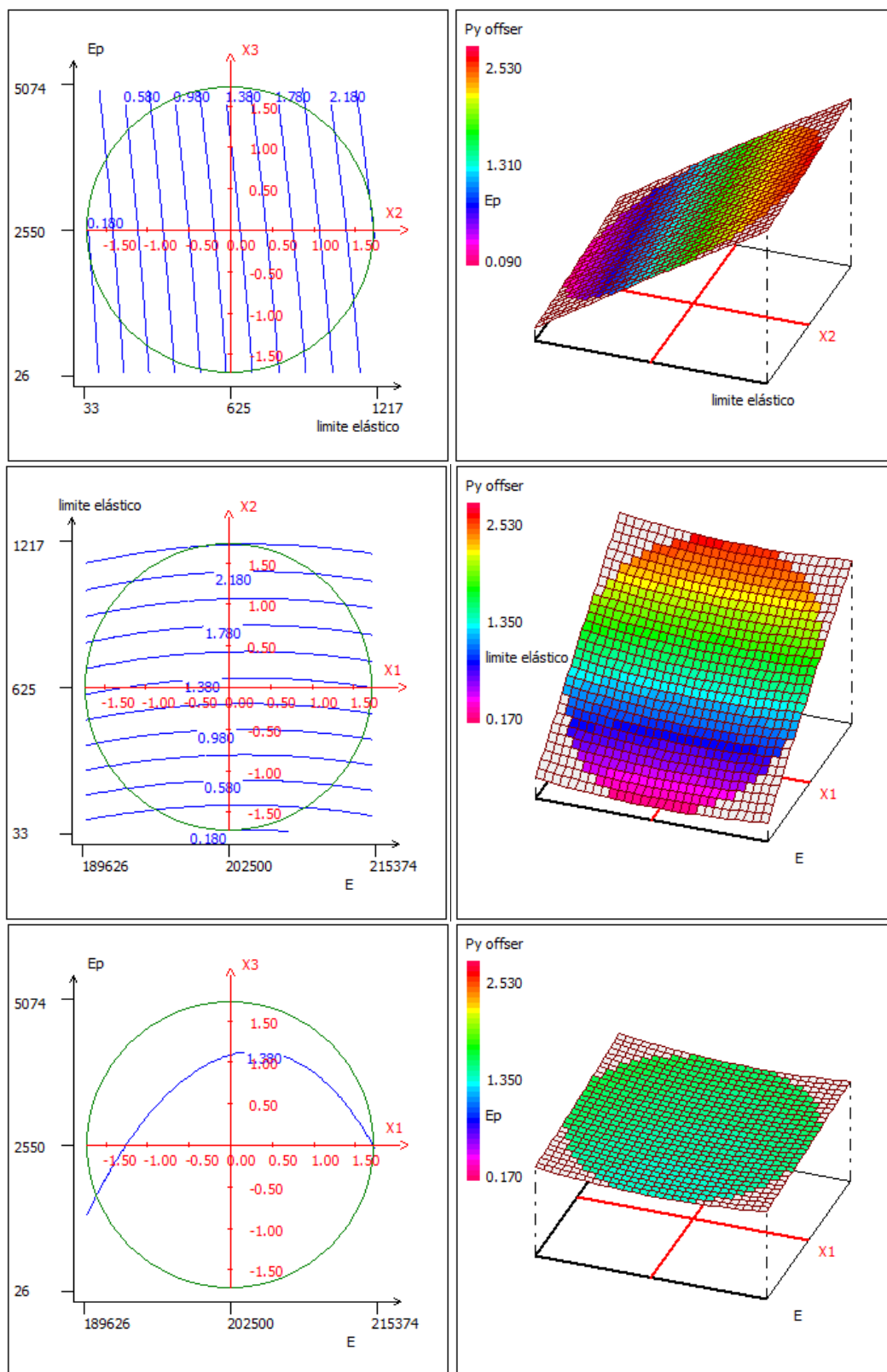


Figura 4.12. Variación de la respuesta $P_{yoffset}$ en función de E , σ y E_p .



“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

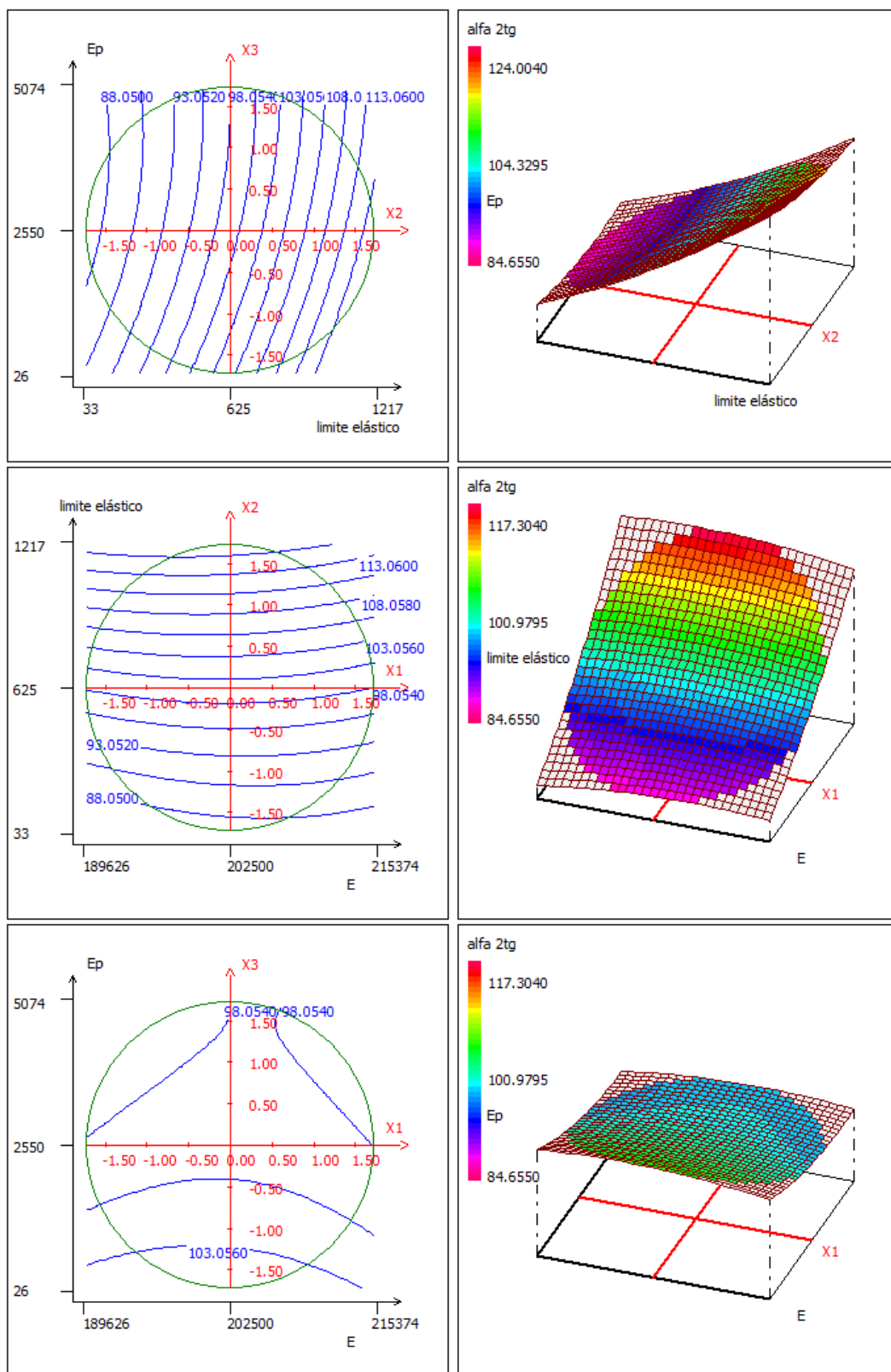


Figura 4.13. Variación de la respuesta α en función de E , σ y E_p .

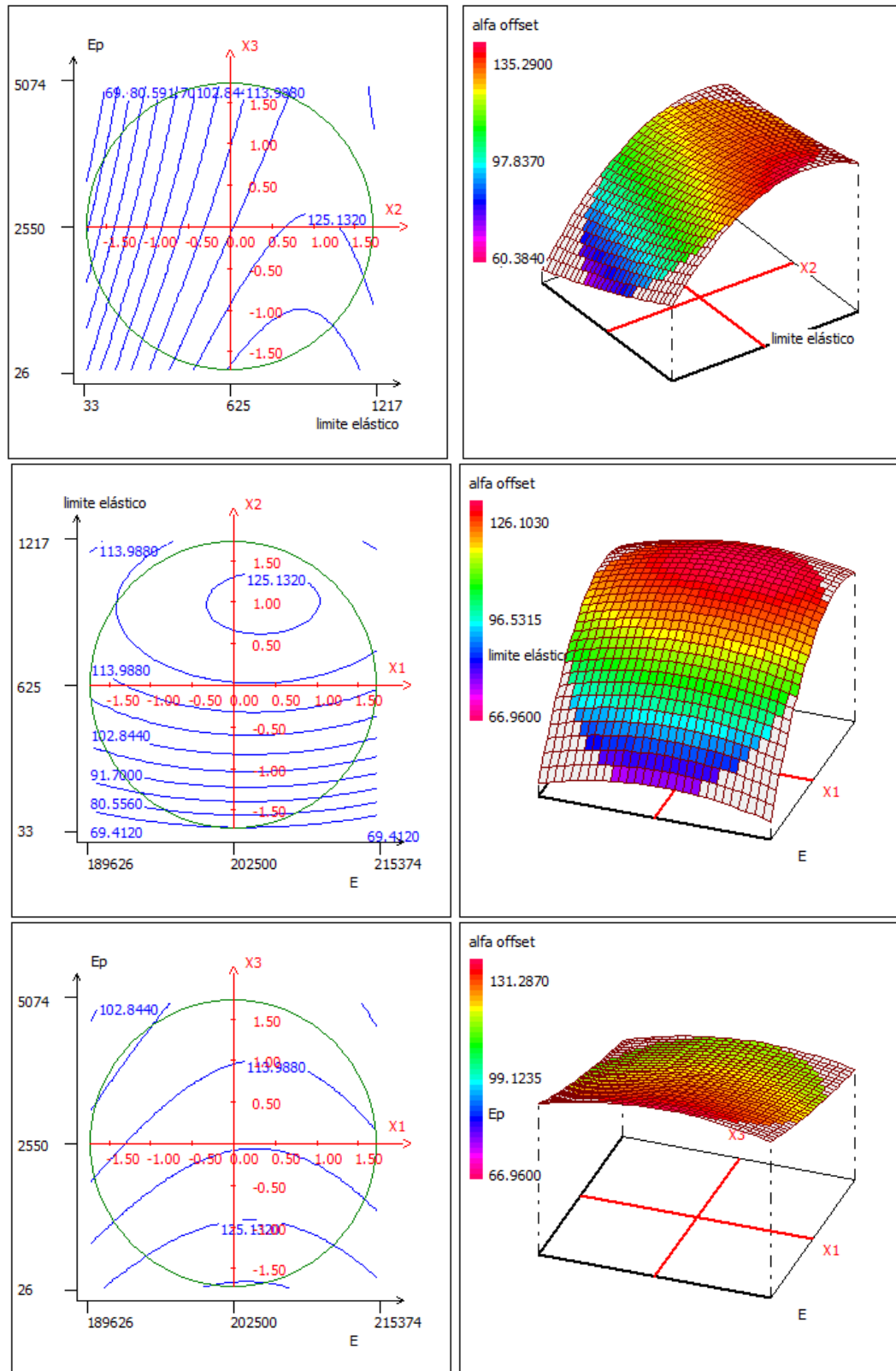


Figura 4.14. Variación de la respuesta α_{offset} en función de E , σ y Ep .



4.5. VALIDACIÓN NUMÉRICA

A continuación se exponen varios ejemplos de validación numérica para ambos casos estudiados.

4.5.1. Validación numérica para caso general

Se han seleccionado tres experimentos más para realizar la validación numérica. Se recoge en la siguiente tabla tanto la matriz de experimentos con las variables codificadas utilizadas como la matriz del plan de experimentos con los valores de los factores de diseño de experimentos.

Tabla 4. 11. *Diseño propuesto para obtener la superficie de respuesta de cada uno de los coeficientes.*

Nº Exp.	<i>Matriz de experimentos</i> (Variables codificadas)			<i>Plan de experimentación</i> (Variables reales)		
	E^*	σ^*	E_p^*	E	σ	E_p
1	0.5	0.5	0.5	179730	796	3278.39
2	-0.5	-0.5	-0.5	120270	454	1821.61
3	0.5	0.5	-0.5	179730	796	1821.61

Se procede de la misma manera anteriormente descrita para realizar las simulaciones teniendo en cuenta los nuevos datos de entrada del software ABAQUS.

Tabla 4. 12. *Datos de entrada de la zona plástica para el programa ABAQUS.*

Experimento	Datos Abaqus	
	Yield stress	Plastic strain
1	795.9488105	0
	4074.339394	0.981759381
2	454.0511895	0
	2275.660606	0.984853971
3	795.9488105	0
	2617.558227	0.989864758



Con las nuevas respuestas del plan de experimentación mostradas a continuación, es posible comprobar los resultados obtenidos a través de las ecuaciones de la superficie de respuesta.

Tabla 4. 13. *Respuestas del plan de experimentación.*

N°Exp	E	σ	E_p	P_y	$P_{yoffset}$	α	α_{offset}
	MPa	MPa	MPa	KN	KN		
1	179730	796	3278.39	1.880	1.649	105.87	120.71
2	120270	454	1821.61	1.108	0.971	102.46	116.91
3	179730	796	1821.61	1.834	1.573	108.50	126.53

Para el primer experimento de validación numérica:

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_y} = 1.4931 + 0.1665 \cdot 0.5 + 0.6109 \cdot 0.5 + 0.0373 \cdot 0.5 - 0.0671 \cdot 0.5^2 - 0.0929 \cdot 0.5^2 - 0.0029 \cdot 0.5^2 + 0.1331 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.0009 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + 0.0194 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = \mathbf{1.897}$$

(4.11)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_{yoffset}} = 1.2927 + 0.0324 \cdot 0.5 + 0.6119 \cdot 0.5 + 0.0681 \cdot 0.5 + 0.0062 \cdot 0.5^2 - 0.0193 \cdot 0.5^2 + 0.0048 \cdot 0.5^2 + 0.0082 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.0002 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + 0.0127 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = \mathbf{1.652}$$

(4.13)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha} = 105.141 - 13.923 \cdot 0.5 + 15.373 \cdot 0.5 - 2.884 \cdot 0.5 + 7.333 \cdot 0.5^2 + 0.779 \cdot 0.5^2 - 0.387 \cdot 0.5^2 - 8.337 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + 0.763 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.918 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = \mathbf{104.232}$$

(4.14)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha_{offset}} = 120.226 - 3.144 \cdot 0.5 + 15.071 \cdot 0.5 - 6.697 \cdot 0.5 + 0.385 \cdot 0.5^2 - 6.569 \cdot 0.5^2 + 0.779 \cdot 0.5^2 + 0.502 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.624 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + 1.47 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = \mathbf{121.826}$$

En la Tabla 4.14. se compara los valores simulados con los valores que predicen las superficies de respuesta para el experimento 1.



Tabla 4. 14. Comparativa de respuestas y resultados de simulación para experimento 1.

