

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos



**Análisis de la variabilidad de una placa de 316L
fabricada por DED mediante el uso de Small Punch**

Proyecto de fin de carrera

Blanca Castro López de Ipiña
Grado de Ingeniero de Materiales

Directores:
Marta Serrano García
Jesús Ruiz Hervías

2025

« El camino del progreso no es rápido ni fácil »

Marie Curie

AGRADECIMIENTOS

Ha sido un camino difícil, en el que no hubiera podido seguir sin la ayuda y apoyo de muchas personas.

Marta Serrano García, por confiar en mí ciegamente desde el principio. Trabajar contigo ha sido todo un honor e inspiración.

Jesús Ruiz Hervías, por descubrirme este mundo en tu asignatura y por tu ayuda en la realización de medidas de tensiones residuales junto con Daniel Pérez Gallego, siempre dispuesto a echarme una mano.

Andrés de Bustos Molina y Rafael Mayo García, por introducirme al mundo práctico del *Machine Learning* con tanta predisposición e interés.

A mis compañeros del CIEMAT, Silvia y Jesús en particular, por las charlas en los descansos, y a quienes se han convertido en amigos en mi paso por la UPM, por hacer mucho más livianos estos años.

Marina, por ser hogar y mucho más de lo que una hermana jamás podría ser.

Alma, por las risas que siempre me empujan a ver todo con otros ojos.

Mis Nostrils, ¿qué sería la vida sin vosotros? Vamos a viajar juntos toda la vida, ¿vamos a por el siguiente?

Bibi, Celine, Irene y Sara, por siempre estar ahí para mí después de tantos años.

Marcos, por tu constante apoyo y ayuda, y por hacerme ver que sí podía cuando más lo necesitaba.

Popi, momi y Javi. Esto es todo por vosotros, os quiero.

Y a mí misma, por no haberme rendido en el desafío mental que estos años me han supuesto. No podría estar más orgullosa.

RESUMEN

Este proyecto consiste en el estudio de la variabilidad de las propiedades mecánicas de una placa de 316L fabricada por DED (*Directed Energy Deposition*). La variabilidad se estudiará en las tres direcciones espaciales mediante el ensayo de discos mecanizados en varias coordenadas de la placa con el SPT (*Small Punch Test*). Se determinarán los valores estimados de resistencia y ductilidad teniendo en cuenta la variabilidad en altura de la placa, la orientación y el efecto de las tensiones residuales para analizar la anisotropía.

El análisis de los datos se realizará mediante el uso de técnicas estadísticas avanzadas y métodos de aprendizaje no supervisado para determinar criterios de aceptabilidad.

ABSTRACT

This project consists of the study of the variability of the mechanical properties of a 316L plate manufactured by DED (*Directed Energy Deposition*). The variability will be studied in the three spatial directions by testing machined discs in various coordinates of the plate with the SPT (*Small Punch Test*). Estimated strength and ductility values will be determined taking into account the variability in height of the plate, orientation and the effect of residual stresses to analyse anisotropy.

Data analysis will be performed using advanced statistical techniques and unsupervised learning methods to determine acceptability criteria.

TABLA DE CONTENIDO

1	Motivación y Objetivos	1
2	Introducción.....	3
2.1	Aceros y fundiciones	3
2.1.1	Aceros inoxidables	4
2.1.2	Acero AISI 316L	6
2.2	Fabricación Aditiva (AM).....	9
2.2.1	Directed Energy Deposition (DED)	10
2.2.2	Procesos de cualificación.....	12
2.3	Ensayo de Small Punch (SPT)	12
2.3.1	Procedimiento de ensayo	13
2.3.2	Curva Fuerza – Desplazamiento ($F(v)$).....	14
2.3.3	Curva Fuerza – Deflexión ($F(u)$)	15
2.3.4	Determinación de propiedades mecánicas.....	15
3	Materiales y Métodos	19
3.1	Placa de 316L fabricada por DED	19
3.1.1	Estrategia de fabricación	20
3.2	Ensayo de Small Punch (SPT)	21
3.2.1	Planos de mecanizado.....	22
3.2.2	Preparación de muestras	24
3.2.3	Procedimiento de ensayo	27
3.2.4	Procesamiento de datos de ensayo.....	30
3.2.5	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	32
3.3	Medida de Tensiones Residuales	32
3.3.1	Símbolos y abreviaturas	33

3.3.2	Preparación de la probeta	34
3.3.3	Procedimiento de ensayo.....	34
3.4	Análisis de datos de ensayo	37
3.4.1	Análisis Estadístico	37
3.4.2	Machine Learning	40
4	Resultados y Discusión	43
4.1	Propiedades mecánicas	43
4.1.1	Efecto de la posición	47
4.1.2	Efecto de la orientación.....	67
4.1.3	Historia térmica	71
4.1.4	Medida de Tensiones Residuales	71
4.2	Machine Learning.....	74
5	Conclusiones	81
6	Trabajos futuros.....	83
7	Referencias.....	85
Apéndice A	89
	Gráficas características de ensayo	89
	Probeta Placa 1: A1A P1.....	89
	Probeta Placa 2: U2 P2	90
	Probeta Placa 3: C3A P1	91

1 Motivación y Objetivos

La fabricación aditiva (*Additive Manufacture*, AM) ha tenido un gran impacto en la industria durante los últimos años debido a la posibilidad que ofrece de fabricar componentes personalizados en función de la finalidad [1]. Este método de fabricación permite, además, la obtención de piezas con geometrías complejas a menor coste que los métodos convencionales.

La fabricación aditiva o impresión 3D comenzó a utilizarse hace décadas en materiales plásticos, pero actualmente es posible fabricar componentes con geometrías complejas utilizando todo tipo de materiales. En particular, la fabricación de componentes con acero inoxidable de tipo 316L mediante técnicas de impresión 3D ya se encuentra suficientemente madura [2]. Sin embargo, cuando el componente se diseña y fabrica para su uso en campo nuclear o aeroespacial, las condiciones de seguridad exigidas requieren una completa cualificación tanto del componente como del material.

Existen numerosos ensayos que permiten cualificar materiales, como el ensayo de tracción, de Charpy o de fluencia, pero la mayoría de ellos no permiten determinar las propiedades en diferentes zonas de una pieza para evaluar la anisotropía, además de consumir gran cantidad de material. Esto se debe, principalmente, a las dimensiones de las probetas utilizadas, por lo que el ensayo basado en probetas miniatura (*Small Punch Test*) acorde a la norma EN 10371:2021 [3], representa un método muy útil para la cualificación de nuevos materiales por los siguientes motivos [4]:

- La caracterización mecánica de componentes en servicio o componentes muy costosos.
- La evaluación de componentes con propiedades muy variables y dependientes de su ubicación y orientación.
- La investigación de diferentes zonas en soldaduras.
- La caracterización de materiales irradiados, donde las muestras pequeñas minimizan la exposición a la irradiación.

El objetivo por tanto de este trabajo es estudiar la variabilidad de las propiedades mecánicas de una placa fabricada por DED (*Directed Energy Deposition*), uno de los métodos existentes de fabricación aditiva más prometedores [5], determinando los criterios de aceptabilidad para su posterior empleo en la industria nuclear.

Este análisis se llevará a cabo con herramientas estadísticas avanzadas para comprender patrones de valores y con métodos de aprendizaje no supervisado para descubrir patrones y relaciones que los métodos analíticos tradicionales podrían pasar por alto [6].

2 Introducción

2.1 Aceros y fundiciones

Los aceros son aleaciones de hierro, carbono y otros elementos, y su contenido en carbono no supera el 2%. En caso contrario, se consideran fundiciones de acero.

Las aleaciones que constituyen los aceros son ferrosas dado que son a base de hierro, y representan más del 90% de la producción mundial de metales debido a su buena resistencia, tenacidad y ductilidad a un costo relativamente bajo. También existen las aleaciones no ferrosas si están basadas en otros metales.

Los aceros, a su vez, se distinguen en aceros al carbono y aceros aleados. En el primer caso, los aceros contienen de 0,03 a 1,2% de carbono, de 0,25 a 1% de manganeso y pequeñas cantidades de otros elementos. Sin embargo, la solubilidad del carbono en el hierro es muy limitada debido a la diferencia de radios atómicos (70 y 126 pm respectivamente), dando lugar a distorsión de la red cristalina y campos de tensiones (solución intersticial). De esta forma, un exceso de carbono no admitido en la red formará cementita (Fe_3C), teniendo las siguientes fases sólidas representadas en la Figura 1, el diagrama Fe- Fe_3C :

- Ferrita (α): hierro BCC que apenas admite carbono, con una solubilidad sólida máxima del 0,022% a 727°C.
- Austenita (γ): hierro FCC con una solubilidad sólida mucho mayor para el carbono que α ferrita, con un máximo del 2,11% a 1148°C, disminuyendo al 0,77% a 727°C.
- Cementita (Fe_3C): es el compuesto intermetálico con una composición de 6,67% C y 93,3% Fe, y es duro y quebradizo.
- δ ferrita: hierro BCC que tiene una solubilidad sólida máxima del 0,09% a 1465°C.

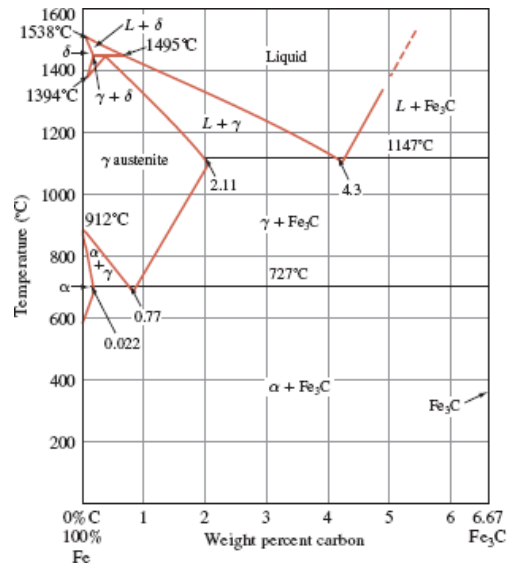


Figura 1. Diagrama de fases Fe-Fe₃C [7].

Adicionalmente, se encuentra la perlita, que no es una fase, sino una mezcla de fases de ferrita y cementita en placas paralelas (estructura laminar) producida por la descomposición eutectoide de la austenita.

Por otra parte y, además de los aceros al carbono, existen también los aceros aleados, que son aquellos a los que se les añade otros elementos aleantes como el cromo, el molibdeno, el níquel o el vanadio para mejorar las propiedades mecánicas. En función del porcentaje de los elementos añadidos, se encuentran los aceros de baja (por debajo del 5%) y alta aleación (superior al 5%). Entre estos últimos se encuentran los aceros inoxidables.

2.1.1 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables contienen elementos aleantes que impiden manchas, oxidación o corrosión en ambientes en los que los aceros al carbono son susceptibles. Estos también presentan fragilidad por debajo de la temperatura ambiente, mientras que la mayoría de los inoxidables permanecen dúctiles a las temperaturas más bajas. A altas temperaturas, los inoxidables también tienen mejores propiedades mecánicas, conservando así su resistencia y rigidez [7].

La mejora de las propiedades, junto con la facilidad de fabricación, hacen que el acero inoxidable tenga una basta cantidad de aplicaciones, desde utensilios de cocina a aplicaciones espaciales o usos estructurales en ambientes corrosivos. No obstante, deben

usarse de manera eficiente para justificar sus costes más elevados con respecto a otros aceros, tal y como se observa en la Tabla 1:

Tabla 1. Comparación de precios de los aceros [9].

Material	Precio (EUR/kg)
Acero con bajo contenido en carbono	1,09 – 1,2
Acero de medio carbono	1,07 – 1,18
Acero con alto contenido en carbono	1,07 – 1,18
Acero de baja aleación	1,22 – 1,35
Acero inoxidable	3,87 – 4,28

En cuanto a la composición, los aceros necesitan entre un 10 y un 12% de cromo en peso para ser considerados inoxidables, porcentaje al que se forma un óxido superficial que protege la aleación subyacente de hierro-cromo de la corrosión. Para producir este óxido protector, el acero inoxidable debe exponerse a agentes oxidantes.

Existen tres tipos principales de microestructuras de aceros inoxidables: ferrítica, austenítica y martensítica, que pueden categorizarse a su vez en varias clases.