	EXPERIMENTO 1		
	SIMULACIÓN	RESPUESTA	DIFERENCIA
P_y	1.88	1.897	-0.017
$P_{yoffset}$	1.649	1.652	-0.003
α	105.87	104.232	1.638
α_{offset}	120.71	121.826	-1.116

Para el segundo experimento de validación numérica:

$$\begin{aligned}
 f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_y} &= 1.4931 + 0.1665 \cdot (-0.5) + 0.6109 \cdot (-0.5) + 0.0373 \cdot (-0.5) \\
 &\quad - 0.0671 \cdot (-0.5)^2 - 0.0929 \cdot (-0.5)^2 - 0.0029 \cdot (-0.5)^2 + 0.1331 \\
 &\quad \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) - 0.0009 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) + 0.0194 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) \\
 &= \mathbf{1.082}
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

$$\begin{aligned}
 f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_{yoffset}} &= 1.2927 + 0.0324 \cdot (-0.5) + 0.6119 \cdot (-0.5) + 0.0681 \cdot (-0.5) \\
 &\quad + 0.0062 \cdot (-0.5)^2 - 0.0193 \cdot (-0.5)^2 + 0.0048 \cdot (-0.5)^2 + 0.0082 \\
 &\quad \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) - 0.0002 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) + 0.0127 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) \\
 &= \mathbf{0.939}
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

$$\begin{aligned}
 f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha} &= 105.141 - 13.923 \cdot (-0.5) + 15.373 \cdot (-0.5) - 2.884 \cdot (-0.5) + 7.333 \\
 &\quad \cdot (-0.5)^2 + 0.779 \cdot (-0.5)^2 - 0.387 \cdot (-0.5)^2 - 8.337 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) \\
 &\quad + 0.763 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) - 0.918 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) = \mathbf{105.666}
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

$$\begin{aligned}
 f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha_{offset}} &= 120.226 - 3.144 \cdot (-0.5) + 15.071 \cdot (-0.5) - 6.697 \cdot (-0.5) + 0.385 \\
 &\quad \cdot (-0.5)^2 - 6.569 \cdot (-0.5)^2 + 0.779 \cdot (-0.5)^2 + 0.502 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) \\
 &\quad - 0.624 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) + 1.47 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) = \mathbf{116.596}
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

En la Tabla 4.15. se compara los valores simulados con los valores que predicen las superficies de respuesta para el experimento 2.



Tabla 4. 15. Comparativa de respuestas y resultados de simulación para experimento 2.

	EXPERIMENTO 2		
	SIMULACIÓN	RESPUESTA	DIFERENCIA
P_y	1.108	1.082	0.026
$P_{yoffset}$	0.971	0.939	0.032
α	102.46	105.666	-3.206
α_{offset}	116.91	116.596	0.314

Para el tercer experimento de validación numérica:

(4.19)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_y} = 1.4931 + 0.1665 \cdot 0.5 + 0.6109 \cdot 0.5 + 0.0373 \cdot (-0.5) - 0.0671 \cdot 0.5^2 - 0.0929 \cdot 0.5^2 - 0.0029 \cdot (-0.5)^2 + 0.1331 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.0009 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) + 0.0194 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) = \mathbf{1.851}$$

(4.20)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_{yoffset}} = 1.2927 + 0.0324 \cdot 0.5 + 0.6119 \cdot 0.5 + 0.0681 \cdot (-0.5) + 0.0062 \cdot 0.5^2 - 0.0193 \cdot 0.5^2 + 0.0048 \cdot (-0.5)^2 + 0.0082 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.0002 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) + 0.0127 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) = \mathbf{1.577}$$

(4.21)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha} = 105.141 - 13.923 \cdot 0.5 + 15.373 \cdot 0.5 - 2.884 \cdot (-0.5) + 7.333 \cdot 0.5^2 + 0.779 \cdot 0.5^2 - 0.387 \cdot (-0.5)^2 - 8.337 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + 0.763 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) - 0.918 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) = \mathbf{107.193}$$

(4.22)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha_{offset}} = 120.226 - 3.144 \cdot 0.5 + 15.071 \cdot 0.5 - 6.697 \cdot (-0.5) + 0.385 \cdot 0.5^2 - 6.569 \cdot 0.5^2 + 0.779 \cdot (-0.5)^2 + 0.502 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.624 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) + 1.47 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) = \mathbf{128.101}$$

En la Tabla 4.16. se compara los valores simulados con los valores que predicen las superficies de respuesta para el experimento 3.



Tabla 4. 16. Comparativa de respuestas y resultados de simulación para experimento 3.

	EXPERIMENTO 3		
	SIMULACIÓN	RESPUESTA	DIFERENCIA
P_y	1.834	1.851	-0.017
$P_{yoffset}$	1.573	1.577	-0.004
α	108.5	107.193	1.307
α_{offset}	126.53	128.101	-1.571

4.5.2. Validación numérica para aceros

Se han seleccionado tres experimentos más para realizar la validación numérica. Se recoge en la siguiente tabla tanto la matriz de experimentos con las variables codificadas utilizadas como la matriz del plan de experimentos con los valores de los factores de diseño de experimentos.

Tabla 4. 17. Diseño propuesto para obtener la superficie de respuesta de cada uno de los coeficientes.

Nº Exp.	<i>Matriz de experimentos</i> (Variables codificadas)			<i>Plan de experimentación</i> (Variables reales)		
	E^*	σ^*	E_p^*	E	σ	E_p
1	0.5	0.5	0.5	206216	796	3278.39
2	-0.5	-0.5	-0.5	198784	454	1821.61
3	0.5	0.5	-0.5	206216	796	1821.61

Se procede de la misma manera anteriormente descrita para realizar las simulaciones teniendo en cuenta los nuevos datos de entrada del software ABAQUS.



Tabla 4. 18. Datos de entrada de la zona plástica para el programa ABAQUS.

Experimento	Datos Abaqus	
	Yield stress	Plastic strain
1	795.9488105	0
	4074.339394	0.984102174
2	454.0511895	0
	2275.660606	0.990836224
3	795.9488105	0
	2617.558227	0.99116651

Con las nuevas respuestas del plan de experimentación mostradas a continuación, es posible comprobar los resultados obtenidos a través de las ecuaciones de la superficie de respuesta.

Tabla 4. 19. Respuestas del plan de experimentación.

N°Exp	E	σ	E_p	P_y	$P_{yoffset}$	α	α_{offset}
	MPa	MPa	MPa	KN	KN		
1	206216	796	3278.39	1.935	1.661	102.84	119.81
2	198784	454	1821.61	1.179	0.991	96.23	114.48
3	206216	796	1821.61	1.887	1.610	105.45	123.63

Para el primer experimento de validación numérica:

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_y} = 1.5696 + 0.0018 \cdot 0.5 + 0.7251 \cdot 0.5 + 0.0313 \cdot 0.5 + 0.0061 \cdot 0.5^2 - 0.0728 \cdot 0.5^2 - 0.0110 \cdot 0.5^2 + 0.0073 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.0031 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + 0.0179 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = \mathbf{1.935} \quad (4.23)$$

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_{yoffset}} = 1.3065 - 0.0153 \cdot 0.5 + 0.6404 \cdot 0.5 + 0.0620 \cdot 0.5 + 0.0341 \cdot 0.5^2 - 0.0094 \cdot 0.5^2 + 0.0050 \cdot 0.5^2 - 0.0033 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.0042 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + 0.0031 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = \mathbf{1.656} \quad (4.24)$$



$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha} = 99.62815 - 0.07908 \cdot 0.5 + 8.69426 \cdot 0.5 - 2.00747 \cdot 0.5 - 0.49333 \cdot 0.5^2 + 0.80245 \cdot 0.5^2 + 0.64335 \cdot 0.5^2 - 0.32625 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + 0.21625 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.50125 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = \mathbf{103.017}$$

(4.25)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha_{offset}} = 119.07258 + 1.12012 \cdot 0.5 + 13.79753 \cdot 0.5 - 5.91056 \cdot 0.5 - 2.09915 \cdot 0.5^2 - 7.01792 \cdot 0.5^2 + 0.64525 \cdot 0.5^2 + 0.35818 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + 0.29424 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + 1.81254 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = \mathbf{122.074}$$

(4.26)

En la Tabla 4.20. se compara los valores simulados con los valores que predicen las superficies de respuesta para el experimento 1.

Tabla 4. 20. Comparativa de respuestas y resultados de simulación para experimento 1.

	EXPERIMENTO 1		
	SIMULACIÓN	RESPUESTA	DIFERENCIA
P_y	1.935	1.935	0
$P_{yoffset}$	1.661	1.656	0.005
α	102.84	103.017	-0.177
α_{offset}	119.81	122.074	-2.264

Para el segundo experimento de validación numérica:

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_y} = 1.5696 + 0.0018 \cdot (-0.5) + 0.7251 \cdot (-0.5) + 0.0313 \cdot (-0.5) + 0.0061 \cdot (-0.5)^2 - 0.0728 \cdot (-0.5)^2 - 0.0110 \cdot (-0.5)^2 + 0.0073 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) - 0.0031 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) + 0.0179 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) = \mathbf{1.177}$$

(4.27)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_{yoffset}} = 1.3065 - 0.0153 \cdot (-0.5) + 0.6404 \cdot (-0.5) + 0.0620 \cdot (-0.5) + 0.0341 \cdot (-0.5)^2 - 0.0094 \cdot (-0.5)^2 + 0.0050 \cdot (-0.5)^2 - 0.0033 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) - 0.0042 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) + 0.0031 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) = \mathbf{0.969}$$

(4.28)



$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha} = 99.62815 - 0.07908 \cdot (-0.5) + 8.69426 \cdot (-0.5) - 2.00747 \cdot (-0.5) - 0.49333 \cdot (-0.5)^2 + 0.80245 \cdot (-0.5)^2 + 0.64335 \cdot (-0.5)^2 - 0.32625 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) + 0.21625 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) - 0.50125 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) = \mathbf{96.410}$$

(4.29)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha_{offset}} = 119.07258 + 1.12012 \cdot (-0.5) + 13.79753 \cdot (-0.5) - 5.91056 \cdot (-0.5) - 2.09915 \cdot (-0.5)^2 - 7.01792 \cdot (-0.5)^2 + 0.64525 \cdot (-0.5)^2 + 0.35818 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) + 0.29424 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) + 1.81254 \cdot (-0.5) \cdot (-0.5) = \mathbf{113.067}$$

(4.30)

En la Tabla 4.21. se compara los valores simulados con los valores que predicen las superficies de respuesta para el experimento 2.

Tabla 4. 21. Comparativa de respuestas y resultados de simulación para experimento 2.

	EXPERIMENTO 2		
	SIMULACIÓN	RESPUESTA	DIFERENCIA
P_y	1.179	1.177	0.002
$P_{yoffset}$	0.991	0.969	0.022
α	96.23	96.41	-0.18
α_{offset}	114.48	113.067	1.413

Para el tercer experimento de validación numérica:

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_y} = 1.5696 + 0.0018 \cdot 0.5 + 0.7251 \cdot 0.5 + 0.0313 \cdot (-0.5) + 0.0061 \cdot 0.5^2 - 0.0728 \cdot 0.5^2 - 0.0110 \cdot (-0.5)^2 + 0.0073 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.0031 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) + 0.0179 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) = \mathbf{1.896}$$

(4.31)

$$f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{P_{yoffset}} = 1.3065 - 0.0153 \cdot 0.5 + 0.6404 \cdot 0.5 + 0.0620 \cdot (-0.5) + 0.0341 \cdot 0.5^2 - 0.0094 \cdot 0.5^2 + 0.0050 \cdot (-0.5)^2 - 0.0033 \cdot 0.5 \cdot 0.5 - 0.0042 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) + 0.0031 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) = \mathbf{1.595}$$

(4.32)



(4.33)

$$\begin{aligned} f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha} &= 99.62815 - 0.07908 \cdot 0.5 + 8.69426 \cdot 0.5 - 2.00747 \cdot (-0.5) \\ &\quad - 0.49333 \cdot 0.5^2 + 0.80245 \cdot 0.5^2 + 0.64335 \cdot (-0.5)^2 - 0.32625 \cdot 0.5 \\ &\quad \cdot 0.5 + 0.21625 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) - 0.50125 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) = \mathbf{105.167} \end{aligned}$$

(4.32)

$$\begin{aligned} f(E^*, \sigma^*, E_p^*)_{\alpha_{offset}} &= 119.07258 + 1.12012 \cdot 0.5 + 13.79753 \cdot 0.5 - 5.91056 \cdot (-0.5) \\ &\quad - 2.09915 \cdot 0.5^2 - 7.01792 \cdot 0.5^2 + 0.64525 \cdot (-0.5)^2 + 0.35818 \cdot 0.5 \\ &\quad \cdot 0.5 + 0.29424 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) + 1.81254 \cdot 0.5 \cdot (-0.5) = \mathbf{126.931} \end{aligned}$$

En la Tabla 4.22. se compara los valores simulados con los valores que predicen las superficies de respuesta para el experimento 3.

Tabla 4. 22. Comparativa de respuestas y resultados de simulación para experimento 3.

	EXPERIMENTO 3		
	SIMULACIÓN	RESPUESTA	DIFERENCIA
P_y	1.887	1.896	-0.009
$P_{yoffset}$	1.61	1.593	0.017
α	105.45	105.167	0.283
α_{offset}	123.63	126.931	-3.301

4.5.3. Estimación del límite elástico y el módulo plástico a partir de los resultados de P_y y $P_{yoffset}$ de la simulación para aceros

En el caso de los aceros, se puede estimar el límite elástico y el módulo plástico a partir de las respuestas obtenidas anteriormente de la carga de fluencia por los dos métodos de resolución.

Para ello se fija el valor de la variable codificada del módulo de Young, Tabla 4.17., al utilizado en el ensayo de validación numérica, en este caso el correspondiente al experimento 1.



“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”

Una vez fijado este valor y con los valores obtenidos de P_y y $P_{yoffset}$ de la simulación, se obtienen dos ecuaciones de segundo grado en función del límite elástico (σ) y del módulo plástico (E_p) a partir de las ecuaciones (4.7) y (4.8).

Se resuelve la ecuación de segundo grado despejando el límite elástico y dejando la ecuación en función del módulo plástico. Se obtienen de esta manera las siguientes ecuaciones, correspondiente al método de las dos tangentes (4.33) y al método de la tangente desplazada (4.34) siendo e el módulo plástico.

(4.33)

$$\sigma = \frac{-\sqrt{12921} \sqrt{-14899411836 e^2 + 179614562580 e + 2198524905625} + 4625718 e + 188323575}{37625952}$$

(4.34)

$$\sigma = \frac{-\sqrt{3} \sqrt{26348 e^2 + 828332 e + 52652435} + 62 e + 12775}{376}$$

A continuación, dando valores al módulo plástico obtenemos valores del límite elástico como se muestra en la siguiente gráfica:

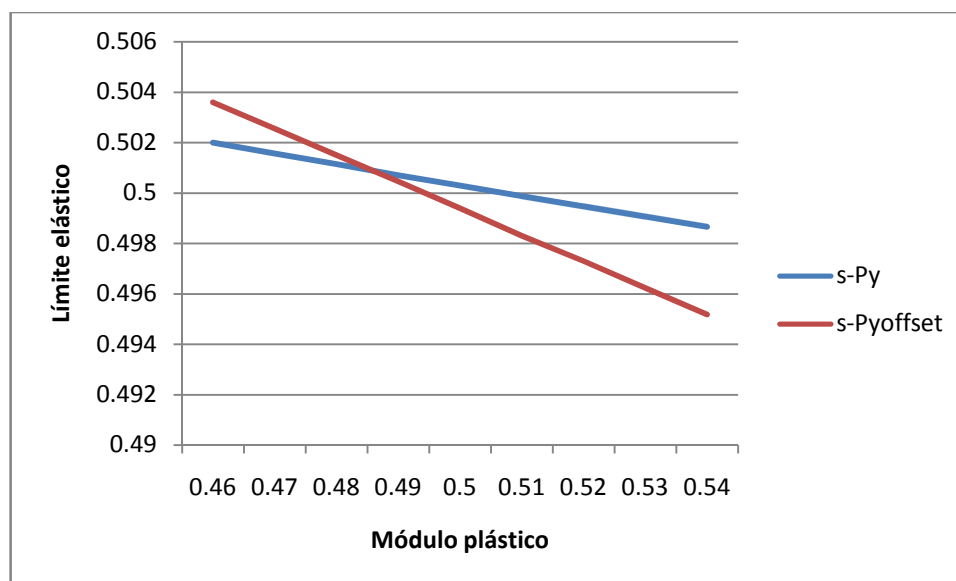


Figura 4.15. Estimación del límite elástico y módulo plástico experimento 1.



El punto de corte de ambas rectas corresponde a los valores codificados del límite elástico y del módulo plástico utilizados en el experimento 1 del apartado anterior.

Los valores obtenidos se encuentran recogidos en la siguiente tabla comparativa, junto con los correspondientes valores reales.

Tabla 4. 23. *Comparativa de resultados obtenidos en la estimación experimento 1.*

	EXPERIMENTO 1			
	Valores ensayo		Estimación	
	Variable codificada	Variable real	Variable codificada	Variable real
σ	0.5	796	0.501	796
E_p	0.5	3278.39	0.485	3257

Para el caso del experimento 2 se procede de la misma manera. Con los valores obtenidos de P_y y $P_{yoffset}$ de la simulación y las ecuaciones (4.7) y (4.8) y se obtienen las siguientes ecuaciones resueltas:

(4.35)

$$\sigma = \frac{-\sqrt{4369} \sqrt{-16954714265834511 e^2 + 208163711595989328 e + 3734644599657760000} + 23339477616}{23339477616}$$

$$\frac{+2869345119 e + 115647430000}{23339477616}$$

(4.36)

$$\sigma = \frac{-\sqrt{18517} \sqrt{1271498207281933 e^2 + 672786620789203360 e + 55722834728204160000} + 13774129688}{13774129688}$$

$$\frac{+4852250231 e + 1008250650000}{13774129688}$$

A continuación, dando valores al módulo plástico obtenemos valores del límite elástico como se muestra en la siguiente gráfica:

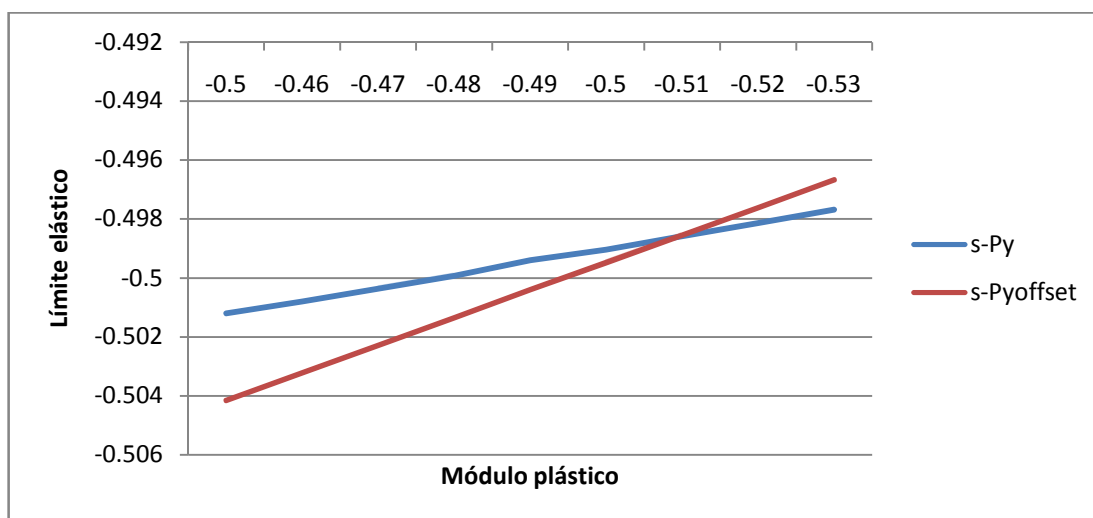


Figura 4.16. Estimación del límite elástico y módulo plástico experimento 2.

Los valores obtenidos se encuentran recogidos en la siguiente tabla comparativa, junto con los correspondientes valores reales.

Tabla 4. 24. Comparativa de resultados obtenidos en la estimación experimento 2.

	EXPERIMENTO 2			
	Valores ensayo		Valores tabla	
	Variable codificada	Variable real	Variable codificada	Variable real
σ	-0.5	454	-0.4985	455
E_p	-0.5	1821.61	-0.518	1795

Para el caso del experimento 3 se procede de la misma manera. Con los valores obtenidos de P_y y $P_{yoffset}$ de la simulación y las ecuaciones (4.7) y (4.8) y se obtienen las siguientes ecuaciones resueltas:

$$(4.37)$$

$$\sigma = \frac{-\sqrt{9439} \sqrt{-10884261924 e^2 + 131211350220 e + 1648936829375} + 3379162 e + 137573425}{27486368}$$

$$(4.38)$$

$$\sigma = \frac{-\sqrt{79044 e^2 + 2484996 e + 158874745} + 62 e + 12775}{376}$$



A continuación, dando valores al módulo plástico obtenemos valores del límite elástico como se muestra en la siguiente gráfica:

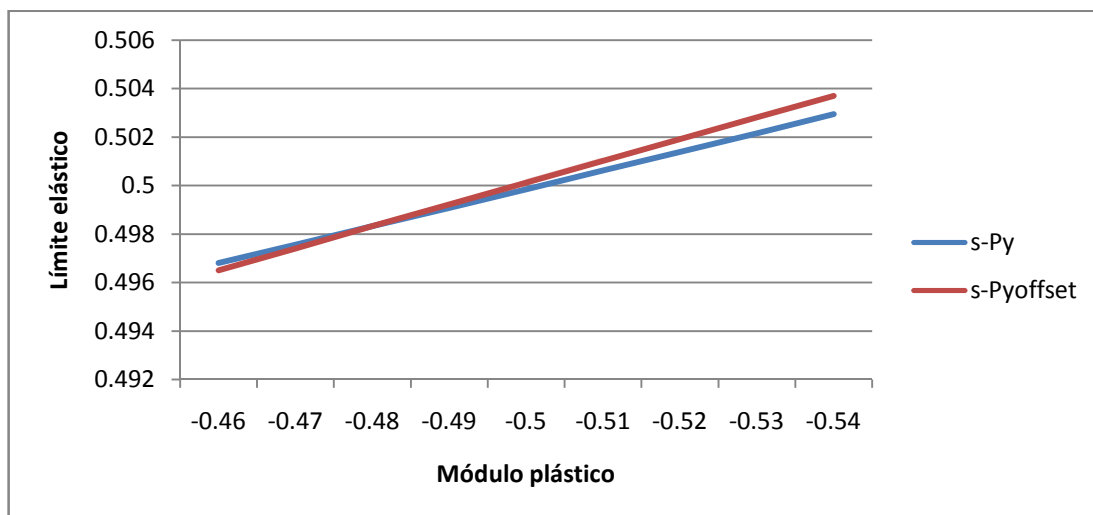


Figura 4.17. Estimación del límite elástico y módulo plástico experimento 3.

Los valores obtenidos se encuentran recogidos en la siguiente tabla comparativa, junto con los correspondientes valores reales.

Tabla 4. 25. Comparativa de resultados obtenidos en la estimación experimento 3.

	EXPERIMENTO 3			
	Valores ensayo		Valores tabla	
	Variable codificada	Variable real	Variable codificada	Variable real
σ	0.5	796	0.499	796
E_p	-0.5	1821.61	-0.485	1843



CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES

El presente estudio está basado en la determinación de superficies de respuesta a partir de la técnica de diseño de experimentos. Se ha comprobado que es posible ajustar el comportamiento de la carga de fluencia en el ensayo miniatura de punzonado y el parámetro adimensional característico del material en los dos casos analizados, a partir de un modelo cuadrático con tres factores.

En este trabajo se han analizado dos rangos diferentes de módulo de Young (E), uno general cuyo rango es [250000:50000] y otro más específico para aceros cuyo rango está comprendido entre [215000:90000].

En el primero de los casos, se ha observado que los tres factores empleados son significativos por lo que para la estimación de dichos valores a partir de un solo ensayo miniatura de punzonado sería necesario fijar alguno de los factores. En cambio, en el segundo caso analizado, al ser el rango del módulo de Young menor, se consigue que este parámetro no sea significativo en la superficie de respuesta. Esto implica la posibilidad de estimar el límite elástico y el módulo plástico a partir de un ensayo miniatura de punzonado tal y como se ha comprobado en el capítulo anterior.

En resumen, la metodología presentada en este trabajo permite la estimación del límite elástico y el módulo plástico de un acero a partir de las superficies de respuesta de P_y y $P_{yoffset}$ y del ensayo de una probeta miniatura de punzonado.



BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Baik, J.M., J. Kameda, and O. Buck, *Small punch test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy-steel*. Scripta Metallurgica, 1983. 17(12): p. 1443-1447.
- [2] Kameda, J. and O. Buck, *Evaluation of the ductile-to-brittle transition temperature shift due to temper embrittlement and neutron-irradiation by means of a small-punch test*. Materials Science and Engineering, 1986. 83(1): p. 29-38.
- [3] Lucas, G.E., A. Okada, and M. Kiritani, *Parametric analysis of the disc bend test*. Journal of Nuclear Materials, 1986. 141-143, Part 1(0): p. 532-535.
- [4] Mao, X.Y. and H. Takahashi, *Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk (\varnothing 3 mm) small punch tests*. Journal of Nuclear Materials, 1987. 150(1): p. 42-52.
- [5] Mao, X., T. Shoji, and H. Takahashi, *Characterization of fracture-behavior in small punch test by combined recrystallization-etch method and rigid plastic analysis*. Journal of Testing and Evaluation, 1987. 15(1): p. 30-37.
- [6] Misawa, T., et al., *Determination of the minimum quantity of irradiated ferritic steel specimens for small punch dbtt testing*. Journal of Nuclear Materials, 1991. 179: p. 421-424.
- [7] Misawa, T., et al., *Comparison of stress-corrosion cracking susceptibility of austenitic and ferritic stainless-steels in small punch testing*. Journal of Nuclear Materials, 1991. 179: p. 611-614.
- [8] Misawa, T., et al., *Fracture-toughness evaluation of fusion-reactor structural-steels at low-temperatures by small punch tests*. Journal of Nuclear Materials, 1989. 169: p. 225-232.



**“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA
LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS
MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”**

[9] Misawa, T., Y. Hamaguchi, and M. Saito, *Stress-corrosion cracking and hydrogen embrittlement studies of austenitic and ferritic steels by small punch test*. Journal of Nuclear Materials, 1988. 155: p. 749-753.

[10] Misawa, T., et al., *Small punch tests for evaluating ductile brittle transition behavior of irradiated ferritic steels*. Journal of Nuclear Materials, 1987.150(2): p. 194-202.

[11] Lucas, G., *Review of small specimen test techniques for irradiation testing*. Metallurgical and Materials Transactions A, 1990. 21(5): p. 1105-1119.

[12] Mao, X., H. Takahashi, and T. Kodaira, *Supersmall punch test to estimate fracture-toughness J_{ic} and its application to radiation embrittlement of 2.25cr-1mo steel*. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 1992. 150(2): p. 231-236.

[13] Mao, X., M. Saito, and H. Takahashi, *Small punch test to predict ductile fracture-toughness j_{ic} and brittle-fracture toughness k_{ic}* . Scripta Metallurgica Et Materialia, 1991. 25(11): p. 2481-2485.

[14] Mao, X., *Estimation of mechanical properties of irradiated nuclear pressure vessel steel by use of subsized CT specimen and small punch specimen* Scripta Metallurgica et Materialia, 1991. 25(11): p. 2487-2490.

[15] Suzuki, M., et al., *Evaluation of toughness degradation by small punch (sp) tests for neutron-irradiated 21/4cr-1mo steel*. Journal of Nuclear Materials, 1991. 179: p. 441-444.

[16] Kameda, J. and X. Mao, *Small-punch and tem-disk testing techniques and their application to characterization of radiation-damage*. Journal of Materials Science, 1992. 27(4): p. 983-989.

[17] Kameda, J. and R. Ranjan, *Characterization of deformation and fracture behavior in amorphous and or ceramic coatings and aluminum-alloy substrates by small punch testing and acoustic-emission techniques*. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 1994. 183(1-2): p. 121-130.

[18] Chi, S.H., J.H. Hong, and I.S. Kim, *Evaluation of irradiation effects of 16 mev proton-irradiated 12cr-1mov steel by small punch (sp) tests*. Scripta Metallurgica Et Materialia, 1994. 30(12): p. 1521-1525.



**“ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA
LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS
MEDIANTE EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO”**

[19] Fleury, E. and J.S. Ha, *Small punch tests on steels for steam power plant (II) - Modeling*. Ksme International Journal, 1998. 12(5): p. 827-835.

[20] Fleury, E. and J.S. Ha, *Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I. Mechanical strength*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998. 75(9): p. 699-706.

[21] Bulloch, J.H., *Toughness losses in low alloy steels at high temperatures: an appraisal of certain factors concerning the small punch test*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998. 75(11): p. 791-804.

[22] Saucedo-Munoz, M.L., et al., *Small punch creep test of service-exposed sus 316 htb superheater tubes of fossil boilers*, in *Tms 2010 139th Annual Meeting & Exhibition - Supplemental Proceedings, Vol 3: General Paper Selections*. p. 729-736.

[23] Shekhter, A., et al., *Assessment of temper embrittlement in an ex-service 1Cr-1Mo-0.25V power generating rotor by Charpy V-Notch testing, K-Ic fracture toughness and small punch test*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002. 79(8-10): p. 611-615.

[24] Ruan, Y., P. Spatig, and M. Victoria, *Assessment of mechanical properties of the martensitic steel EUROFER97 by means of punch tests*. Journal of Nuclear Materials, 2002. 307: p. 236-239.

[25] Ju, J.B., J.I. Jang, and D. Kwon, *Evaluation of fracture toughness by small punch testing techniques using sharp notched specimens*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003. 80(4): p. 221-228.

[26] Finarelli, D., M. Roedig, and F. Carsughi, *Small punch tests on austenitic and martensitic steels irradiated in a spallation environment with 530 MeV protons*. Journal of Nuclear Materials, 2004. 328(2-3): p. 146-150.

[27] Campitelli, E.N., et al., *Assessment of the constitutive properties from small ball punch test: experiment and modeling*. Journal of Nuclear Materials, 2004. 335(3): p. 366-378.

[28] Campitelli, E.N., et al., *Assessment of irradiation-hardening on Eurofer97' and Zircaloy 2 with punch tests and finite-element modeling*. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2005. 400: p. 386-392.



[29] Lacalle, R., et al., *Aproximación basada en el concepto de CTOD para la determinación de la tenacidad mediante probetas Small Punch*. Anales de Mecánica de la Fractura, 2011. 28: p. 749-754.

[30] Arroyo, B., et al., *Caracterización de aceros de vasija en la zona de transición dúctil-frágil en base a ensayos small punch*. Anales de Mecánica de la Fractura, 2012. 29: p. 121-126.

[31] Peñuelas, I., et al., *Determinación analítica y experimental de la tenacidad a fractura de aceros mediante el uso de probetas spt entalladas mediante femtolaser*. Anales de Mecánica de la Fractura, 2012. 29: p. 183-188.

[32] Cárdenas, E., et al., *Application of the small punch test to determine the fracture toughness of metallic materials*. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2012: p. 1460-2695.

[33] Rodríguez, C., et al., *Aplicación del ensayo spt en la caracterización mecánica de distintos tipos de acero*. Anales de Mecánica de la Fractura, 2012. 29: p. 579-584.