- Aceros inoxidables ferríticos: son aleaciones de hierro-cromo que contienen entre un 12 y un 30% de cromo, de manera que no experimentan transformación de FCC a BCC. Como tienen la misma estructura cristalina, el cromo amplía la región de fase α y suprime la región de fase γ . De esta forma, se enfrían desde altas temperaturas como soluciones sólidas de cromo en hierro α . Además, se denominan ferríticos debido a que su microestructura permanece mayoritariamente ferrítica en condiciones normales de tratamiento térmico.
- Aceros inoxidables martensíticos: son aleaciones de hierro-cromo que contienen entre un 12 y un 17% de cromo con suficiente carbono (entre un 0,15 y un 1,0%) para que pueda producirse una estructura martensítica por temple a partir de la región de la fase austenítica. Como la composición de

estos aceros se ajusta para optimizar la resistencia y la dureza, la resistencia a la corrosión es baja en relación a la de los ferríticos y austeníticos. Además, se denominan martensíticos debido a que son capaces de desarrollar una estructura martensítica tras un tratamiento térmico de austenización y temple.

- Aceros inoxidable austeníticos: son aleaciones de hierro-cromo-níquel que contienen entre un 16 y un 25% de cromo, y entre un 7 y un 20% de níquel. La presencia de níquel, con estructura cristalina FCC, permite conservar esta estructura a temperatura ambiente. Estos aceros tienen mejor resistencia a la corrosión que los ferríticos y martensíticos dado que los carburos pueden ser retenidos en solución sólida por enfriamiento rápido desde altas temperaturas. Además, se denominan austeníticos debido a que su estructura permanece austenítica a todas las temperaturas normales de tratamiento térmico.
- Aceros inoxidable dúplex: son aleaciones que contienen proporciones iguales de austenita y ferrita, a las que se les añade cromo, níquel, molibdeno y nitrógeno como elementos aleantes. Se caracterizan por tener una tenacidad superior a la de los aceros ferríticos y una excelente resistencia a la corrosión.
- Aceros inoxidable endurecibles por precipitación: son aleaciones de hierro-cromo-níquel caracterizadas por la dureza y la alta resistencia mecánica y a la corrosión obtenidas tras aplicarles un tratamiento de envejecimiento. No obstante, no deben exponerse a temperaturas elevadas durante procesos de soldadura puesto que el envejecimiento excesivo de los precipitados puede resultar en una pérdida de resistencia.

De todos ellos, son los aceros inoxidable austeníticos en los que se pondrá el foco, más concretamente en el AISI 316L.

2.1.2 Acero AISI 316L

El acero inoxidable austenítico AISI 316L es el material en el que está centrado este proyecto. Se trata de un acero fuertemente aleado en base cromo-níquel que contiene entre

un 16 y un 18% de cromo, y entre un 10 y un 14% de níquel. Además, y como bien indica su denominación “L” (*low*), su contenido en carbono es muy bajo, del 0,1%, lo que impide la sensibilización a la corrosión del material con su exposición a altas temperaturas, de manera que se previene el precipitado de carburos y se asegura una capa de óxido de cromo uniforme para así evitar zonas sin cubrir en las que pueda darse la oxidación.

En cuanto a sus componentes, el cromo aumenta el límite elástico, la tenacidad, la resistencia a fatiga y la resistencia mecánica a elevadas temperaturas. El níquel, por su parte, es el elemento principal debido a que permite mayores cantidades de cromo en el material y es muy favorecedor de austenita, lo que proporciona buena ductilidad y resistencia a altas temperaturas.

De todas las propiedades mencionadas, son con respecto al límite elástico y la resistencia máxima de las que más resultados se han reportado, como en el artículo de Peng et al [8]. Aquí se muestran resultados del comportamiento del acero 316L fabricado por métodos convencionales en ensayos de tracción y de *Small Punch* para diferentes valores de pre-deformaciones. Por ensayos de tracción se obtuvieron las propiedades mecánicas de la Tabla 2:

Tabla 2. Propiedades mecánicas de probetas pretensadas al 0, 5 y 10% a diferentes temperaturas para ensayos de tracción estándar [10].

Pre-strain	Temperature (K)	$\bar{\sigma}_y$ (MPa), Error (%)	$\bar{\sigma}_{\text{uts}}$ (MPa), Error (%)
0%	Room	338, 2.95	1011, 1.23
	373	314, 1.74	779, 2.28
	473	245, 2.01	667, 0.98
5%	Room	390, 2.68	1029, 1.06
	373	352, 1.93	747, 1.13
	473	341, 2.26	638, 1.42
10%	Room	437, 1.43	1048, 1.04
	373	402, 2.01	760, 2.94
	473	386, 1.14	689, 2.49

Como puede observarse, el material tiene un límite elástico y resistencia máxima mayores a temperatura ambiente que a 100 o 200°C, y si se aplica una tensión previa, aumentan sus propiedades. Esto se debe a que las tensiones aumentan la densidad en las dislocaciones y la aparición de maclas (zonas con orientaciones de átomos diferentes a las demás) que endurecen el material.

Cabe destacar que la publicación también menciona que los materiales ensayados por *Small Punch* presentan una rotura dúctil por la complejidad de la deformación de la superficie durante el ensayo (biaxial, a diferencia del de tracción, que es uniaxial), lo cual será estudiado más adelante.

De esta forma, las buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión hacen que el acero 316L sea uno de los principales aceros utilizados en la industria nuclear.

2.1.3.1 Acero AISI 316L en la industria nuclear

La energía es el desarrollo económico y la prosperidad [9]. La fuente principal de su obtención sigue siendo los combustibles fósiles, aunque la crisis del petróleo de 1973 permitió un cambio en el sistema global de energía. Ello abrió la puerta a otros tipos de energías, las renovables. Desde entonces, se han ido desarrollando energías limpias hasta la actualidad, tanto por las tensiones geopolíticas, como por los graves efectos medioambientales. Sin embargo, estas aún requieren de mucha investigación para ser totalmente accesibles y viables sin depender de las condiciones del entorno. Es aquí donde entra en juego la energía nuclear, que es una fuente de electricidad segura, eficiente, relativamente barata de operar [10], y apenas emite gases de efecto invernadero o contaminantes atmosféricos.

Los materiales utilizados en una central nuclear son fundamentales en la operación de la misma, especialmente en términos de seguridad, sostenibilidad y economía. Esto se debe a que la radiación neutrónica provoca efectos adversos en los materiales por la formación de defectos microestructurales que afectan a la resistencia mecánica y a la resistencia a la corrosión, reduciendo su vida útil en servicio y afectando a la seguridad [11].

Para garantizar una vida de servicio segura, la fabricación de los componentes nucleares se lleva a cabo de acuerdo a códigos y normas de diseño, como el código *ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)* en Estados Unidos, el código *RCC - MR* en Francia o las normas *KTA* en Alemania [12]. En todos ellos se incluye la selección del material y su proceso de fabricación, lo que significa que ha de estar cualificado.

El proceso de cualificación de un material es largo y laborioso, ya que hay que disponer de datos fiables de sus principales propiedades mecánicas (tracción, impacto,

fatiga y tenacidad de fractura principalmente), que vienen determinadas por la microestructura del material dependiente a su vez del proceso de fabricación.

En el caso de un nuevo proceso de fabricación, como lo es la fabricación aditiva, es necesario un profundo conocimiento de esta relación procesado-microestructura-propiedades mecánicas para poder garantizar una reproducibilidad del proceso de fabricación que minimice las variaciones tanto espaciales como entre diferentes coladas en su microestructura con unos valores mínimos en las propiedades mecánicas necesarias en el proceso de diseño del componente.

De ahí que el acero 316L obtenido por estos nuevos métodos de fabricación deba estar acreditado para su uso en la industria nuclear aunque ya se conozca que este mismo acero fabricado por técnicas convencionales es una gran opción por su buena resistencia a la corrosión (debido a los efectos de corrosión bajo tensión y corrosión bajo tensión asistido por irradiación), ductilidad y límite elástico.

Para poder determinar si estas nuevas técnicas de fabricación son una opción viable, es necesario entenderlas, centrando la atención en el método DED (*Directed Energy Deposition*), que es el que ocupa este estudio.

2.2 Fabricación Aditiva (AM)

La fabricación aditiva (o impresión 3D) es un proceso de creación de componentes capa a capa partiendo de un modelo digital (uso de CAD). Los objetos creados mediante esta tecnología pueden ser de distintos materiales, siendo el acero austenítico AISI 316L uno de los más empleados debido a diversos factores, como su resistencia, ductilidad, resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica o velocidad de solidificación. Además, es compatible con distintas técnicas de fabricación aditiva de acuerdo a la norma ISO/ASTM 52900:2021 [13], incluyendo la deposición de energía directa (DED), la fusión por lecho de polvo (PBF) y la tecnología de inyección aglutinante (*Binder Jetting*) [1]. Todas ellas necesitan metal en polvo para su posterior procesamiento, y puede conseguirse mediante la molienda de metal sólido, la precipitación de una sal, la electrodeposición o la atomización de un metal fundido [14], siendo este último uno de los procesos más

utilizados por el buen control que se tiene sobre el tamaño, la forma y la distribución granulométrica de los polvos [15].

Los polvos obtenidos se someten entonces a un proceso de fusión tanto en DED como en PBF muy parecido a la soldadura, en el que se funden polvos capa a capa para conseguir la forma deseada, con la posibilidad de crear diseños complejos y personalizados difícilmente replicables por la fabricación tradicional. *Binder Jetting* es la única técnica en la que no se aplica calor para fundir el polvo, si no un líquido aglutinante capaz de juntar las partículas de polvo necesarias para crear las capas [1].

De esta forma, la fabricación aditiva ha ganado gran popularidad durante los últimos años, también por la reducción de desechos, su rentabilidad y la producción bajo demanda.

El proceso de fusión en fabricación aditiva para la industria nuclear que nos ocupa en este estudio es la deposición de energía directa (DED).

2.2.1 Directed Energy Deposition (DED)

La deposición de energía directa (DED) es definida por el estándar ISO/ASTM 52900:2021 como “proceso de fabricación aditiva en el que se utiliza energía térmica concentrada para fusionar materiales fundiéndolos a medida que se depositan”. Esto significa que los materiales en polvo o alambre metálico son depositados mientras se funden con un láser, haz de electrones o arco de plasma.

En el caso de los materiales en polvo, la técnica más conocida es la denominada “*Laser Engineered Net Shaping*” (LENS), mientras que en el otro, se utilizan las técnicas derivadas de las soldaduras, como la “*Direct Metal Deposition*” (DMD). Ambas formas tienen un proceso de deposición similar, en el que se usa una gran cantidad de energía en el elemento que funde y esta se focaliza en el sustrato, que es la plataforma de fabricación o la última capa fabricada. Toda esta energía forma la piscina de fundido, de manera que se va fundiendo todo el material introducido [5]. A medida que avanza la fuente de energía (usualmente en el eje Z), el material va solidificando y formando la capa correspondiente [16].

Aun con las similitudes en la deposición de materiales en polvo y alambre metálico, existen diferencias, siendo la principal la conservación del material previa a su fundición. Para los polvos, se emplean aspiradores o cámaras con entorno controlado, y para los alambres, gases inertes con cubierta para prevenir la oxidación en su etapa de fundido.

En la Figura 2 puede observarse el proceso de deposición de energía directa de material en polvo por láser.

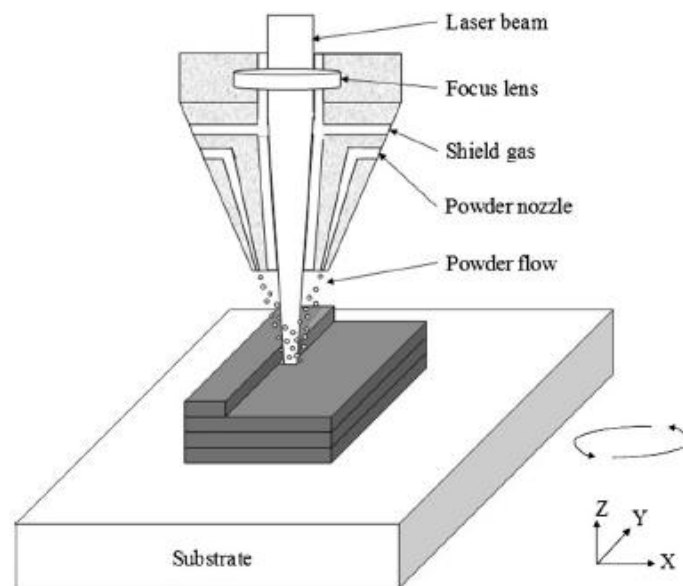


Figura 2. Proceso L-DED (LENS) [17].