[34] CWA15627:2008, *Small Punch Test for Metallic Materials*. European Committee for Standardization (CEN).

[35] Documentación ABAQUS.

ANEXO 1

Resultados de las simulaciones modificados de todos los experimentos para el módulo de Young comprendido entre [250000:50000]



Tabla A1. 1. Resultados de la simulación, a) Experimento 1 y b) Experimento 2.

EXPERIMENTO 1		EXPERIMENTO 2	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.115	0.020	0.204	0.020
0.251	0.040	0.357	0.040
0.347	0.060	0.451	0.060
0.422	0.080	0.537	0.080
0.483	0.100	0.605	0.100
0.541	0.120	0.665	0.120
0.595	0.140	0.713	0.140
0.647	0.160	0.756	0.160
0.687	0.180	0.790	0.180
0.725	0.200	0.823	0.200
0.761	0.220	0.849	0.220
0.791	0.240	0.872	0.240
0.820	0.260	0.894	0.260
0.845	0.280	0.918	0.280
0.868	0.300	0.937	0.300
0.893	0.320	0.956	0.320
0.914	0.340	0.971	0.340
0.934	0.360	0.992	0.360
0.950	0.380	1.008	0.380
0.972	0.400	1.025	0.400
0.990	0.420	1.041	0.420
1.007	0.440	1.055	0.440
1.024	0.460	1.073	0.460
1.040	0.480	1.089	0.480
1.054	0.495	1.104	0.495
1.059	0.500	1.109	0.500



Tabla A1. 2. Resultados de la simulación, a) Experimento 3 y b) Experimento 4.

EXPERIMENTO 3		EXPERIMENTO 4	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.146	0.020	0.301	0.020
0.322	0.040	0.659	0.040
0.504	0.060	0.966	0.060
0.697	0.080	1.192	0.080
0.880	0.100	1.392	0.100
1.030	0.120	1.571	0.120
1.170	0.140	1.712	0.140
1.289	0.160	1.864	0.160
1.414	0.180	1.984	0.180
1.519	0.200	2.132	0.200
1.625	0.220	2.249	0.220
1.729	0.240	2.357	0.240
1.822	0.260	2.463	0.260
1.922	0.280	2.544	0.280
2.013	0.300	2.639	0.300
2.098	0.320	2.723	0.320
2.196	0.340	2.790	0.340
2.279	0.360	2.861	0.360
2.363	0.380	2.939	0.380
2.449	0.400	2.997	0.400
2.528	0.420	3.052	0.420
2.598	0.440	3.113	0.440
2.672	0.460	3.172	0.460
2.746	0.480	3.233	0.480
2.794	0.495	3.265	0.495
2.810	0.500	3.281	0.500



Tabla A1. 3. Resultados de la simulación, a) Experimento 5 y b) Experimento 6.

EXPERIMENTO 5		EXPERIMENTO 6	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.119	0.020	0.213	0.020
0.258	0.040	0.379	0.040
0.370	0.060	0.500	0.060
0.455	0.080	0.604	0.080
0.535	0.100	0.689	0.100
0.603	0.120	0.753	0.120
0.672	0.140	0.808	0.140
0.729	0.160	0.855	0.160
0.779	0.180	0.895	0.180
0.824	0.200	0.929	0.200
0.865	0.220	0.964	0.220
0.900	0.240	0.995	0.240
0.936	0.260	1.024	0.260
0.968	0.280	1.052	0.280
0.998	0.300	1.081	0.300
1.028	0.320	1.110	0.320
1.055	0.340	1.136	0.340
1.085	0.360	1.162	0.360
1.113	0.380	1.188	0.380
1.139	0.400	1.215	0.400
1.166	0.420	1.242	0.420
1.193	0.440	1.271	0.440
1.222	0.460	1.299	0.460
1.249	0.480	1.327	0.480
1.269	0.495	1.348	0.495
1.277	0.500	1.355	0.500



Tabla A1. 4. Resultados de la simulación, a) Experimento 7 y b) Experimento 8.

EXPERIMENTO 7		EXPERIMENTO 8	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.145	0.020	0.305	0.020
0.323	0.040	0.660	0.040
0.508	0.060	0.971	0.060
0.700	0.080	1.218	0.080
0.882	0.100	1.437	0.100
1.043	0.120	1.613	0.120
1.188	0.140	1.786	0.140
1.323	0.160	1.954	0.160
1.449	0.180	2.110	0.180
1.569	0.200	2.243	0.200
1.680	0.220	2.382	0.220
1.794	0.240	2.496	0.240
1.903	0.260	2.595	0.260
2.004	0.280	2.709	0.280
2.112	0.300	2.796	0.300
2.211	0.320	2.878	0.320
2.308	0.340	2.963	0.340
2.406	0.360	3.042	0.360
2.503	0.380	3.114	0.380
2.589	0.400	3.182	0.400
2.672	0.420	3.244	0.420
2.755	0.440	3.323	0.440
2.836	0.460	3.383	0.460
2.912	0.480	3.449	0.480
2.967	0.495	3.495	0.495
2.985	0.500	3.508	0.500



Tabla A1. 5. Resultados de la simulación, a) Experimento 9 y b) Experimento 10.

EXPERIMENTO 9		EXPERIMENTO 10	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.081	0.020	0.307	0.020
0.181	0.040	0.621	0.040
0.285	0.060	0.835	0.060
0.391	0.080	1.015	0.080
0.499	0.100	1.161	0.100
0.602	0.120	1.286	0.120
0.691	0.140	1.406	0.140
0.777	0.160	1.502	0.160
0.852	0.180	1.601	0.180
0.929	0.200	1.680	0.200
0.998	0.220	1.744	0.220
1.064	0.240	1.819	0.240
1.132	0.260	1.876	0.260
1.197	0.280	1.927	0.280
1.258	0.300	1.979	0.300
1.323	0.320	2.028	0.320
1.383	0.340	2.071	0.340
1.443	0.360	2.111	0.360
1.503	0.380	2.151	0.380
1.565	0.400	2.198	0.400
1.622	0.420	2.235	0.420
1.675	0.440	2.272	0.440
1.729	0.460	2.307	0.460
1.782	0.480	2.343	0.480
1.820	0.495	2.373	0.495
1.832	0.500	2.383	0.500



Tabla A1. 6. Resultados de la simulación, a) Experimento 11 y b) Experimento 12.

EXPERIMENTO 11		EXPERIMENTO 12	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.066	0.020	0.238	0.020
0.115	0.040	0.516	0.040
0.143	0.060	0.813	0.060
0.162	0.080	1.095	0.080
0.176	0.100	1.324	0.100
0.188	0.120	1.529	0.120
0.200	0.140	1.703	0.140
0.212	0.160	1.886	0.160
0.224	0.180	2.038	0.180
0.235	0.200	2.193	0.200
0.245	0.220	2.336	0.220
0.256	0.240	2.472	0.240
0.267	0.260	2.611	0.260
0.277	0.280	2.741	0.280
0.289	0.300	2.866	0.300
0.300	0.320	2.995	0.320
0.310	0.340	3.097	0.340
0.322	0.360	3.202	0.360
0.333	0.380	3.307	0.380
0.344	0.400	3.404	0.400
0.356	0.420	3.490	0.420
0.367	0.440	3.579	0.440
0.379	0.460	3.672	0.460
0.392	0.480	3.753	0.480
0.401	0.495	3.812	0.495
0.403	0.500	3.832	0.500



Tabla A1. 7. Resultados de la simulación, a) Experimento 13 y b) Experimento 14.

EXPERIMENTO 13		EXPERIMENTO 14	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.205	0.020	0.212	0.020
0.454	0.040	0.468	0.040
0.663	0.060	0.676	0.060
0.806	0.080	0.848	0.080
0.919	0.100	1.001	0.100
1.034	0.120	1.129	0.120
1.129	0.140	1.260	0.140
1.220	0.160	1.373	0.160
1.307	0.180	1.485	0.180
1.385	0.200	1.585	0.200
1.460	0.220	1.668	0.220
1.531	0.240	1.751	0.240
1.582	0.260	1.823	0.260
1.646	0.280	1.890	0.280
1.700	0.300	1.952	0.300
1.738	0.320	2.013	0.320
1.803	0.340	2.071	0.340
1.838	0.360	2.120	0.360
1.878	0.380	2.172	0.380
1.913	0.400	2.224	0.400
1.954	0.420	2.275	0.420
1.993	0.440	2.325	0.440
2.018	0.460	2.372	0.460
2.046	0.480	2.418	0.480
2.076	0.495	2.454	0.495
2.089	0.500	2.468	0.500



Tabla A1. 8. *Resultados de la simulación, Experimento 15.*

EXPERIMENTO 15	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000
0.209	0.020
0.464	0.040
0.671	0.060
0.828	0.080
0.969	0.100
1.092	0.120
1.204	0.140
1.308	0.160
1.407	0.180
1.497	0.200
1.579	0.220
1.655	0.240
1.721	0.260
1.787	0.280
1.841	0.300
1.893	0.320
1.947	0.340
1.999	0.360
2.043	0.380
2.082	0.400
2.130	0.420
2.172	0.440
2.212	0.460
2.251	0.480
2.279	0.495
2.288	0.500

ANEXO 2

**Resultados de las simulaciones modificados de todos los experimentos para
aceros**



Tabla A2. 1. Resultados de la simulación, a) Experimento 1 y b) Experimento 2.

EXPERIMENTO 1		EXPERIMENTO 2	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.196	0.020	0.204	0.020
0.350	0.040	0.357	0.040
0.448	0.060	0.451	0.060
0.530	0.080	0.538	0.080
0.598	0.100	0.606	0.100
0.657	0.120	0.666	0.120
0.703	0.140	0.713	0.140
0.751	0.160	0.756	0.160
0.785	0.180	0.791	0.180
0.815	0.200	0.822	0.200
0.844	0.220	0.851	0.220
0.868	0.240	0.873	0.240
0.891	0.260	0.896	0.260
0.913	0.280	0.919	0.280
0.936	0.300	0.937	0.300
0.951	0.320	0.956	0.320
0.967	0.340	0.972	0.340
0.988	0.360	0.991	0.360
1.004	0.380	1.008	0.380
1.022	0.400	1.025	0.400
1.039	0.420	1.041	0.420
1.053	0.440	1.056	0.440
1.069	0.460	1.073	0.460
1.087	0.480	1.090	0.480
1.091	0.485	1.095	0.485
1.102	0.495	1.104	0.495
1.105	0.500	1.109	0.500



Tabla A2. 2. Resultados de la simulación, a) Experimento 3 y b) Experimento 4.

EXPERIMENTO 3		EXPERIMENTO 4	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.289	0.020	0.302	0.020
0.622	0.040	0.661	0.040
0.921	0.060	0.967	0.060
1.154	0.080	1.193	0.080
1.357	0.100	1.393	0.100
1.520	0.120	1.572	0.120
1.673	0.140	1.714	0.140
1.816	0.160	1.865	0.160
1.944	0.180	1.986	0.180
2.080	0.200	2.134	0.200
2.198	0.220	2.249	0.220
2.305	0.240	2.360	0.240
2.420	0.260	2.464	0.260
2.505	0.280	2.545	0.280
2.600	0.300	2.639	0.300
2.690	0.320	2.724	0.320
2.760	0.340	2.792	0.340
2.817	0.360	2.863	0.360
2.905	0.380	2.942	0.380
2.966	0.400	2.997	0.400
3.028	0.420	3.055	0.420
3.077	0.440	3.112	0.440
3.140	0.460	3.172	0.460
3.206	0.480	3.233	0.480
3.220	0.485	3.244	0.485
3.241	0.495	3.267	0.495
3.251	0.500	3.282	0.500



Tabla A2. 3. Resultados de la simulación, a) Experimento 5 y b) Experimento 6.

EXPERIMENTO 5		EXPERIMENTO 6	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.206	0.020	0.214	0.020
0.369	0.040	0.379	0.040
0.492	0.060	0.501	0.060
0.594	0.080	0.605	0.080
0.677	0.100	0.689	0.100
0.744	0.120	0.753	0.120
0.799	0.140	0.807	0.140
0.847	0.160	0.855	0.160
0.889	0.180	0.895	0.180
0.923	0.200	0.930	0.200
0.958	0.220	0.964	0.220
0.989	0.240	0.995	0.240
1.019	0.260	1.024	0.260
1.048	0.280	1.053	0.280
1.075	0.300	1.080	0.300
1.104	0.320	1.109	0.320
1.132	0.340	1.136	0.340
1.158	0.360	1.161	0.360
1.184	0.380	1.188	0.380
1.210	0.400	1.215	0.400
1.238	0.420	1.243	0.420
1.266	0.440	1.271	0.440
1.294	0.460	1.299	0.460
1.322	0.480	1.327	0.480
1.329	0.485	1.334	0.485
1.343	0.495	1.348	0.495
1.349	0.500	1.355	0.500



Tabla A2. 4. Resultados de la simulación, a) Experimento 7 y b) Experimento 8.

EXPERIMENTO 7		EXPERIMENTO 8	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.290	0.020	0.306	0.020
0.619	0.040	0.662	0.040
0.927	0.060	0.973	0.060
1.182	0.080	1.219	0.080
1.389	0.100	1.439	0.100
1.565	0.120	1.614	0.120
1.747	0.140	1.789	0.140
1.897	0.160	1.953	0.160
2.055	0.180	2.110	0.180
2.188	0.200	2.244	0.200
2.329	0.220	2.383	0.220
2.448	0.240	2.496	0.240
2.554	0.260	2.594	0.260
2.663	0.280	2.709	0.280
2.758	0.300	2.797	0.300
2.841	0.320	2.880	0.320
2.921	0.340	2.964	0.340
3.004	0.360	3.043	0.360
3.081	0.380	3.117	0.380
3.149	0.400	3.182	0.400
3.209	0.420	3.244	0.420
3.289	0.440	3.323	0.440
3.355	0.460	3.384	0.460
3.418	0.480	3.448	0.480
3.434	0.485	3.464	0.485
3.465	0.495	3.495	0.495
3.481	0.500	3.508	0.500



Tabla A2. 5. Resultados de la simulación, a) Experimento 9 y b) Experimento 10.

EXPERIMENTO 9		EXPERIMENTO 10	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.251	0.020	0.271	0.020
0.546	0.040	0.582	0.040
0.750	0.060	0.793	0.060
0.918	0.080	0.955	0.080
1.053	0.100	1.103	0.100
1.187	0.120	1.229	0.120
1.297	0.140	1.352	0.140
1.410	0.160	1.460	0.160
1.503	0.180	1.551	0.180
1.596	0.200	1.635	0.200
1.668	0.220	1.707	0.220
1.736	0.240	1.779	0.240
1.802	0.260	1.840	0.260
1.860	0.280	1.890	0.280
1.914	0.300	1.946	0.300
1.965	0.320	1.997	0.320
2.014	0.340	2.044	0.340
2.059	0.360	2.086	0.360
2.098	0.380	2.121	0.380
2.143	0.400	2.172	0.400
2.185	0.420	2.210	0.420
2.225	0.440	2.248	0.440
2.262	0.460	2.286	0.460
2.299	0.480	2.319	0.480
2.309	0.485	2.330	0.485
2.327	0.495	2.351	0.495
2.339	0.500	2.359	0.500



Tabla A2. 6. Resultados de la simulación, a) Experimento 11 y b) Experimento 12.

EXPERIMENTO 11		EXPERIMENTO 12	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.072	0.020	0.303	0.020
0.119	0.040	0.658	0.040
0.147	0.060	1.034	0.060
0.164	0.080	1.323	0.080
0.178	0.100	1.560	0.100
0.190	0.120	1.767	0.120
0.202	0.140	1.968	0.140
0.215	0.160	2.136	0.160
0.226	0.180	2.312	0.180
0.236	0.200	2.464	0.200
0.248	0.220	2.627	0.220
0.259	0.240	2.773	0.240
0.270	0.260	2.898	0.260
0.280	0.280	3.042	0.280
0.292	0.300	3.153	0.300
0.303	0.320	3.261	0.320
0.314	0.340	3.367	0.340
0.326	0.360	3.469	0.360
0.336	0.380	3.555	0.380
0.348	0.400	3.630	0.400
0.359	0.420	3.733	0.420
0.371	0.440	3.812	0.440
0.383	0.460	3.890	0.460
0.396	0.480	3.960	0.480
0.398	0.485	3.977	0.485
0.404	0.495	4.017	0.495
0.407	0.500	4.036	0.500



Tabla A2. 7. Resultados de la simulación, a) Experimento 13 y b) Experimento 14.

EXPERIMENTO 13		EXPERIMENTO 14	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.258	0.020	0.265	0.020
0.556	0.040	0.574	0.040
0.744	0.060	0.790	0.060
0.905	0.080	0.974	0.080
1.031	0.100	1.124	0.100
1.123	0.120	1.273	0.120
1.239	0.140	1.401	0.140
1.331	0.160	1.518	0.160
1.411	0.180	1.618	0.180
1.489	0.200	1.703	0.200
1.567	0.220	1.792	0.220
1.616	0.240	1.860	0.240
1.684	0.260	1.927	0.260
1.736	0.280	1.991	0.280
1.770	0.300	2.050	0.300
1.839	0.320	2.104	0.320
1.873	0.340	2.154	0.340
1.908	0.360	2.204	0.360
1.949	0.380	2.257	0.380
1.985	0.400	2.306	0.400
2.019	0.420	2.354	0.420
2.042	0.440	2.399	0.440
2.070	0.460	2.442	0.460
2.113	0.480	2.495	0.480
2.120	0.485	2.507	0.485
2.129	0.495	2.532	0.495
2.132	0.500	2.544	0.500

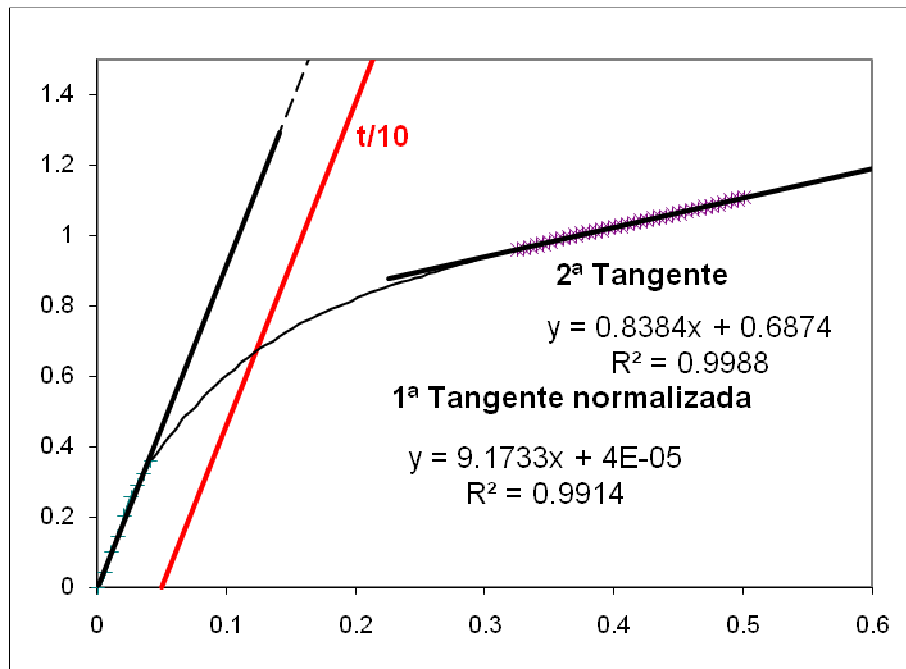
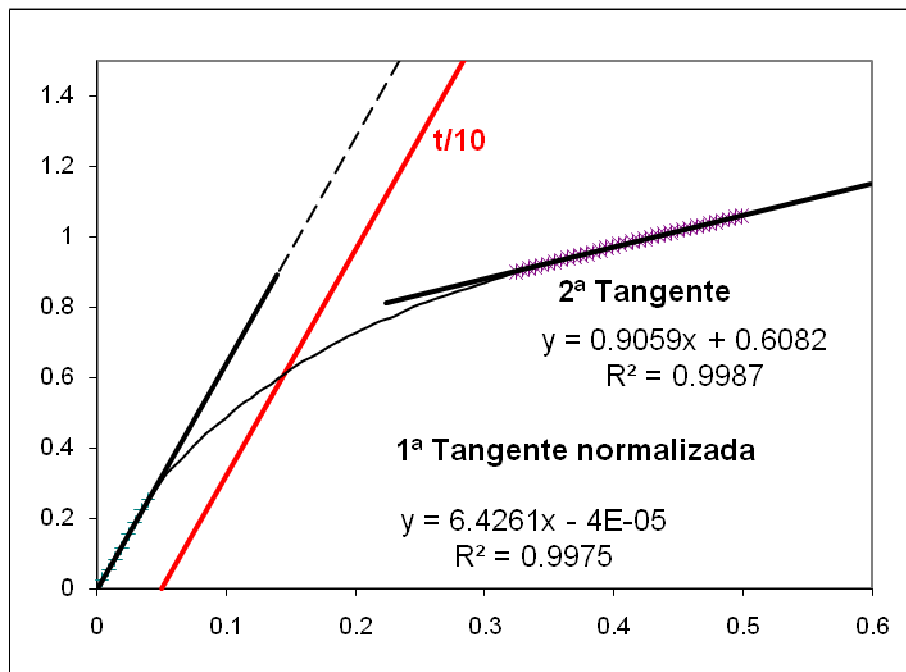


Tabla A2. 8. *Resultados de la simulación, Experimento 15.*

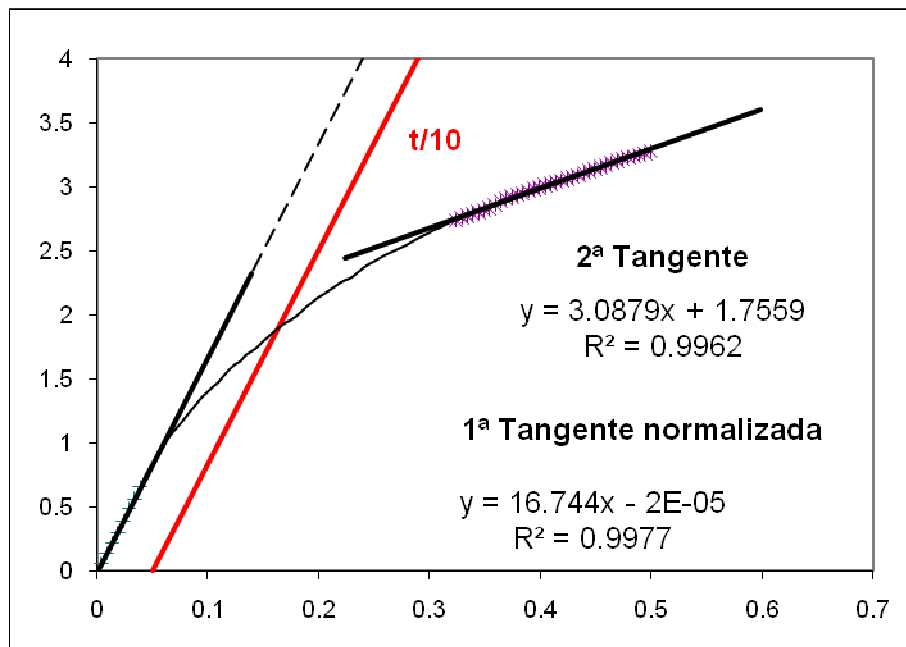
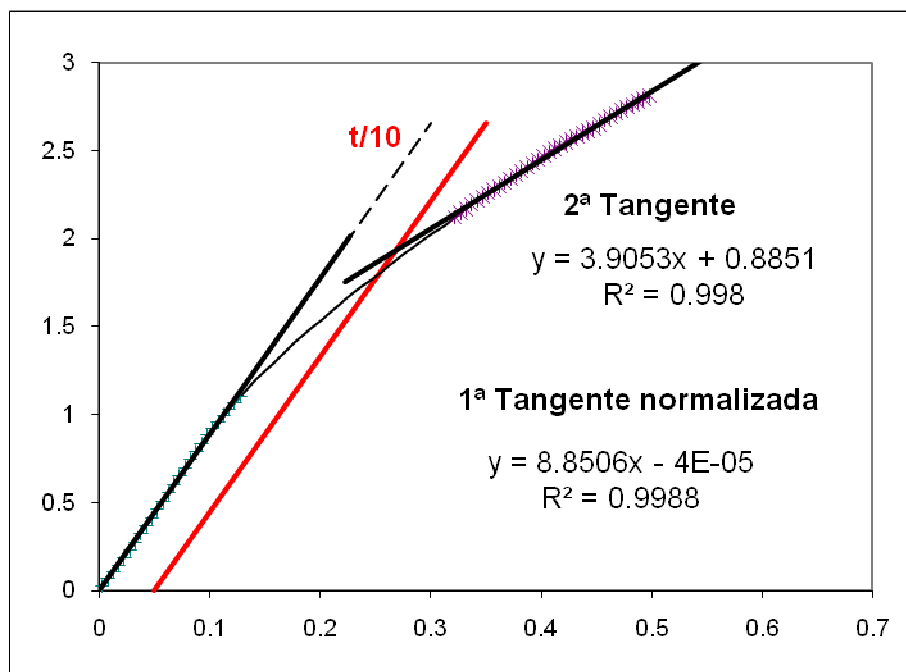
EXPERIMENTO 15	
FUERZA (KN)	DESPLAZAMIENTO (mm)
0.000	0.000
0.253	0.020
0.559	0.040
0.774	0.060
0.938	0.080
1.075	0.100
1.204	0.120
1.324	0.140
1.437	0.160
1.526	0.180
1.614	0.200
1.690	0.220
1.756	0.240
1.823	0.260
1.876	0.280
1.927	0.300
1.982	0.320
2.030	0.340
2.072	0.360
2.110	0.380
2.158	0.400
2.198	0.420
2.238	0.440
2.275	0.460
2.311	0.480
2.319	0.485
2.340	0.495
2.351	0.500

ANEXO 3

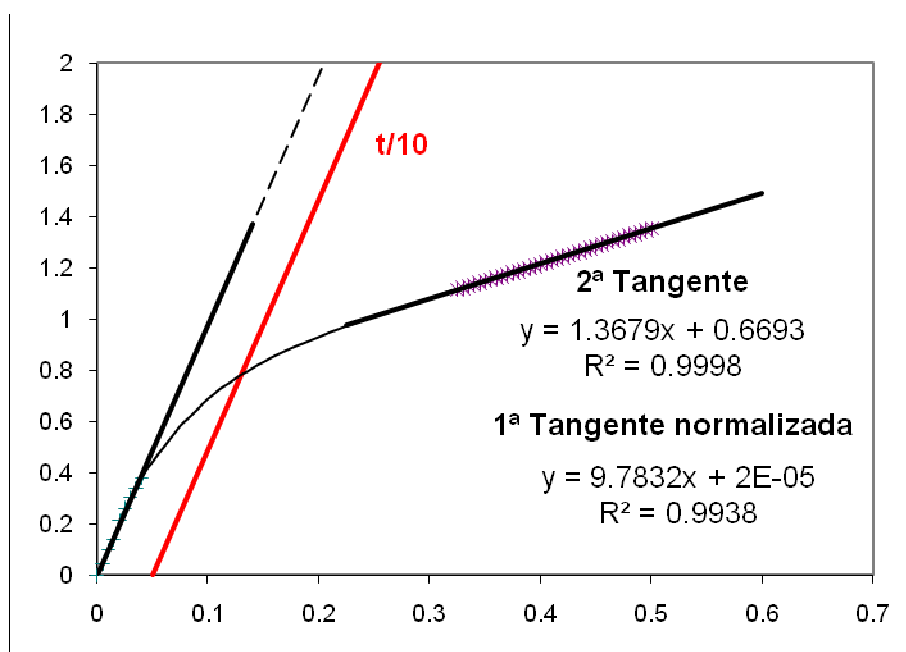
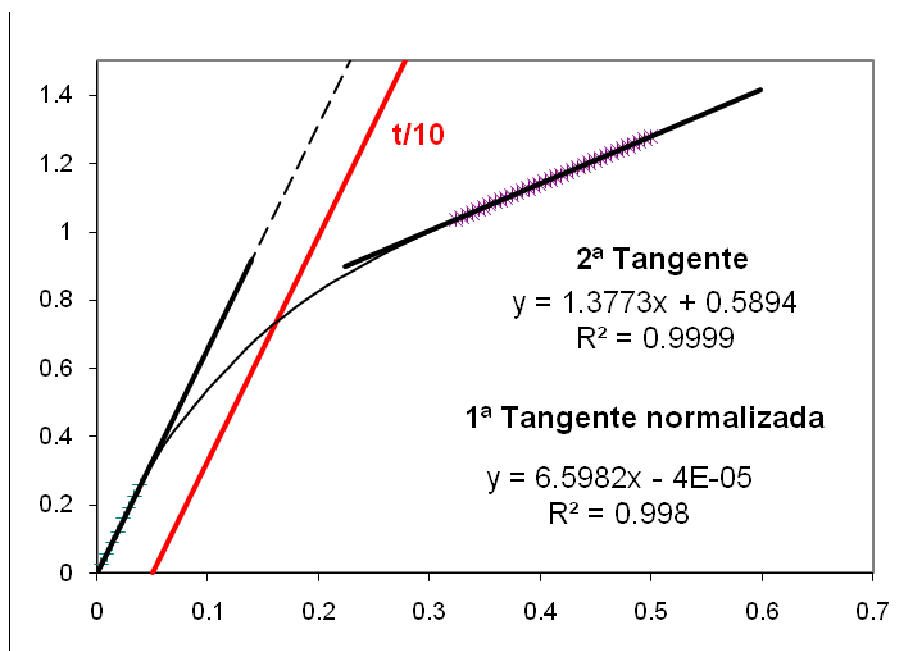
Gráficas para la obtención de los coeficientes P_y y $P_{yoffset}$ para el módulo de Young comprendido entre [250000:50000]