No obstante y, además de este proceso, también se encuentra la fusión por leche de polvo (PBF) y la tecnología de inyección aglutinante (*Binder Jetting*) previamente mencionados. Sin embargo, la ventaja de usar la deposición directa de polvos (DED) está en la producción de mayores componentes o la reparación de piezas ya existentes, pero también existen desventajas como la necesidad de aplicar procesos posteriores a la fabricación o una menor precisión [18].

El uso de todas estas técnicas ofrece avances significativos, aunque aún no se comprenden completamente las relaciones fundamentales entre el procesamiento, la microestructura y las propiedades debido a la complejidad de los procesos.

La complejidad radica en la velocidad de calentamiento, fusión y solidificación producida por una fuente en movimiento como el láser, que afecta a diferentes regiones que se someten a repetidos ciclos de calentamiento y enfriamiento. Las consecuencias directas de estos gradientes térmicos son la anisotropía en la microestructura y las

propiedades (de ahí la necesidad de estudiar la historia térmica), y la formación de tensiones residuales que pueden conducir a la deformación de la pieza, pérdida de tolerancias o, incluso, delaminación. Estos factores hacen necesaria la caracterización mecánica de las piezas producidas por fabricación aditiva, siendo especialmente importante si su posterior uso es nuclear.

2.2.2 Procesos de cualificación

Existen numerosas técnicas de caracterización de materiales ya estandarizadas, como el ensayo de tracción, de fluencia, de fatiga o de flexión. Sin embargo, la mayoría de estos ensayos no permiten la determinación de propiedades en diferentes zonas de una pieza o no consideran la anisotropía, debido principalmente a las dimensiones de las probetas utilizadas. De ahí que los ensayos basados en probetas en miniatura representen un método muy útil para la caracterización mecánica de componentes en servicio o muy costosos, pero también para evaluar componentes con propiedades muy variables y dependientes de la ubicación.

Las pequeñas dimensiones de las probetas permiten extraer muestras de varios lugares y orientaciones, como es el caso del ensayo miniatura de punzonamiento (*Small Punch Test*, SPT), que también se utiliza para la investigación de diferentes zonas en soldaduras o en la caracterización de materiales irradiados, donde las pequeñas muestras minimizan la exposición del personal de laboratorio a la irradiación.

2.3 Ensayo de Small Punch (SPT)

El ensayo de *Small Punch* es un método de caracterización de materiales que surgió de la necesidad de estudiar las propiedades de los materiales de las centrales nucleares y su desgaste frente a la irradiación debido al aumento de estas centrales a partir de la mitad del siglo XX.

El interés alrededor de este ensayo radica en la pequeña cantidad de material empleada que permite considerarlo no destructivo. Esto permite:

- Caracterizar materiales escasos.
- Reutilizar materiales previamente ensayados.
- Estudiar materiales irradiados.
- Estudiar zonas específicas y localizadas.
- Estudiar la anisotropía de los materiales.

De esta forma, el ensayo de *Small Punch* permite realizar un análisis de la variabilidad de una placa de 316L fabricada por DED con un prospecto de uso nuclear.

2.3.1 Procedimiento de ensayo

El ensayo de *Small Punch* consiste en el punzonado hasta rotura de un disco pequeño con una cabeza esférica o bola a una velocidad constante. Este punzón debe actuar de manera perpendicular al disco, que descansa a su vez sobre una matriz inferior y es sujeta por una matriz superior, de manera que las zonas de la superficie exterior quedan fijas y el punzón incide en el centro. Las medidas del punzón y matrices vienen dadas por la norma EN 10371:2021 [3], en la que también se recogen y establecen los procedimientos de ensayo y los datos a recopilar a posteriori.

El sistema del ensayo queda reflejado en la Figura 3:

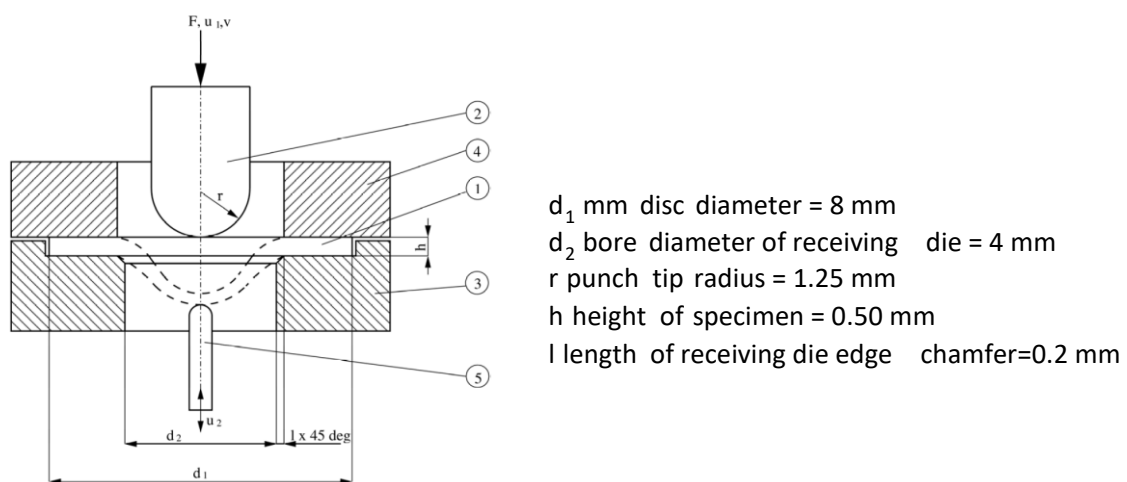


Figura 3. Esquema de la sección transversal del aparato de ensayo [3].

En cuanto a las probetas, estas deben ser de 8 mm de diámetro y 0,5 mm de espesor. También deben tener una superficie con una rugosidad inferior a 25 μm , que se consigue haciendo un desbaste final con una lija P1200 tal y como indica la norma.

Una vez pulidos, los discos pueden someterse al ensayo, en el que un bastidor de carga controla el desplazamiento del punzón en la muestra y mide la fuerza. Así, los resultados del ensayo pueden estudiarse con una curva de fuerza-desplazamiento ($F(v)$) o con una curva de fuerza-deflexión ($F(u)$) dependiendo del utillaje empleado.

2.3.2 Curva Fuerza – Desplazamiento ($F(v)$)

La Figura 4 muestra una curva fuerza-desplazamiento típica obtenida con el ensayo de *Small Punch*:

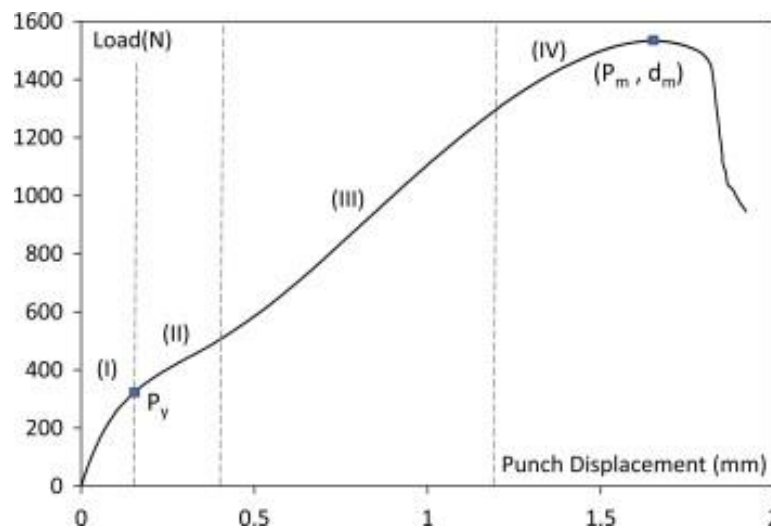


Figura 4. Curva fuerza-desplazamiento típica del SPT [21].

Como puede observarse, se diferencian cuatro zonas:

- Zona I: comportamiento elástico debido al punzonado de la probeta a velocidad constante (*Elastic Bending*).
- Zona II: punto a partir del cual la probeta comienza a sufrir deformaciones plásticas por el punzonado (*Plastic Bending*).
- Zona III: región en la que se produce adelgazamiento de probeta y se dan mayores deformaciones.
- Zona IV: continuación del tramo anterior, donde se aproxima a la carga máxima y se produce la inestabilidad del material. Alcanzada la carga máxima, se produce la rotura del material.

2.3.3 Curva Fuerza – Deflexión ($F(u)$)

Como se ha mencionado anteriormente y, en función del utillaje empleado, los resultados del ensayo pueden estudiarse con una curva de fuerza-desplazamiento ($F(v)$) o de fuerza-deflexión ($F(u)$), siendo esta última la más usada. Por ello, cabe destacar que la deflexión es la distancia que se ha desplazado el punto céntrico de la cara opuesta de la probeta al punto de contacto entre el punzón y la probeta [3]. Para medirla, se emplea un actuador o extensómetro. En este caso, se llama LVDT, ya que es este sensor el utilizado.

En la Figura 5 puede observarse la relación entre el desplazamiento y la deflexión:

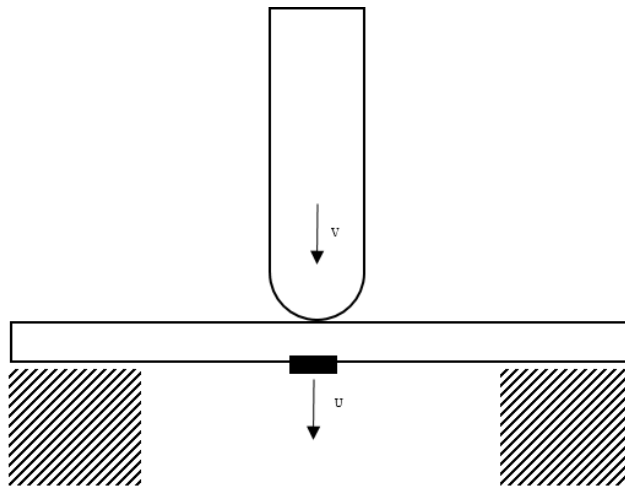


Figura 5. Esquema de la relación entre desplazamiento y deflexión.

Con V el desplazamiento axial y U el extensómetro axial.

2.3.4 Determinación de propiedades mecánicas

El objetivo del proyecto es el análisis de la variabilidad de una placa mediante este ensayo, para lo que es necesario conocer los parámetros de la curva de fuerza-deflexión con los que se hacen los cálculos de las propiedades mecánicas:

- F_e [N]: fuerza de transición elástico-plástica de la que puede estimarse el límite elástico (R_p) a través del espesor de la probeta.

- F_m [N]: fuerza máxima durante el ensayo que puede obtenerse directamente como la fuerza máxima medida durante el ensayo.
- F_i o F_{II-III} [N]: fuerza de inestabilidad plástica entre las zonas II y III.
- h_0 [mm]: grosor inicial de la probeta.
- u_e [mm]: deflexión correspondiente a F_e .
- u_m [mm]: deflexión correspondiente a F_m .
- u_i [mm]: deflexión correspondiente a F_i , normalmente la zona de transición entre las zonas II y III.

En cuanto a las fuerzas, F_m y F_i son parámetros conocidos por la propia curva, pero F_e debe ser calculada. Existen dos métodos para ello: el método bilineal (2 tangentes) y el trilineal (3 tangentes) en función de si se tiene deflexión (u) o desplazamiento (v) respectivamente. En este caso se utilizará el método bilineal para el cálculo de la fuerza y del límite elástico.