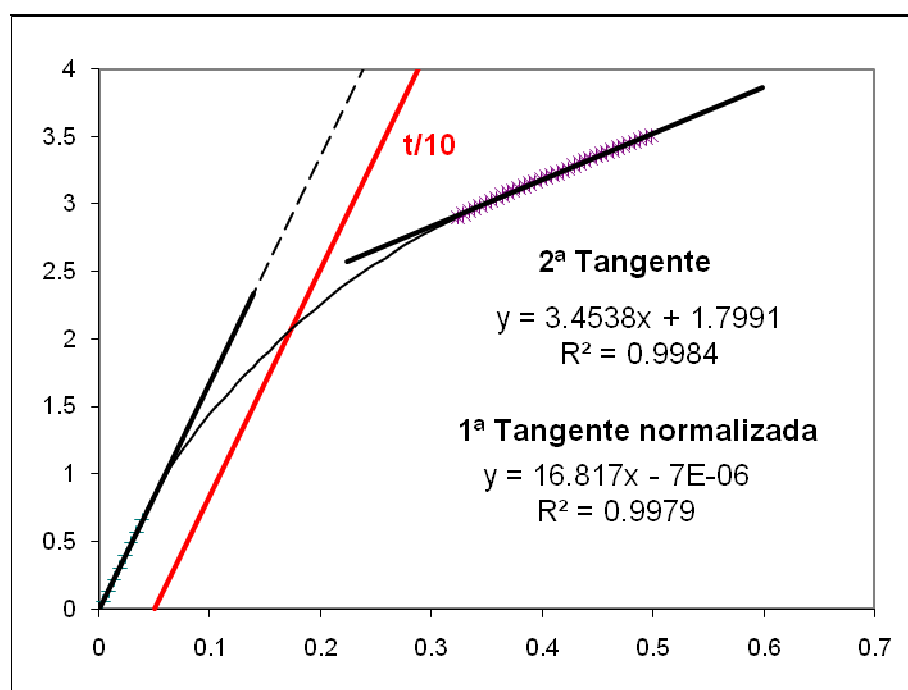
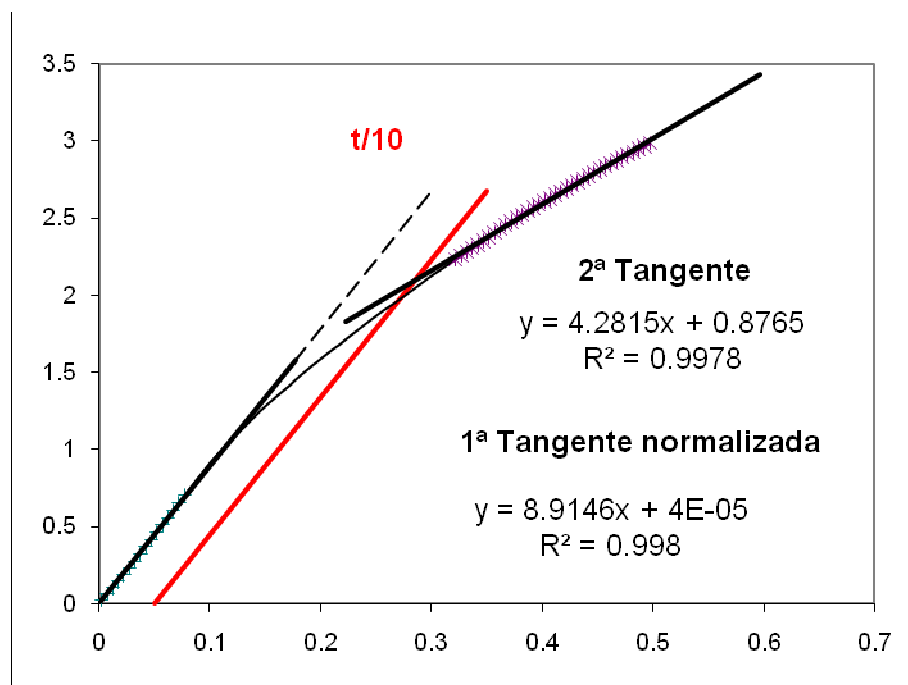
Gráfica A3. 1. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffseb}$ a) Experimento 1 y b) Experimento 2.



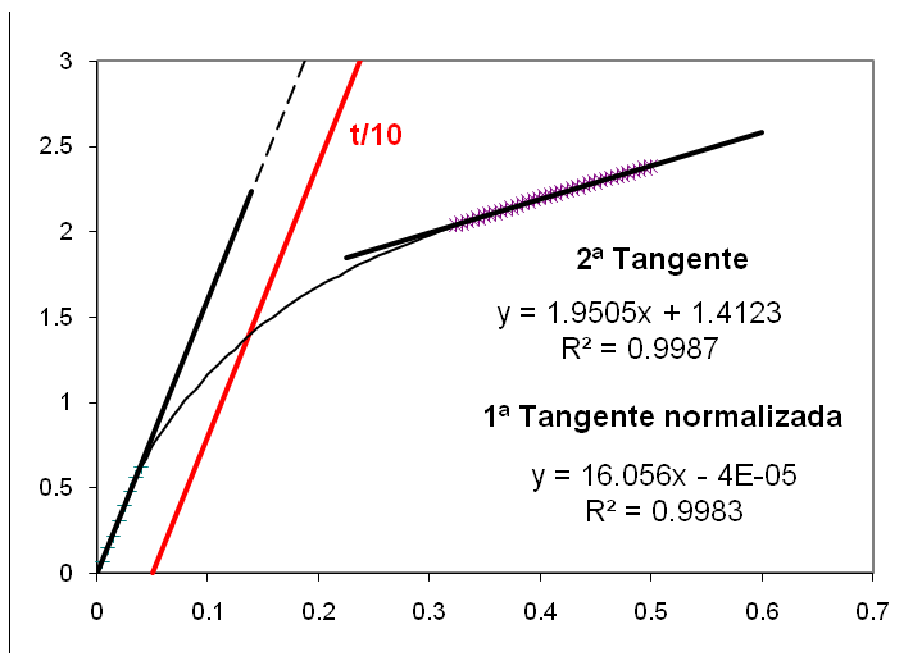
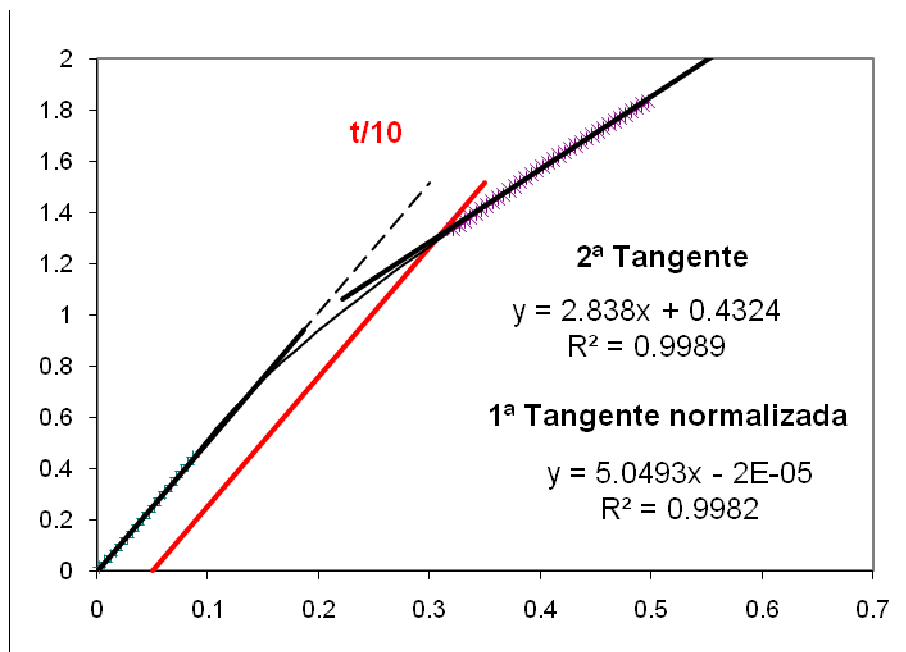
Gráfica A3. 2. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$, a) Experimento 3 y b) Experimento 4.



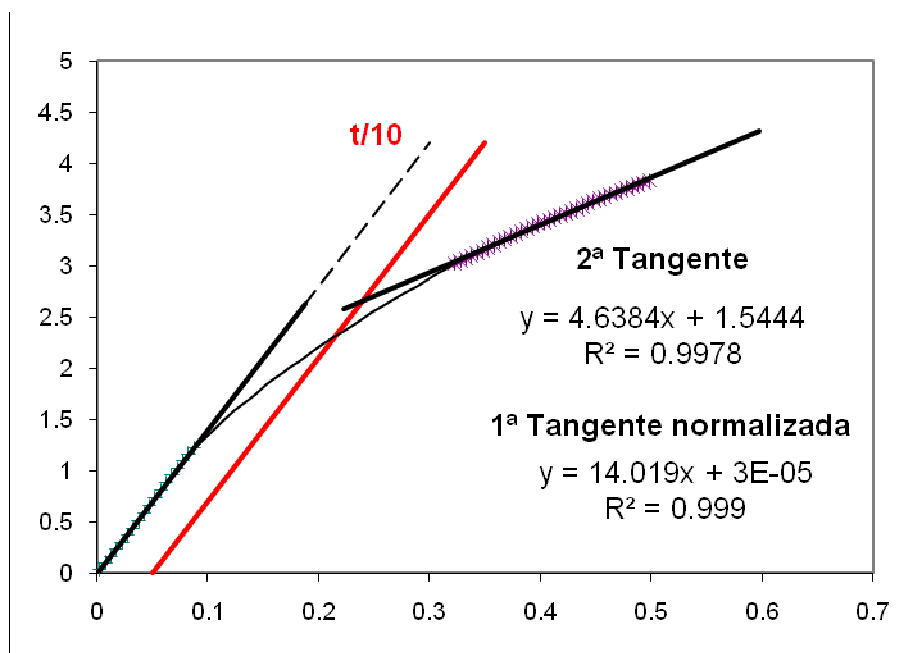
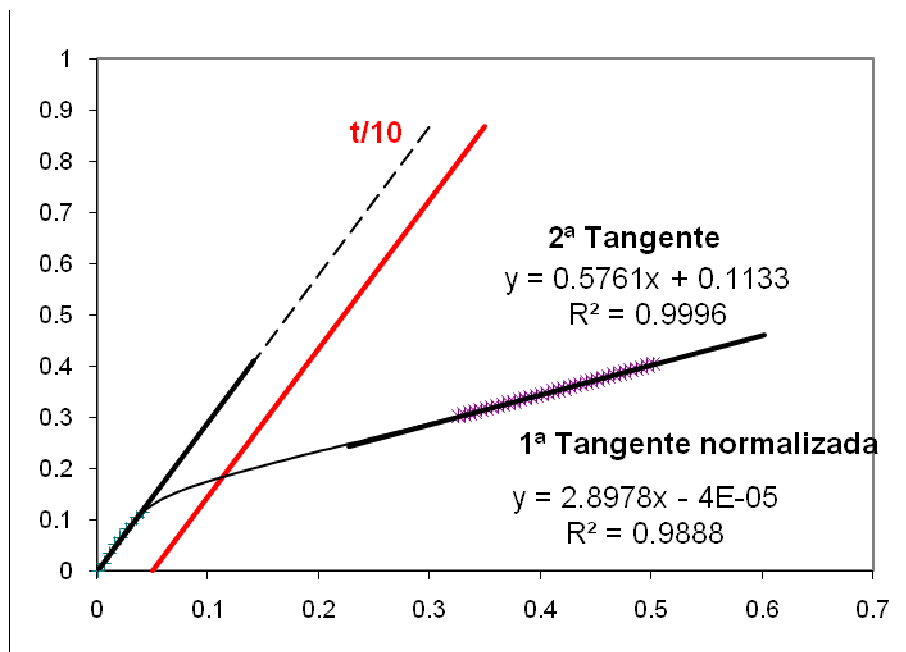
Gráfica A3. 3. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$, a) Experimento 5 y b) Experimento 6.



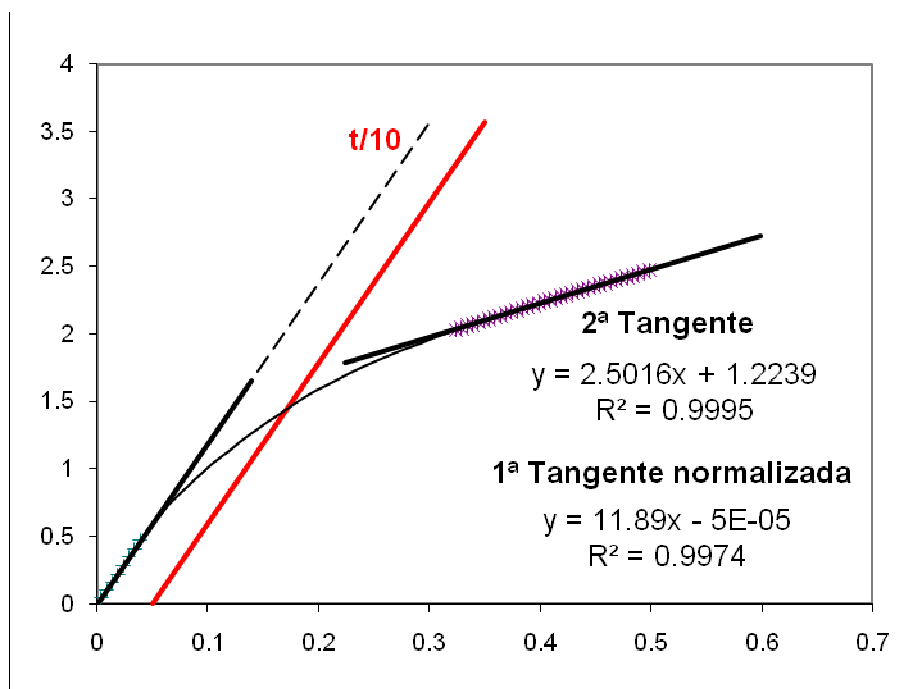
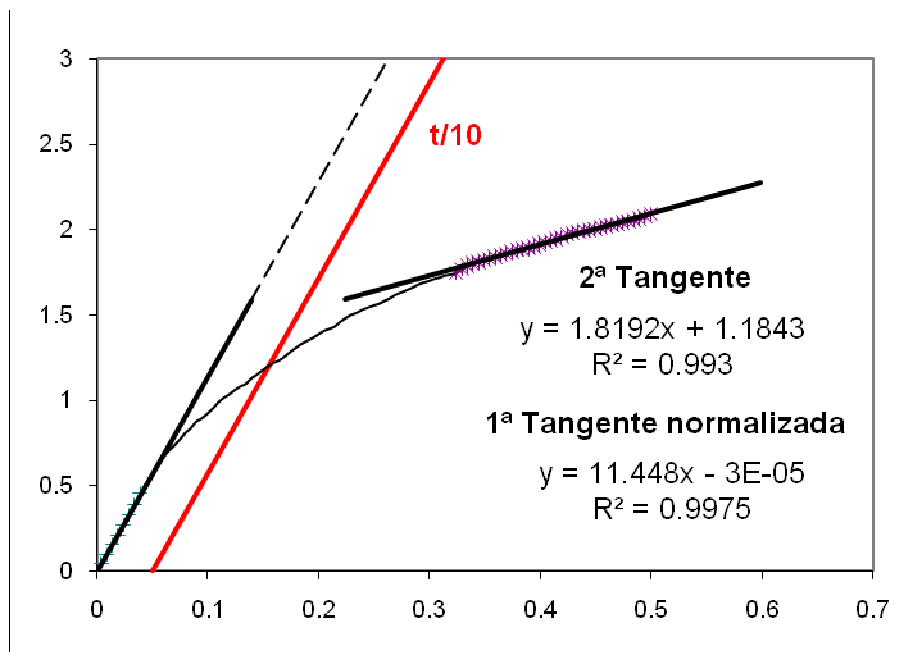
Gráfica A3. 4. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffseb}$ a) Experimento 7 y b) Experimento 8.