El método bilineal es empleado cuando se tiene deflexión (u). Se obtiene F_e como la fuerza f_A ajustando una función bilineal $f(u)$ desde el origen de la curva y a través de los puntos A y B de la Figura 6 según las ecuaciones (2.1) y (2.2) con f_B como la fuerza correspondiente para una deflexión $u_B = 0,5$ mm:

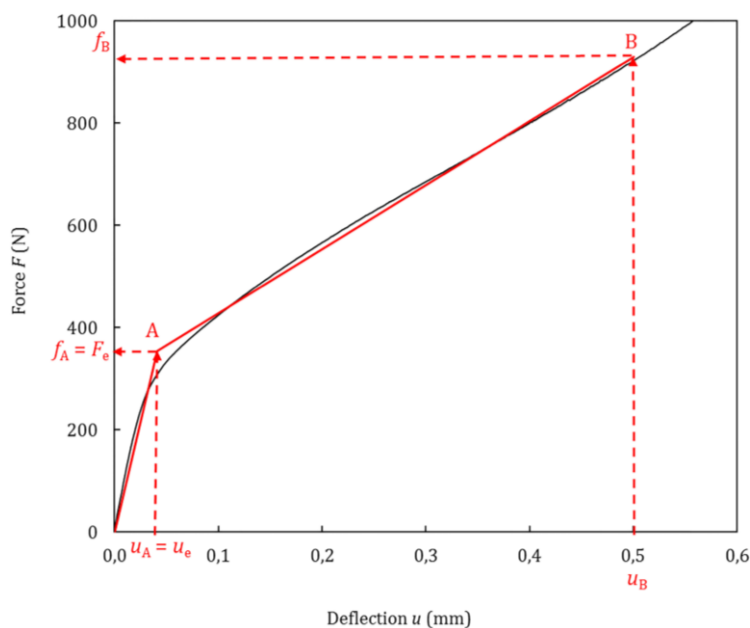


Figura 6. Método bilineal para el cálculo de F_e [3].

$$f(u) = \begin{cases} \frac{f_A}{u_A} u & \text{for } 0 \leq u \leq u_A & (2.1) \\ \frac{f_B - f_A}{u_B - u_A} (u - u_A) + f_A & \text{for } u_A \leq u \leq u_B & (2.2) \end{cases}$$

Esta función bilineal puede ajustarse variando los parámetros f_A , f_B y u_A , y minimizando el error con la ecuación (2.3):

$$\text{err} = \int_0^{u_B} [F(u) - f(u)]^2 du \quad (2.3)$$

Una vez conocidos los parámetros y procedimientos de cálculo de las variables, se indican las ecuaciones de cálculo de las propiedades mecánicas importantes:

- Tensión máxima $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$: se calcula con la ecuación (2.4) y establece una correlación entre R_m , que es conocida por otros ensayos, y la tensión máxima obtenida en el ensayo de *Small Punch*, que es el término que acompaña al coeficiente beta.

$$R_m = \beta_{Rm} \cdot \frac{F_m}{h_0 \cdot u_m} \quad (2.4)$$

- Límite elástico (YTS) $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$: se calcula con la ecuación (2.5) y la norma establece su cálculo con F_e y el espesor inicial, ya que la muestra no ha comenzado su fase plástica y sigue manteniendo h_0 .

$$R_{p0,2} = \beta_{Rp0,2} \cdot \frac{F_e}{h_0^2} \quad (2.5)$$

- Energía de ensayo $[J]$: se calcula con la ecuación (2.6) y es el área encerrada bajo la curva $F(u)$ como puede observarse en la Figura 7. Esta permite determinar qué material tendrá mejor comportamiento en términos de resistencia y elongación y la energía de *Small Punch* será la energía absorbida por el material durante el ensayo.

$$E_{SP} = \int_{u=0}^{um} F(u) du \approx \sum_{k=2}^{k \max} 0.5 (F_k + F_{k-1}) (u_k - u_{k-1}) \quad (2.6)$$

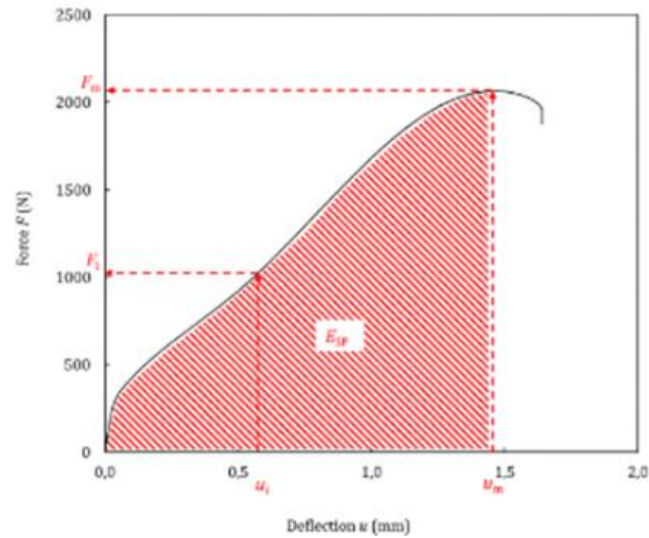


Figura 7. Curva fuerza-deflexión ($F(u)$) con los parámetros característicos.

Por último, cabe destacar que este ensayo es propuesto para aliviar el tiempo y el coste asociado con la optimización de las propiedades del material debido a un diseño simplificado de la pieza y el experimento. Por esta razón, el estado tensional inducido durante el ensayo es más complejo que en los ensayos convencionales.

Como la normativa contempla el mecanizado de probetas en las tres dimensiones del espacio, en cualquier zona localizada de una pieza o probeta de mayor tamaño, puede estudiarse la anisotropía, historia térmica o tensiones residuales con el uso de técnicas más complejas de análisis de datos para determinar las propiedades del material.

3 Materiales y Métodos

3.1 Placa de 316L fabricada por DED

En este estudio se han utilizado tres placas de acero inoxidable austenítico 316L fabricadas por DED (*Directed Energy Deposition*). Las placas fueron fabricadas y proporcionadas por AIMEN, Centro de Innovación y Tecnología con el que el CIEMAT colabora.

La tecnología y condiciones de fabricación avanzada fueron las mismas para las tres placas con el uso de un haz láser y polvo metálico. En la Figura 8 se muestra una fotografía de la máquina de fabricación y, en la Figura 9, las dimensiones de las placas fabricadas. En la Tabla 3 se indican las especificaciones de fabricación dadas por AIMEN.



Figura 8. Máquina de fabricación de las placas.

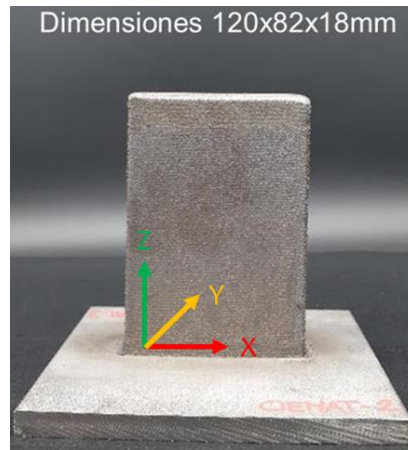


Figura 9. Dimensiones de las placas fabricadas por AIMEN con las direcciones espaciales X, Y, Z.

Tabla 3. Condiciones de fabricación de las placas proporcionadas por AIMEN.

Láser	Trudisk 15 kW
Polvo	DED-LB
Cabezal	BEO D70
Alimentador de polvo	GTV
Boquilla	COAX8 (FHG-IWS)
Diámetro del haz	2 mm
Distancia focal láser	12,5 mm
Potencia	800 W
Velocidad	$8 \frac{mm}{s}$
Caudal Ar	Protección: $6 \frac{L}{min}$ Arrastre: $5 \frac{L}{min}$
Caudal de polvo	$8 \frac{g}{min}$

3.1.1 Estrategia de fabricación

Las paredes de las placas se fabrican en zigzag en dos fases. Esto se debe a que hay una parada en mitad del proceso para rellenar la tolva de polvo. Las paredes están formadas por 14 cordones en zigzag y un total de 160 capas tal y como indica AIMEN.

En la Figura 10 puede observarse la estrategia de fabricación de las paredes y, en la Figura 11, un esquema de la fabricación de las paredes:

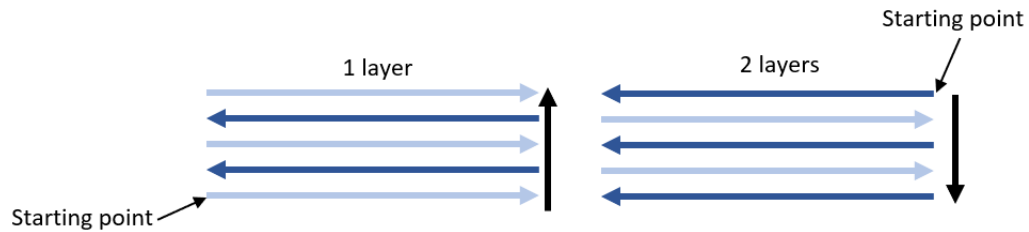


Figura 10. Estrategia de fabricación de las paredes.

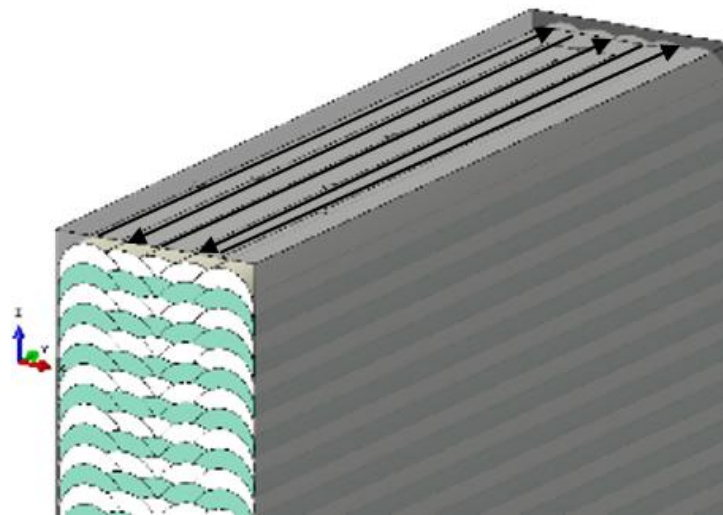


Figura 11. Esquema de fabricación de las paredes.

Adicionalmente, cabe destacar que las placas tienen el acabado de la fabricación aditiva con un amolado posterior a la fabricación por una de las caras. De esta forma, la placa está pulida por esta cara y por la otra tiene una textura rugosa.

3.2 Ensayo de Small Punch (SPT)

Una vez fabricados los discos puede entonces procederse al estudio de la variabilidad de la propiedades mecánicas de las placas. En este proyecto, la variabilidad se estudia en las tres direcciones espaciales mediante el ensayo de discos mecanizados en varias coordenadas de las placas con el SPT (*Small Punch Test*).

3.2.1 Planos de mecanizado

La fabricación de los discos de *Small Punch* se lleva a cabo de acuerdo a los siguientes planos de mecanizado proporcionados por el CIEMAT.

El objetivo es mecanizar en cada coordenada (X, Z) cilindros de los que posteriormente se mecanizarán discos de 8 mm de diámetro y 0,5 mm de espesor en la placa 1 en orientación X (Figura 12), en la placa 2 en orientación Y (Figura 13) y en la placa 3 en orientación Z (Figura 14).