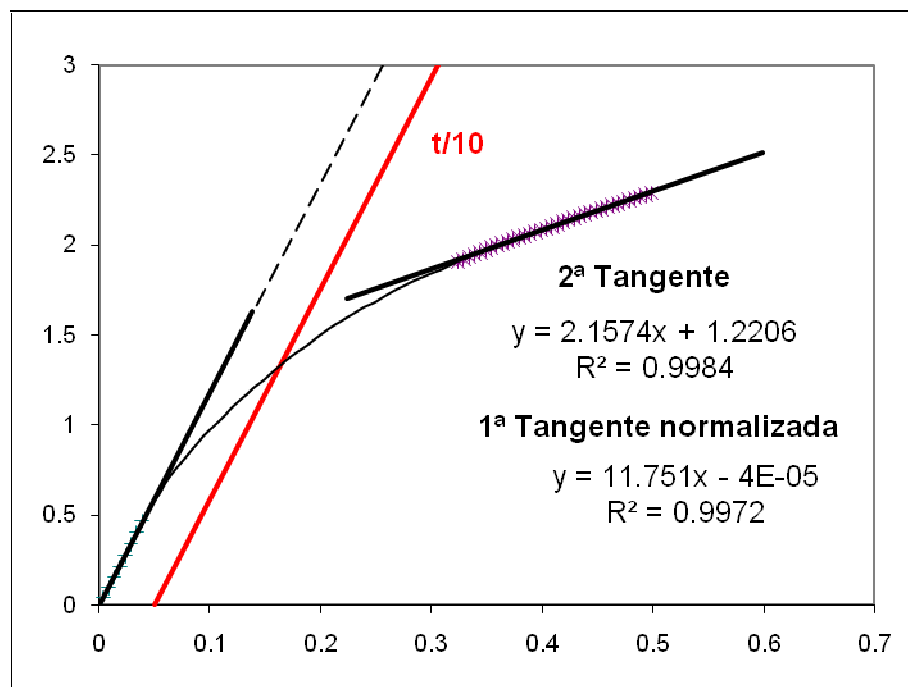
Gráfica A3. 5. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$, a) Experimento 9 y b) Experimento 10.



Gráfica A3. 6. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$ a) Experimento 11 y b) Experimento 12.



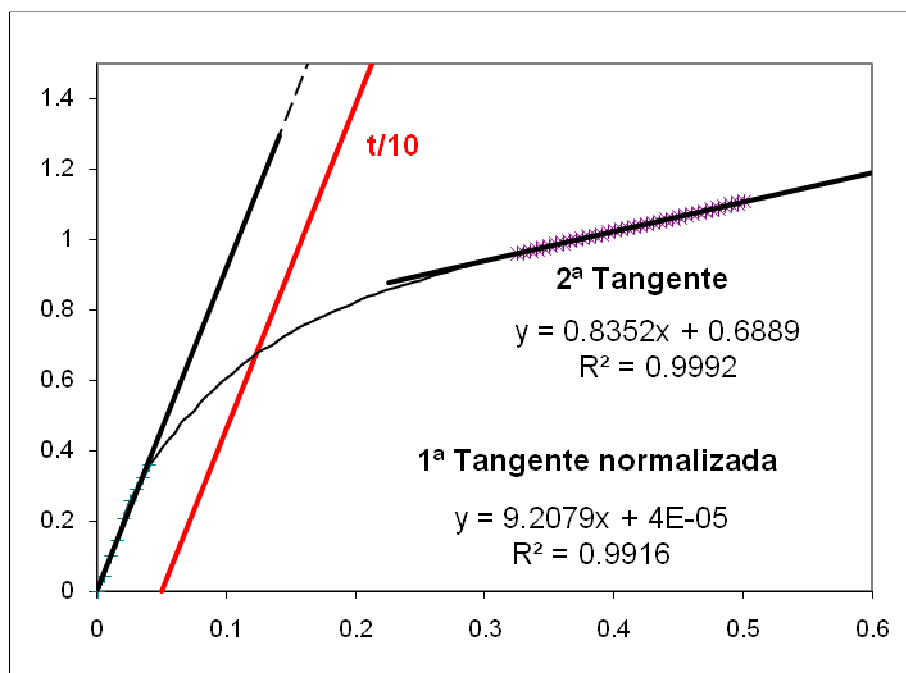
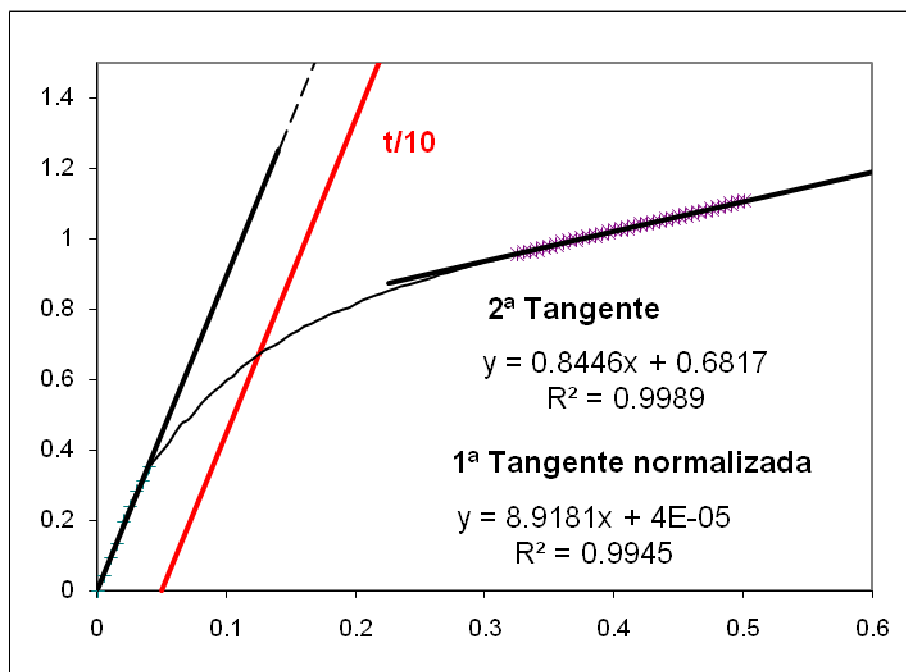
Gráfica A3. 7. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$ a) Experimento 13 y b) Experimento 14.



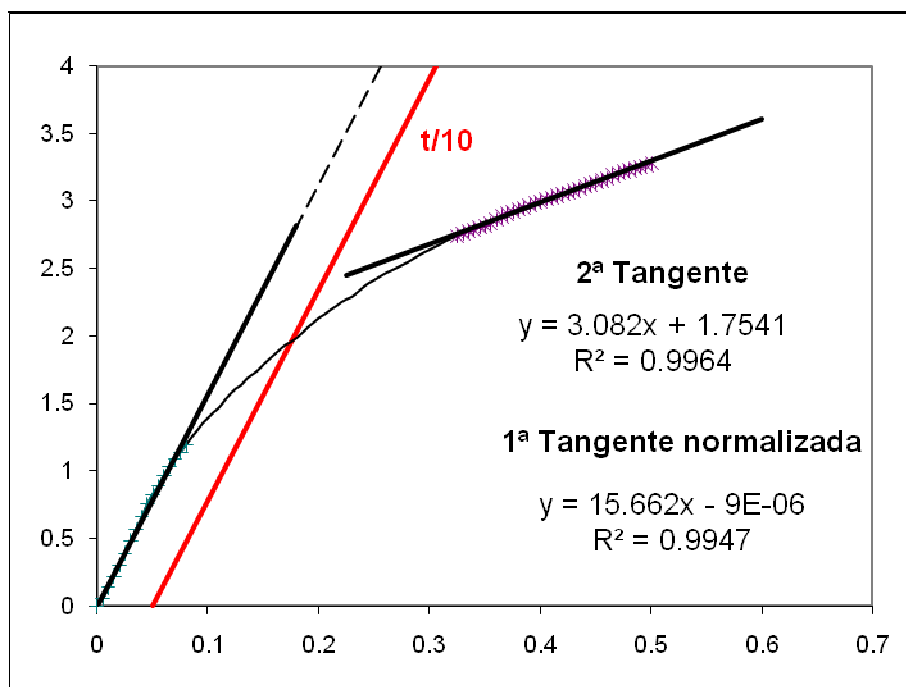
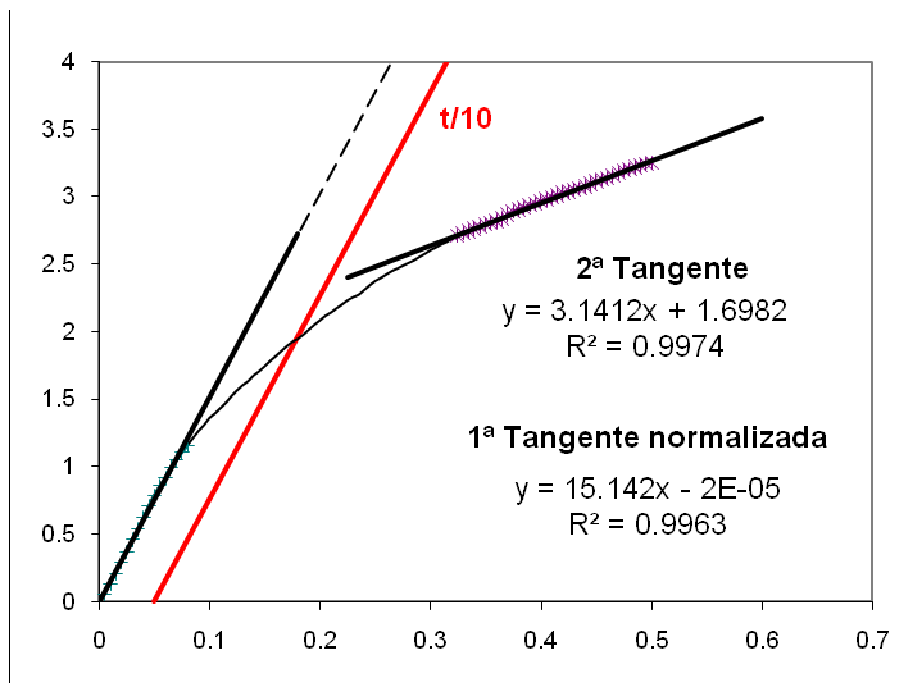
Gráfica A3. 8. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$ Experimento 15.

ANEXO 4

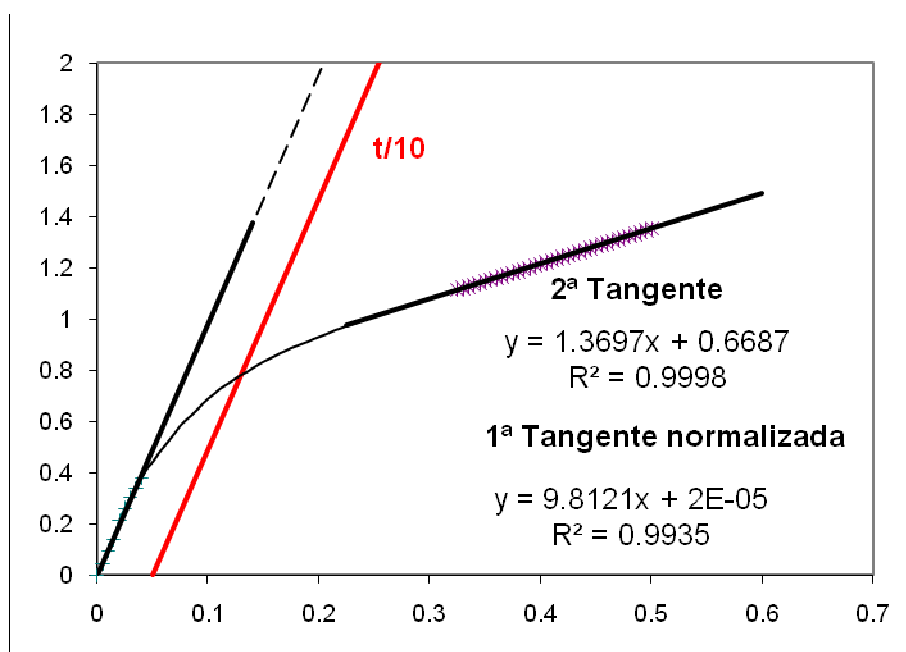
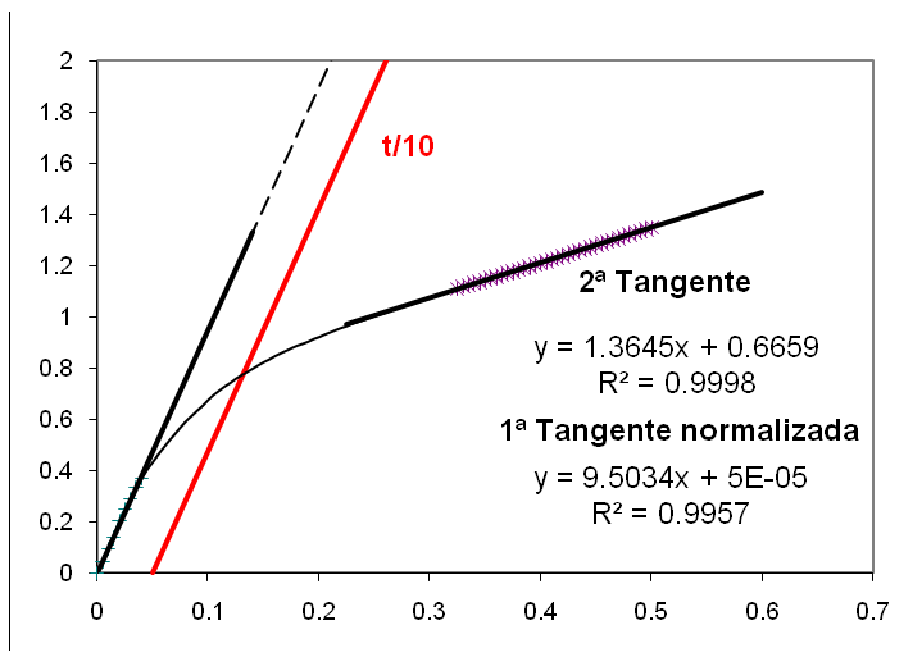
Gráficas para la obtención de los coeficientes P_y y $P_{yoffset}$ para aceros



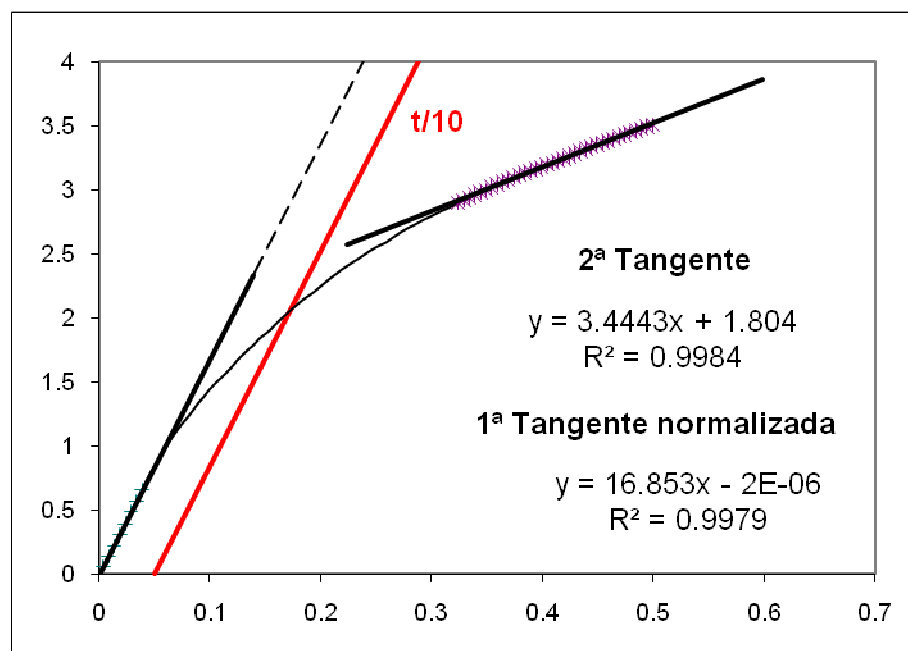
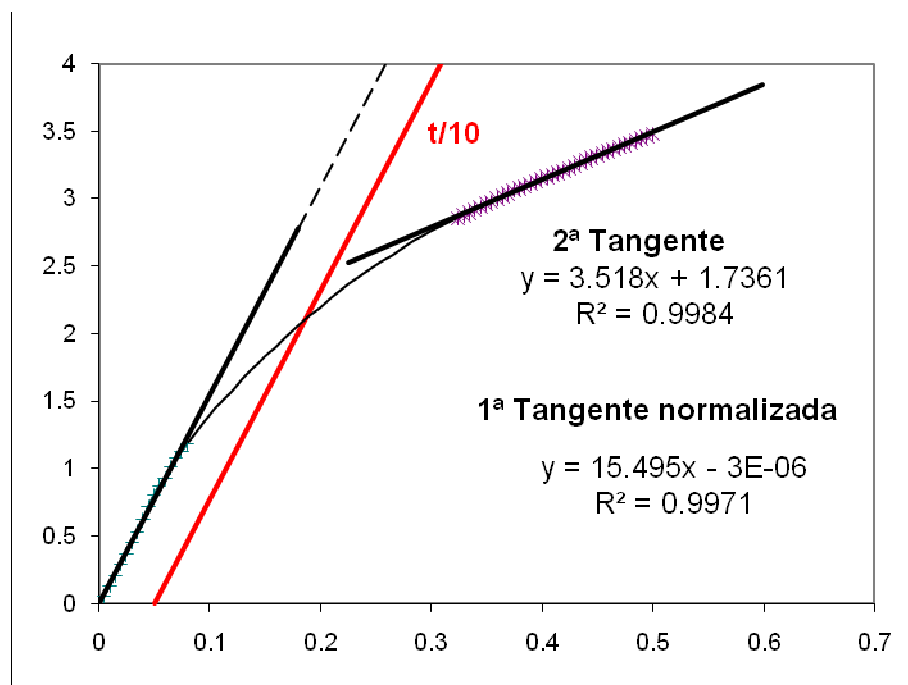
Gráfica A4. 1. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffseb}$ a) Experimento 1 y b) Experimento 2.