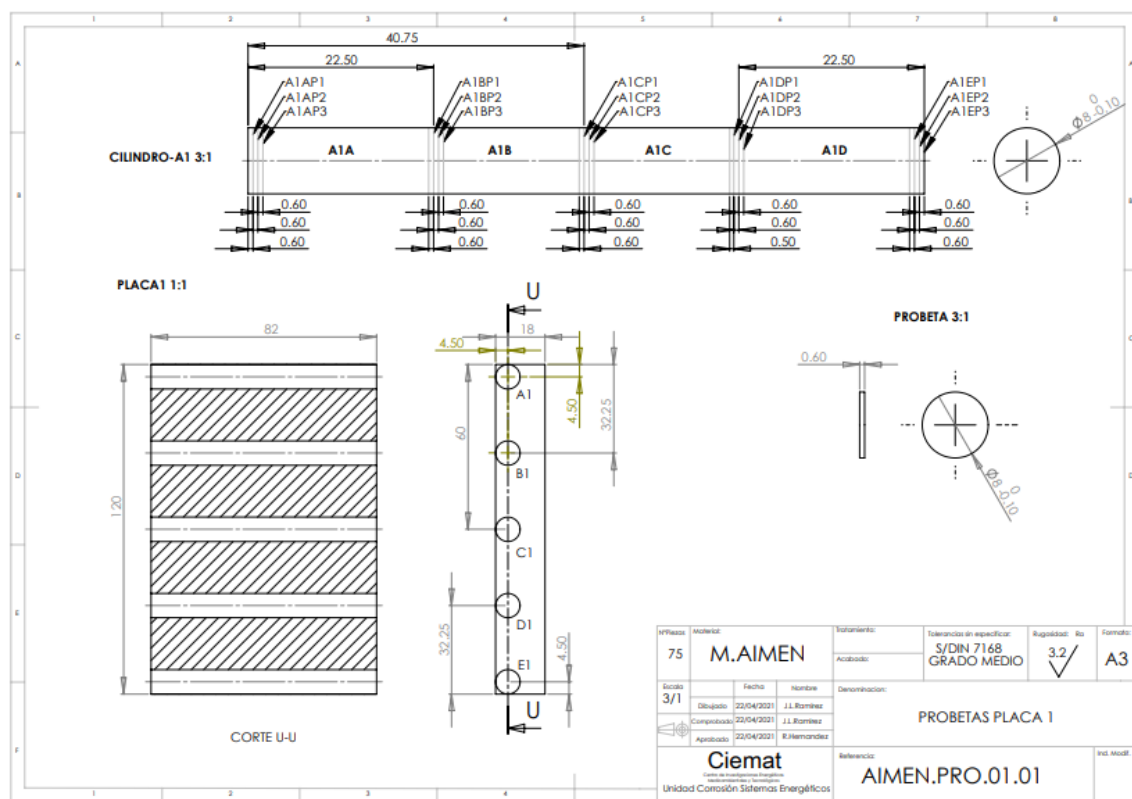


Figura 12. Plano de mecanizado de la Placa 1.

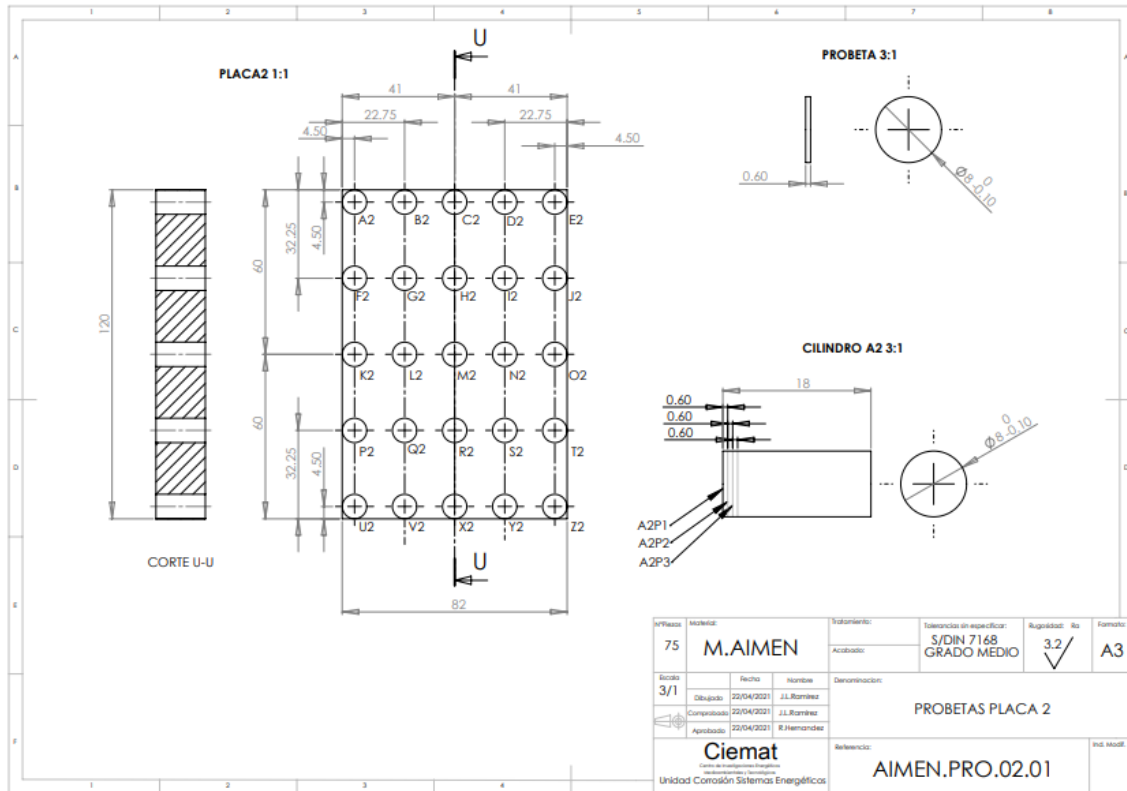


Figura 13. Plano de mecanizado de la Placa 2.

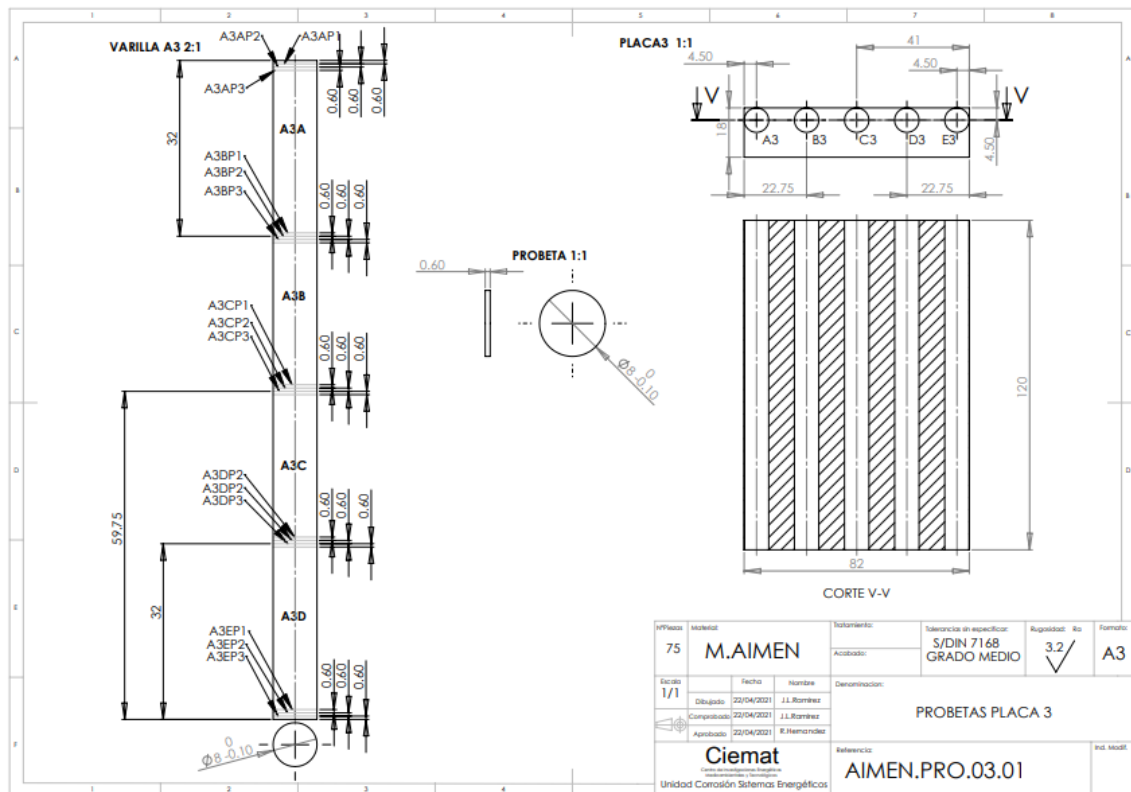


Figura 14. Plano de mecanizado de la Placa 3.

3.2.2 Preparación de muestras

Las muestras necesarias en este ensayo son discos de 8 mm de diámetro y 0,5 mm de espesor pulidos con acabado metalográfico de lijas y paños hasta P1200 de acuerdo a la norma EN 10371:2021. Estos discos son proporcionales y cumplen las normas ASTM E8 [20] y UNE- EN ISO 6892-1:2020 [21]. Además, son obtenidos a partir de cilindros mecanizados en varias coordenadas de las posiciones X y Z de las placas, tal y como puede observarse en la Figura 15:

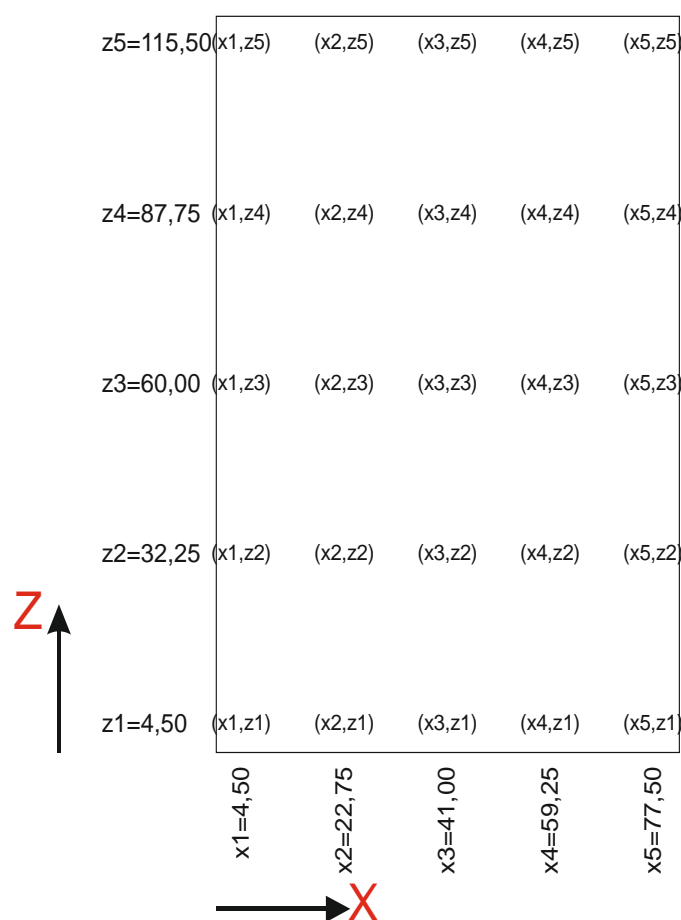


Figura 15. Posición de las muestras en las tres placas.

La posición de mecanizado de los cilindros para la obtención de los discos es la misma para las tres placas. La diferencia es la orientación a la que se han mecanizado: en X para las muestras de la placa 1, en Y para las muestras de la placa 2 y en Z para las muestras de la placa 3. Esto puede verse representado en (a), (b) y (c) de la Figura 16 respectivamente. Hay que destacar que, por un error de mecanizado, en la placa 2 no se han podido obtener discos en la coordenada z_5 .

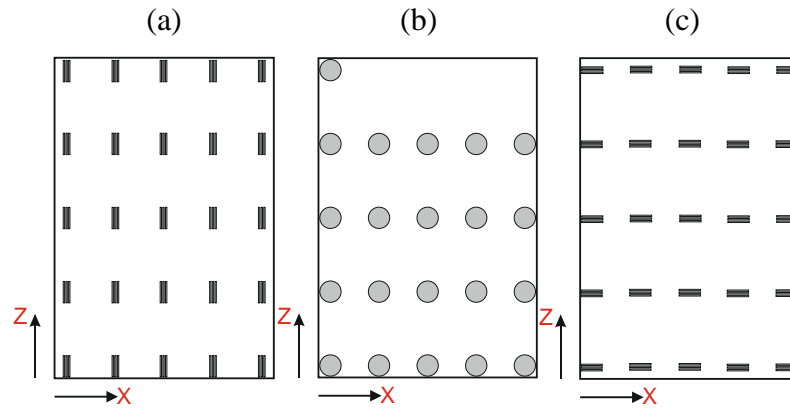


Figura 16. Orientación de mecanizado de los cilindros, (a) Placa 1 en X; (b) Placa 2 en Y; (c) Placa 3 en Z.

Cabe destacar que los cilindros y discos se han cortado por electroerosión, que es un proceso basado en la energía termoeléctrica creada entre una pieza y un electrodo sumergido en un fluido dieléctrico. Cuando la pieza y el electrodo están separados por un pequeño espacio específico denominado espacio de chispa, se produce una descarga pulsada que elimina material de la pieza mediante fusión y evaporación [22].