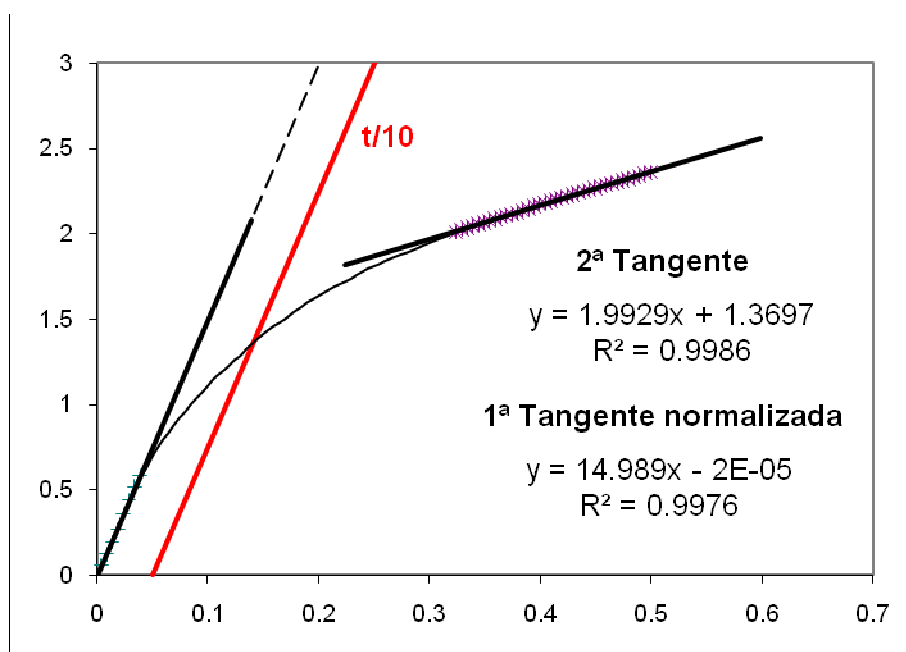
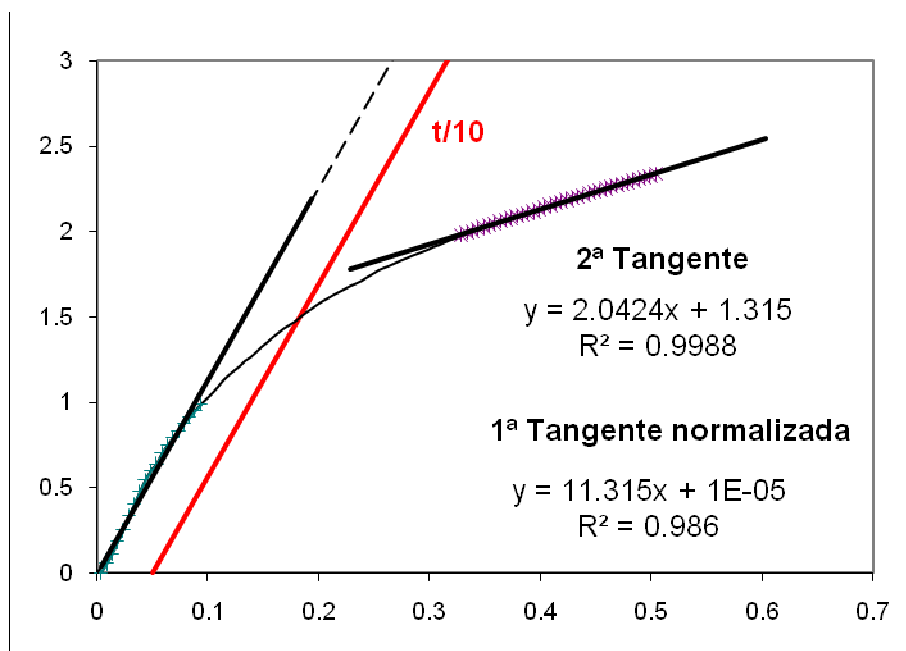
Gráfica A4. 2. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$ a) Experimento 3 y b) Experimento 4.



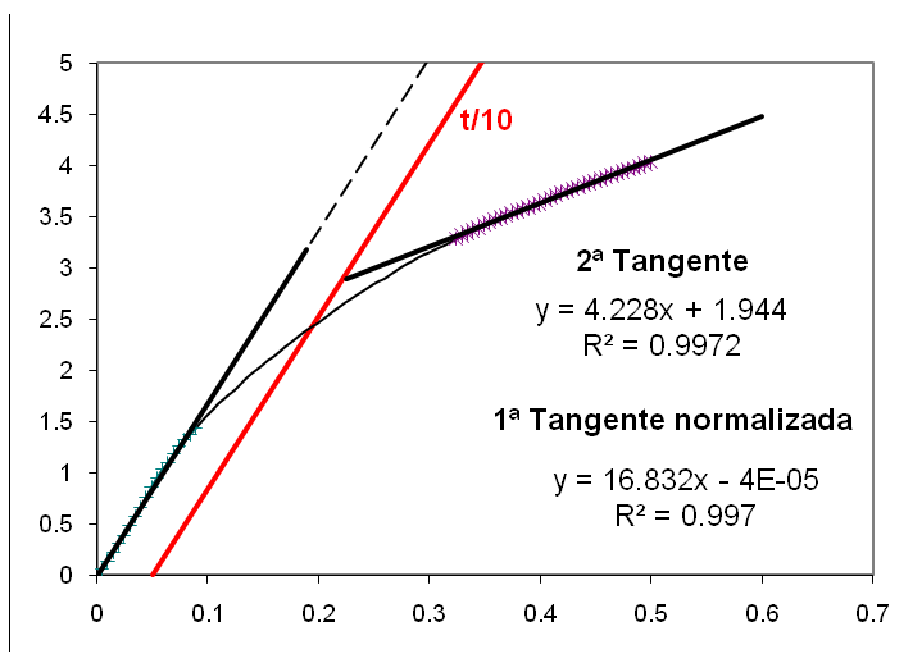
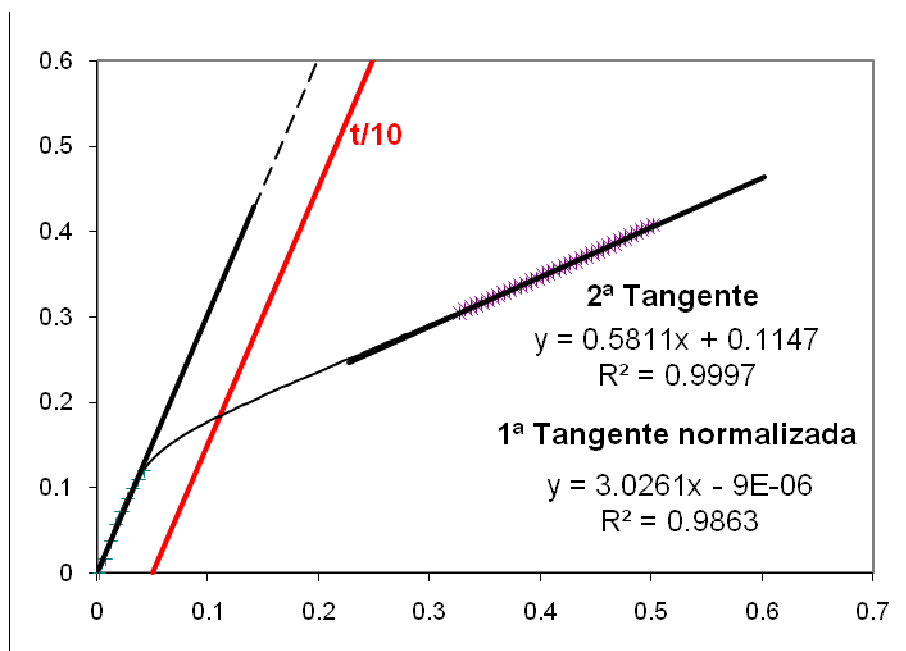
Gráfica A4. 3. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$, a) Experimento 5 y b) Experimento 6.



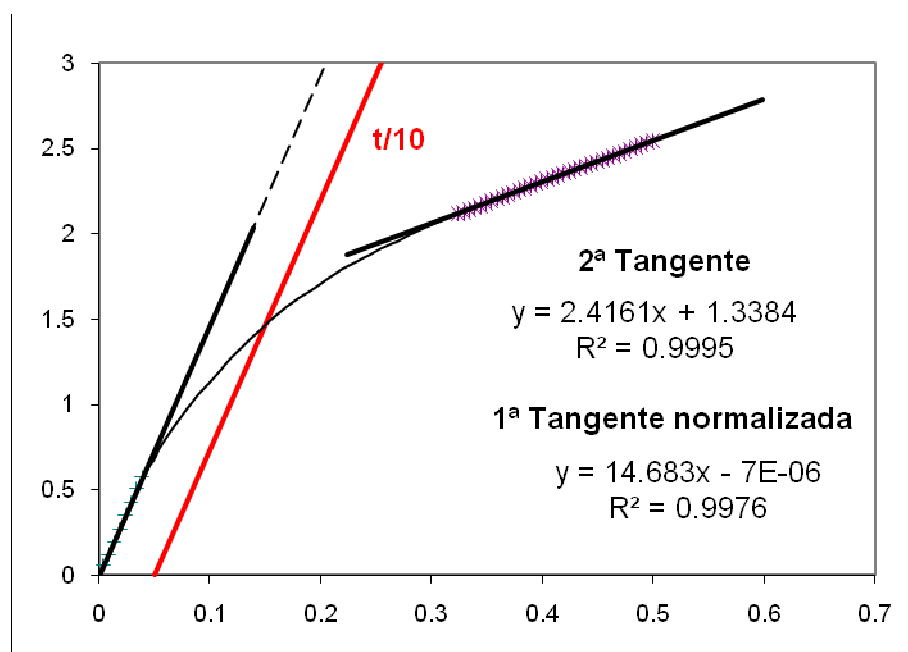
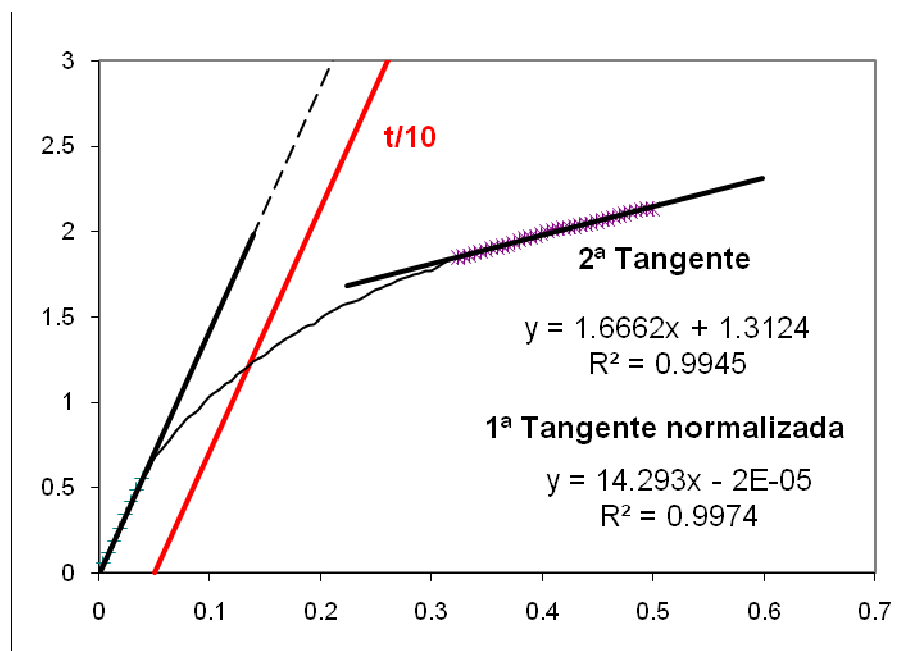
Gráfica A4. 4. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$, a) Experimento 7 y b) Experimento 8.



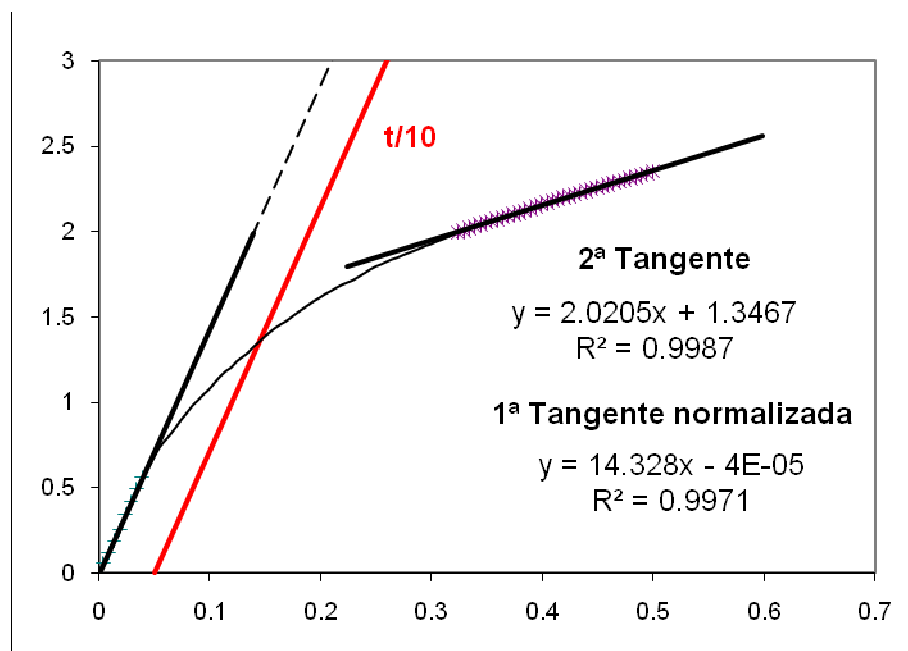
Gráfica A4. 5. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$, a) Experimento 9 y b) Experimento 10.



Gráfica A4. 6. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$, a) Experimento 11 y b) Experimento 12.



Gráfica A4. 7. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$ a) Experimento 13 y b) Experimento 14.



Gráfica A4. 8. Gráficas para la obtención de P_y y $P_{yoffset}$ Experimento 15.