Una vez obtenidas, las muestras empleadas para la realización del ensayo de *Small Punch* se han pulido con acabado metalográfico de lijas y paños hasta P1200 como se muestra en la Figura 17:

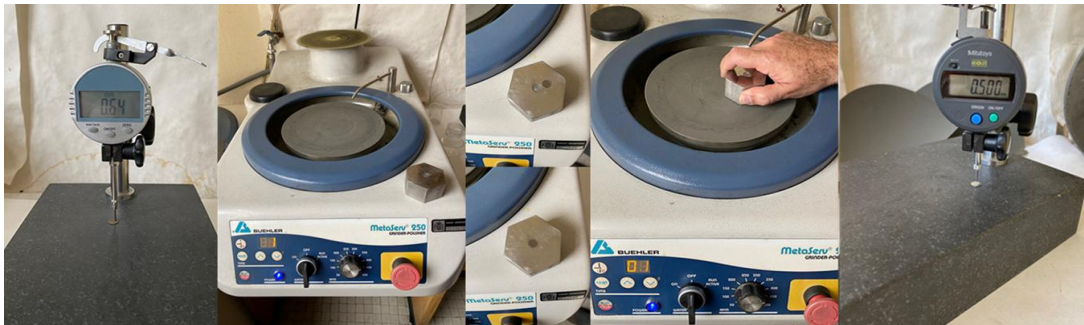


Figura 17. Pulido con acabado metalográfico de lijas y paños hasta P1200.

Los técnicos de laboratorio del CIEMAT ensayaron 76 probetas de la placa 1, 85 de la placa 2 y 79 de la placa 3, haciéndose un total de 240 probetas. Por ello, resulta necesaria una explicación de la nomenclatura de las probetas.

3.2.2.1 Nomenclatura de las muestras

Placa 1

Se han extraído 5 cilindros, que se nombran con letras seguidas del número de la placa: A1, B1, C1, D1 y E1. De cada uno de estos cilindros se extraen a su vez discos, que se nombran de la siguiente manera y como puede observarse en (a) de la Tabla 4:

- Cilindro A1: se han extraído 5 discos, nombrados A1A, A1B, A1C, A1D, A1E.
- Cilindro B1: se han extraído 5 discos, nombrados B1A, B1B, B1C, B1D, B1E.
- Cilindro C1: se han extraído 5 discos, nombrados C1A, C1B, C1C, C1D, C1E.
- Cilindro D1: se han extraído 4 discos, nombrados D1A, D1B, D1C, D1D.
- Cilindro E1. Se han extraído 5 discos, nombrados E1A, E1B, E1C, E1D, E1E.

Placa 2

Se han extraído 21 cilindros, que se nombran con letras seguidas del número de la placa. En este caso, de la A a la E en la primera fila empezando desde la base de la placa; de la F a la J en la segunda; de la K a la O en la tercera; de la P a la T en la cuarta y de la U a la Z en la última, todas ellas seguidas del número 2. Además, debe destacarse que los cilindros B2, C2, D2 y E2 no existen, pero del resto de ellos se extraen entre 3 y 5 discos.

Todo ello puede observarse en (b) de la Tabla 4 y en (b) de la Figura 16.

Placa 3

Se han extraído 5 cilindros, que se nombran con letras seguidas del número de la placa: A3, B3, C3, D3 y E3. De cada uno de estos cilindros se extraen a su vez discos, que se nombran de la siguiente manera y como puede observarse en (c) de la Tabla 4:

- Varilla A3: se han extraído 5 discos, nombrados A3A, A3B, A3C, A3D y A3E.

De los cilindros B3 al E3, también se han extraído 5 discos de cada una, nombrados siguiendo la misma metodología.

Tabla 4. Nomenclatura de las muestras de cada placa, (a) Placa 1; (b) Placa 2; (c) Placa 3.

(a)				(b)				(c)						
Plate	Cylinder	Orientation	X position	Z position	Plate	Cylinder	Orientation	X position	Z position	Plate	Cylinder	Orientation	X position	Z position
1	A1A	X	X1	Z5	2	A2	Y	X1	Z5	3	A3A	Z	X1	Z5
1	A1B	X	X2		2	B2	Y			3	A3B	Z		Z4
1	A1C	X	X3		2	C2	Y			3	A3C	Z		Z3
1	A1D	X	X4		2	D2	Y			3	A3D	Z		Z2
1	A1E	X	X5		2	E2	Y			3	A3E	Z		Z1
1	B1A	X	X1	Z4	2	F2	Y	X1	Z4	3	B3A	Z	X2	Z5
1	B1B	X	X2		2	G2	Y	X2		3	B3B	Z		Z4
1	B1C	X	X3		2	H2	Y	X3		3	B3C	Z		Z3
1	B1D	X	X4		2	I2	Y	X4		3	B3D	Z		Z2
1	B1E	X	X5		2	J2	Y	X5		3	B3E	Z		Z1
1	C1A	X	X1	Z3	2	K2	Y	X1	Z3	3	C3A	Z	X3	Z5
1	C1B	X	X2		2	L2	Y	X2		3	C3B	Z		Z4
1	C1C	X	X3		2	M2	Y	X3		3	C3C	Z		Z3
1	C1D	X	X4		2	N2	Y	X4		3	C3D	Z		Z2
1	C1E	X	X5		2	O2	Y	X5		3	C3E	Z		Z1
1	D1A	X	X1	Z2	2	P2	Y	X1	Z2	3	D3A	Z	X4	Z5
1	D1B	X	X2		2	Q2	Y	X2		3	D3B	Z		Z4
1	D1C	X	X3		2	R2	Y	X3		3	D3C	Z		Z3
1	D1D	X	X4		2	S2	Y	X4		3	D3D	Z		Z2
1	D1E	X	X5		2	T2	Y	X5		3	D3E	Z		Z1
1	E1A	X	X1	Z1	2	U2	Y	X1	Z1	3	E3A	Z	X5	Z5
1	E1B	X	X2		2	V2	Y	X2		3	E3B	Z		Z4
1	E1C	X	X3		2	X2	Y	X3		3	E3C	Z		Z3
1	E1D	X	X4		2	Y2	Y	X4		3	E3D	Z		Z2
1	E1E	X	X5		2	Z2	Y	X5		3	E3E	Z		Z1

3.2.3 Procedimiento de ensayo

La obtención y clasificación de las muestras permite entonces el uso del ensayo de *Small Punch* para estudiar las propiedades mecánicas. El ensayo de las probetas se realiza en la máquina de ensayos del CIEMAT, que puede observarse en la Figura 18:



Figura 18. Equipo de ensayos de *Small Punch* del CIEMAT.

Esta máquina consta de dos cámaras que cubren el porta-probetas, y permiten que los ensayos puedan realizarse a temperaturas determinadas. Este es el caso, ya que los ensayos de las probetas de este proyecto se realizaron a una temperatura de 20°C para las placas 1 y 3, y a 23°C para la placa 2. Aunque esta diferencia de temperatura de ensayo no se considera relevante, es preferible reportarla siguiendo las buenas prácticas de laboratorio.

Encima de la cámara se encuentra la célula de carga, que está en contacto con el punzón y es la que transmite la carga y recoge las medidas. En la parte inferior se encuentra el dispositivo de medición del desplazamiento, el sensor LDVT en este caso, que puede observarse en la Figura 19 y que mide la deflexión (u) de la probeta.

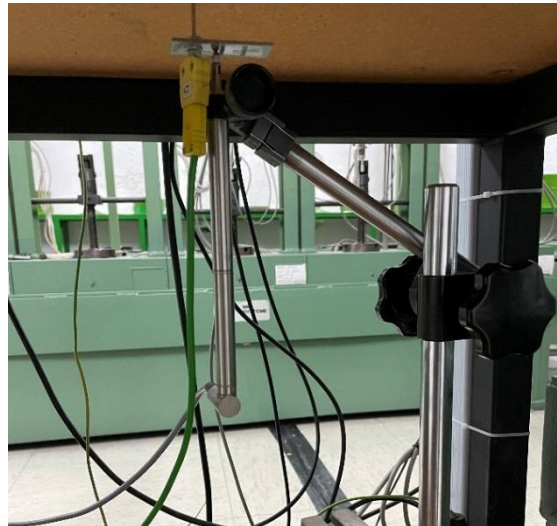


Figura 19. Sensor LDVT en el equipo de ensayos.

Esto permite la recopilación de los datos de deflexión, pudiendo generarse la curva de fuerza-deflexión correspondiente al ensayo de *Small Punch*.

Por último, puede observarse el panel de control en la Figura 20. Este constituye el *software* en el que se establecen los valores de posición de las piezas superiores y la velocidad de toma de las muestras. Además, pueden verse las fuerzas aplicadas y las posiciones iniciales y finales de las piezas.



Figura 20. Panel de control de la máquina de ensayos.

La circunferencia negra marca la posición inicial asignada por el técnico de laboratorio, la roja marca la carga medida por la célula de carga y la amarilla marca la posición real de la mordaza superior. Con esto, puede entonces pasarse al siguiente panel de control, que dibuja los datos recopilados en la curva fuerza-desplazamiento (gráfica de la izquierda) y en la curva fuerza-deflexión (gráfica de la derecha) mediante el sensor LDVT. Puede observarse en la Figura 21:

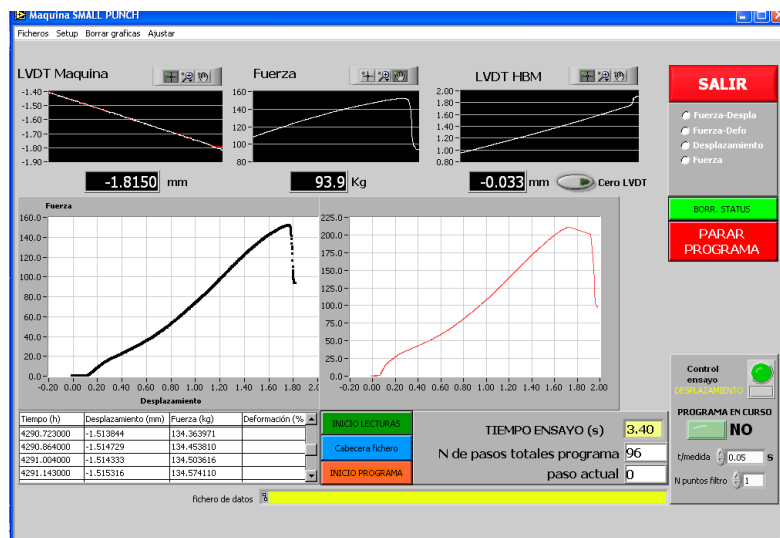


Figura 21. Panel de control del ensayo.

Los datos obtenidos son entonces procesados para calcular los parámetros de interés.

3.2.4 Procesamiento de datos de ensayo

Para los 240 discos ensayados se determinan los valores característicos de fuerza F_e y F_m , así como la deflexión del disco en carga máxima, u_m , y la energía bajo la curva E_{SP} , tal y como se describe en la norma EN 10371. Los datos de fuerza se normalizan con el espesor del disco, h , puesto que este valor es el que se correlaciona con el límite elástico y la resistencia de rotura.

Para la determinación del valor de F_e es necesario ajustar la función bilineal $f(u)$ mencionada anteriormente según las ecuaciones (2.1) y (2.2). Esta función se ajusta a la curva experimental variando los valores de f_A , f_B y u_A minimizando el error para un valor de $u_B = 0,5$ según la ecuación (2.3).

El ajuste de la función se realiza con una rutina de *Visual Basic* desarrollada en el CIEMAT, en la que, después de un primer procesado de los datos obtenidos en el ensayo, pasan otro procesado como se muestra en la Figura 22:

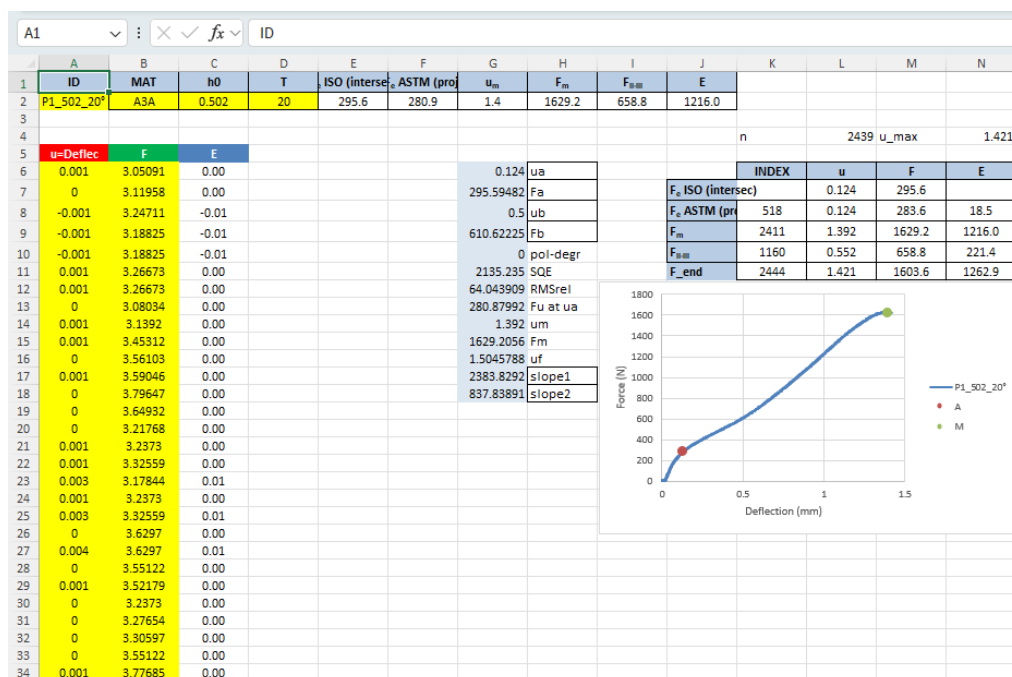


Figura 22. Rutina de *Visual Basic* desarrollada en el CIEMAT.

Las columnas en amarillo son las que han de rellenarse y se corresponden con:

- ID: identificador de la muestra.
- Material: disco ensayado.
- h_0 : espesor inicial de la probeta (0,5 mm).
- T: temperatura de ensayo.

Estos cuatro parámetros son dados previos a ensayo, mientras que la fuerza y deflexión son los que se obtienen. Estos datos pasan un primer procesado y después se incluyen en las respectivas columnas, pudiendo calcular los parámetros siguientes:

- F_e ISO (intersec): fuerza de límite elástico, calculada por intersección de dos rectas tangentes a la curva.
- F_e ASTM (proj): proyección de la F_e ISO verticalmente hasta la curva (normalmente se establece fuera de la curva). Es la fuerza de transición elástico-plástica.
- E_{SP} : energía de ensayo de *Small Punch*.

En el caso de la fuerza y deflexión máximas, y la fuerza de transición entre las zonas II-III, pueden obtenerse directamente desde la curva del ensayo.

- u_m : deflexión máxima de la probeta, hace referencia a la deflexión cuando se llega a fuerza máxima.
- F_m : fuerza máxima de ensayo.
- F_{II-III} : fuerza de inestabilidad plástica entre las zonas II y III.

En cada coordenada (X, Z) se han ensayado un mínimo de tres discos, con lo que se calcula entonces un valor medio de los parámetros de SPT en cada posición y su error asociado. Hay que destacar que, por un error de mecanizado, en la placa 2 no se han podido obtener discos en la coordenada z5.

Tras la realización de los ensayos, y la recopilación y procesamiento de datos, se ha utilizado la microscopía electrónica de barrido (SEM) para apoyar el análisis de datos en fractografías realizadas por esta tecnología. De esta forma puede verse la microestructura del material en las zonas de fractura con gran precisión.

Al final del documento se incluyen tres ejemplos de archivos generados mediante este método, con el cálculo de F_e , F_{II-III} y F_m , las curvas características y la fractografías de los discos asociados.

3.2.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM) permite estudiar muestras con muy alta resolución, pudiendo verse la microestructura, las fracturas y los defectos del material. La diferencia con otras técnicas es que SEM no utiliza un haz de luz para formar una imagen, si no un haz de electrones, que debe incidir perpendicularmente a la muestra. Para ello, es necesario su guiado mediante lentes. Adicionalmente, las muestras deben prepararse sobre un fondo negro que evite el reflejo para poder verlas con nitidez.

El equipo utilizado ha sido el HITACHI SU6600 que puede observarse en la Figura 23:



Figura 23. Equipo SEM HITACHI SU6600 [25].

Además de esta técnica de apoyo en el análisis de datos, también se han llevado a cabo medidas de tensiones residuales, que tienen un gran interés en el estudio de piezas fabricadas por estos métodos avanzados.

3.3 Medida de Tensiones Residuales

Las tensiones residuales, según la norma EN 15305:2008 [19], son las tensiones internas auto-equilibrantes que existen en un cuerpo libre que no tiene fuerzas externas o

restricciones que actúan sobre su contorno. Pueden originarse en procesos de fabricación y condiciones de servicio que den lugar a deformaciones no uniformes.

Las tensiones aplicadas suelen ser conocidas, no como las residuales. Esto provoca un factor de indeterminación de las tensiones a las que está sometido un determinado componente y, por tanto, un condicionamiento a su durabilidad [23]. Por ello, se hace necesario determinar estas tensiones, también por el interés de emplear este material en la industria nuclear.

La medida de estas tensiones puede realizarse en una región cercana a la superficie y de forma no destructiva mediante el análisis por difracción de rayos X. En este caso, las medidas han sido realizadas en el Laboratorio de Medida de Tensiones Residuales (LMTR) perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid por Daniel Pérez Gallego. El laboratorio se encuentra acreditado por ENAC como laboratorio de ensayos (1308/LE2435), y el equipo que se ha empleado es el difractómetro *X-Raybot*.

Para poder entender la técnica de medición es importante conocer la nomenclatura entorno al ensayo.

3.3.1 Símbolos y abreviaturas

- 2θ , ángulo de difracción: es el ángulo entre los haces incidente y difractado de rayos X.
- θ , ángulo de Bragg: es el ángulo entre los planos reticulares de difracción y el haz incidente.
- Φ : ángulo entre una dirección fija en el plano de la probeta y la proyección en ese plano de los planos reticulares al difractado.
- Ψ : ángulo entre la perpendicular a la probeta y la perpendicular a los planos reticulares de difracción.
- d : distancia interplanar.
- XECs: constantes de elasticidad de los rayos X.

3.3.2 Preparación de la probeta

La probeta utilizada en este ensayo es la placa 2 (orientación Y) tras el mecanizado de los discos empleados en el ensayo de *Small Punch*, y puede observarse en la Figura 24:



Figura 24. Probeta de ensayo de tensiones residuales.

Como se ha mencionado anteriormente, una de las caras de las placas tiene el acabado realizado con un amolado posterior a la fabricación. La aplicación de este pulido para eliminar las capas superficiales engendra tensiones residuales que alteran el campo de tensiones de la superficie. Por ello y, para poder medir las tensiones residuales, es necesario eliminar capas del material sin introducir nuevas tensiones en la superficie.

En este caso, se emplea el pulido electrolítico para hacer medidas en capas subsuperficiales y así eliminar los efectos del mecanizado, ya que provoca la relajación de las tensiones residuales.

3.3.3 Procedimiento de ensayo

La medición de tensiones residuales se lleva a cabo en el punto marcado de la Figura 24 (puede verse un aumento en la Figura 25) por el difractor *X-Raybot* de la Figura 26. En la Tabla 5 se muestran los parámetros de las medidas.



Figura 25. Punto de medida de tensiones residuales.

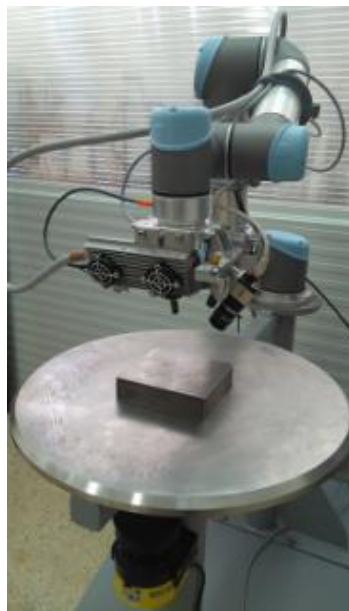


Figura 26. Difractómetro X-Raybot.

Tabla 5. Parámetros de ensayo de tensiones residuales.

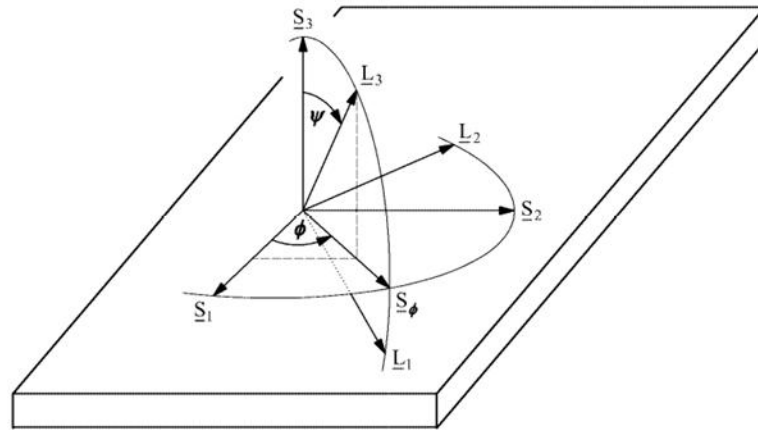
Material	Fe Gamma
Familia de planos	{311}
Ángulo de difracción 2θ	152°
Radiación	Mn α : 2.103Å
Colimador	$\phi=2\text{mm}$

Tiempo de exposición	20s
ϕ	[0°,45°,90°]
ψ	x13 [-40° hasta 40°]
XEC	$\frac{1}{2}S_2=6.98 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ $-S_1=1.87 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$
Corrección LPA	Sí
Ajuste de 2θ	PseudoVoigt

Existen distintos métodos para llevar a cabo las mediciones, pero en este caso se realiza un ensayo triaxial siguiendo la norma EN 15305:2008. En este ensayo se hacen medidas para conocer las tensiones en las direcciones 1, 2 y la bisectriz entre ellas (véase la Figura 25). De esta manera puede conocerse el tensor de tensiones completo sobre el punto de medida.

Para ello, se coloca la muestra sobre la mesa de trabajo del equipo (Figura 26) y se mide el ángulo de difracción a distintas inclinaciones, rotando el goniómetro en ángulo PSI (Ψ) para una única dirección de medida, es decir, una única dirección del ángulo PHI (ϕ), pudiendo proporcionar datos de la profundidad del perfil de las tensiones. Además, con la ley de Bragg se puede asociar el ángulo de difracción con la distancia interplanar de los planos cristalográficos que se están midiendo. Si se conoce esa distancia (d) puede calcularse la deformación y, con las constantes elásticas de difracción (XEC), se puede relacionar la deformación con la tensión.

En la Figura 27 puede verse un esquema del procedimiento:



Leyenda

S_1, S_2	ejes en el plano de la probeta; S_1 lo define el operador;
S_3	eje perpendicular a la superficie de la probeta;
L_1, L_2, L_3	sistema de coordenadas del laboratorio; L_3 es perpendicular a los planos reticulares de difracción $\{hkl\}$ y es el bisector del ángulo entre los haces incidente y difractado;
ϕ	ángulo entre una dirección fija en el plano de la probeta y la proyección en ese plano de la perpendicular de los planos reticulares de difracción;
ψ	ángulo entre la perpendicular de la probeta y la perpendicular de los planos reticulares de difracción;
S_ϕ	dirección en la que se miden las tensiones σ_ϕ y τ_ϕ .

Figura 27. Sistemas de coordenadas ortogonales correspondientes a la determinación de la tensión por difracción de rayos X (XDR) [19].

Adicionalmente y, debido a que la superficie puede estar afectada por el amolado, también se han realizado medidas subsuperficiales a 200 y 400 μm mediante ensayos triaxiales para estudiar el estado tensional en el material base alejado de la superficie mecanizada.

3.4 Análisis de datos de ensayo

3.4.1 Análisis Estadístico

El análisis estadístico es fundamental para comprender los datos experimentales en ciencia e ingeniería de materiales. Este enfoque analítico ayuda a extraer información valiosa de conjuntos de datos complejos, identificar patrones y obtener conclusiones basadas en las propiedades de los materiales. Al combinar métodos estadísticos con técnicas de visualización, se ha construido un marco robusto para el análisis de los ensayos de *Small Punch*.

El análisis de datos de este proyecto se basa en medidas estadísticas clave para comprender patrones de valores. Se utiliza la media, que es el promedio de todos los

valores, para mostrar la tendencia central, y la mediana, que es el valor central, para proporcionar otra perspectiva sobre la distribución de datos. Estos funcionan junto con medidas de dispersión: la desviación estándar muestra la variación típica respecto a la media, por ejemplo.

Los diagramas de caja (o diagramas de caja y bigotes) han demostrado ser especialmente valiosos en los ensayos de materiales. Estos gráficos muestran la distribución de datos mediante un resumen de cinco números: una caja que abarca desde el percentil 25 ($Q1$) hasta el percentil 75 ($Q3$), con la mediana ($Q2$) marcada por una línea. Los bigotes se extienden hasta los valores mínimo y máximo dentro de 1,5 veces el rango intercuartílico, con los valores atípicos representados como puntos individuales (*outliers*) [24].

En el análisis de las características de los diagramas de caja que ocupa este proyecto, se presta especial atención a los tamaños y posiciones relativas de diferentes componentes, pues revelan información crucial sobre la distribución de datos. Una sección de caja más grande (el rango intercuartílico) indica mayor variabilidad en el 50% central de los datos, sugiriendo menor consistencia en el comportamiento del material. Por el contrario, una caja compacta indica que la mayoría de las mediciones se agrupan cerca de la mediana, señalando propiedades más predecibles.

La posición de la línea mediana dentro de la caja revela la asimetría de los datos. Una línea mediana situada significativamente por encima del centro indica asimetría positiva, sugiriendo una tendencia a valores atípicos altos en las pruebas. En cambio, una línea mediana más baja sugiere asimetría negativa, indicando mayor frecuencia de valores bajos.

La longitud de los bigotes es especialmente relevante, pues su asimetría revela patrones en los valores extremos. Los bigotes superiores más largos indican que los valores altos se distribuyen en un rango mayor que los bajos, lo que puede señalar comportamientos específicos bajo condiciones de estrés. La presencia de múltiples valores atípicos más allá de los bigotes, especialmente si aparecen consistentemente en un lado, puede indicar efectos sistemáticos en el procedimiento o propiedades del material que requieren mayor investigación.

En estos análisis comparativos, se examinan los tamaños relativos de las cajas bajo diferentes condiciones de ensayo. Cajas consistentemente más grandes a ciertas condiciones sugieren que estos parámetros introducen mayor variabilidad en las mediciones.

El espaciado entre diagramas de caja adyacentes también es significativo. Un solapamiento mínimo entre cajas de diferentes condiciones sugiere comportamientos materiales distintos. Por el contrario, un solapamiento sustancial indica que ciertos parámetros tienen un impacto limitado en las propiedades del material, ayudando a identificar las variables más influyentes en los resultados.

En el ensayo *Small Punch*, se utilizan diagramas de caja para analizar mediciones de fuerza, valores de desplazamiento y energía absorbida en diferentes condiciones. Estas visualizaciones revelan cómo la temperatura, la velocidad de deformación y la geometría de la muestra afectan al comportamiento del material. La posición de la línea mediana y los bordes de la caja ayudan a evaluar rápidamente la simetría y el sesgo de los datos.

El análisis de los datos se ha mejorado combinando diagramas de caja con métodos de *clustering*. Los gráficos ayudan a validar los resultados del *clustering* mostrando distribuciones de valores dentro de los grupos y confirmando las distinciones entre ellos. Al examinar cómo las variables individuales contribuyen a la formación de grupos, se comprende mejor la importancia de cada característica. Este enfoque fortalece la comprensión de los patrones subyacentes mientras se validan los resultados.

También se han utilizado gráficos de dispersión con barras de error para representar resultados significativos, lo que ayuda a visualizar los errores combinados de medición y proceso para cada punto de datos. Estas barras de error reflejan la incertidumbre total en los resultados finales [24].

Al examinar las variables de prueba, se estudia cómo cambian las propiedades del material bajo diferentes condiciones. El tamaño de la caja y la longitud de los bigotes indican la consistencia de los resultados, mientras que los valores medianos revelan relaciones entre variables. La comparación de tipos de materiales y condiciones de prueba se vuelve intuitiva a través de estas distribuciones.

El enfoque integrado de análisis estadístico y visualización de este proyecto proporciona un marco claro para comprender los datos del ensayo de *Small Punch*. Esto ayuda a entender las distribuciones, identificar patrones y validar resultados desde

múltiples ángulos. Las visualizaciones claras permiten una evaluación más sencilla de los resultados.

3.4.2 Machine Learning

La investigación en ciencia de materiales depende cada vez más de técnicas de aprendizaje automático para descubrir patrones y relaciones que los métodos analíticos tradicionales podrían pasar por alto [6]. En este estudio de datos del ensayo de *Small Punch*, se utilizan métodos de aprendizaje no supervisado para identificar patrones sin etiquetas o resultados predefinidos [25]. Este enfoque es particularmente valioso para analizar resultados de este ensayo, ya que permite descubrir agrupaciones naturales que los métodos convencionales suelen pasar por alto.

Este análisis examina simultáneamente seis variables clave de los resultados del SPT. Esta perspectiva multidimensional captura relaciones complejas entre los resultados de las pruebas mientras reduce el sesgo humano en la interpretación. En ensayos de materiales, este enfoque no supervisado es muy eficaz para identificar patrones sutiles en el comportamiento del material y detectar relaciones inesperadas entre parámetros.

En el núcleo de nuestra metodología se encuentra el análisis de agrupamiento *K-means*: un algoritmo de particionamiento iterativo que crea grupos (*clusters*) distintos y no superpuestos mediante la optimización del equilibrio entre la varianza dentro del grupo y la separación entre grupos [26], [27]. El fundamento matemático se expresa a través de una función objetivo que el algoritmo minimiza con la ecuación (3.1):

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (3.1)$$

En esta ecuación, $x_i^{(j)}$ representa el i -ésimo punto de datos en el *cluster* i , mientras que c_j representa el centroide del *cluster* j . El agrupamiento comienza con la colocación estratégica de centroides iniciales, seguida de la asignación de cada punto de datos a su centroide más cercano utilizando la distancia euclidiana con la ecuación (3.2):

$$d(x, c) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - c_i)^2} \quad (3.2)$$

El algoritmo recalcula entonces, de manera iterativa, los centroides como la media de todos los puntos asignados con la ecuación (3.3):

$$c_j = \frac{1}{|C_j|} \sum_{x \in C_j} x \quad (3.3)$$

Se exploran números de grupos desde 0 hasta 25 y cada configuración revela diferentes perspectivas sobre la estructura de los datos. Si bien este enfoque ofrece eficiencia computacional y escalabilidad, tiene dos limitaciones principales: sensibilidad a la colocación inicial de centroides y la necesidad de preseleccionar el número de grupos.

Para determinar el número óptimo de grupos, se utiliza el método del codo (*elbow method*) [28], un enfoque heurístico que analiza la relación entre el número de grupos y la suma de cuadrados dentro del grupo (WCSS). La métrica WCSS se define en la ecuación (3.4) como:

$$WCSS = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (3.4)$$

Esta métrica disminuye monótonamente con el aumento de k, con el número óptimo de grupos apareciendo en un “punto de codo” donde la tasa de disminución cambia notablemente.

Para la visualización, se utiliza la Incrustación Estocástica de Vecinos distribuida en t (t-SNE, *t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding*), una técnica de reducción de dimensionalidad que sobresale en la representación de datos de alta dimensión en espacios de menor dimensión [29]. Este método calcula similitudes por pares entre puntos en el espacio de alta dimensión con la ecuación (3.5) como:

$$p_{j|i} = \frac{\exp(-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma_i^2)}{\sum_{k \neq i} \exp(-\|x_i - x_k\|^2 / 2\sigma_i^2)} \quad (3.5)$$

Las probabilidades correspondientes en baja dimensión, utilizando una distribución t y según la ecuación (3.6), son:

$$q_{ij} = \frac{(1 + \|y_i - y_j\|^2)^{-1}}{\sum_{k \neq l} (1 + \|y_k - y_l\|^2)^{-1}} \quad (3.6)$$

La optimización final minimiza la divergencia de Kullback-Leibler entre estas distribuciones con la ecuación (3.7):

$$KL = (P|Q) = \sum_i \sum_j p_{ij} \log \frac{p_{ij}}{q_{ij}} \quad (3.7)$$

Este proceso de optimización asegura que los puntos que son similares en el espacio de alta dimensión permanezcan cercanos en la representación reducida. A través de estos marcos matemáticos, se ha creado un proceso analítico robusto que revela patrones significativos en los datos del ensayo de *Small Punch* mientras preserva las relaciones complejas entre variables.

Esta configuración experimental se detallará más adelante y se presentarán los resultados de la aplicación de estos métodos al conjunto de datos del ensayo, con especial énfasis en la interpretación física de los cúmulos identificados.

4 Resultados y Discusión

4.1 Propiedades mecánicas

La recopilación de datos mediante el ensayo de *Small Punch* y su posterior procesamiento junto con el uso de técnicas estadísticas avanzadas permiten estudiar la variabilidad en altura de las propiedades mecánicas de las placas de 316L. El estudio se realizará en función del efecto de la posición, de la orientación y de la historia térmica para analizar la anisotropía y determinar criterios de aceptabilidad. Además, los resultados obtenidos se apoyarán en medidas de tensiones residuales y en técnicas estadísticas y de aprendizaje automático.

En la Figura 28 puede observarse una comparativa de la diferencia entre las curvas de fuerza-deflexión en un ensayo de *Small Punch* con acero 316L convencional frente al fabricado por DED. De ahí el interés en este estudio.

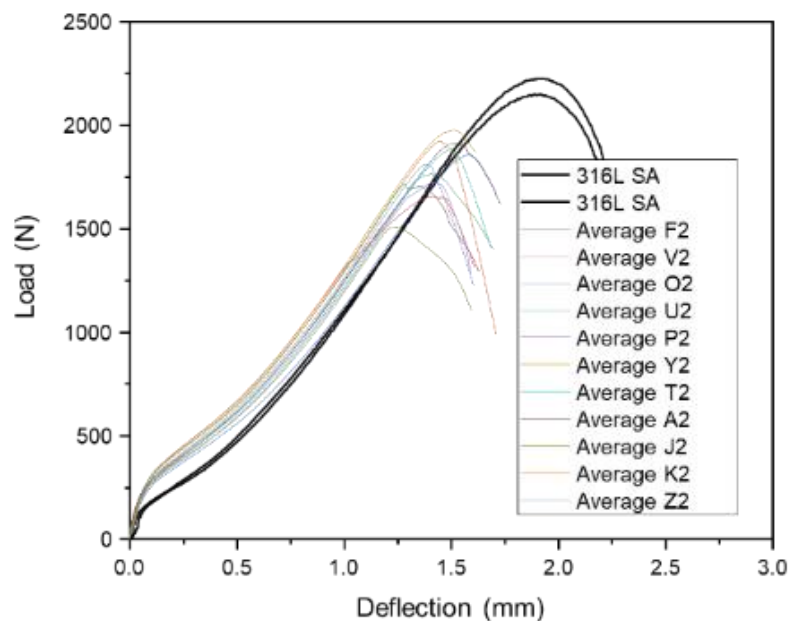


Figura 28. Diferencia entre las curvas de fuerza-deflexión en un ensayo de *Small Punch* con acero 316L convencional frente al fabricado por DED.

Los 76 ensayos de las probetas de la placa 1 y los 79 de la placa 3 se realizaron a una temperatura de 20°C, y los 85 de la placa 2, a 23°C. Aunque esta diferencia de temperatura de ensayo no se considera relevante, es preferible reportarla siguiendo las buenas prácticas de laboratorio.

De los ensayos se obtuvieron los datos de fuerza y deflexión de cada disco extraído de los cilindros de las placas, representados en las curvas fuerza-deflexión proporcionadas por el CIEMAT y realizadas con el *software Origin*. Esta herramienta es muy útil para el análisis y representación de datos.

Las curvas de los ensayos realizados en los discos de cada placa se representan en la Figura 29 para la placa 1, en la

Figura 30 para la placa 2 y en la Figura 31 para la placa 3:

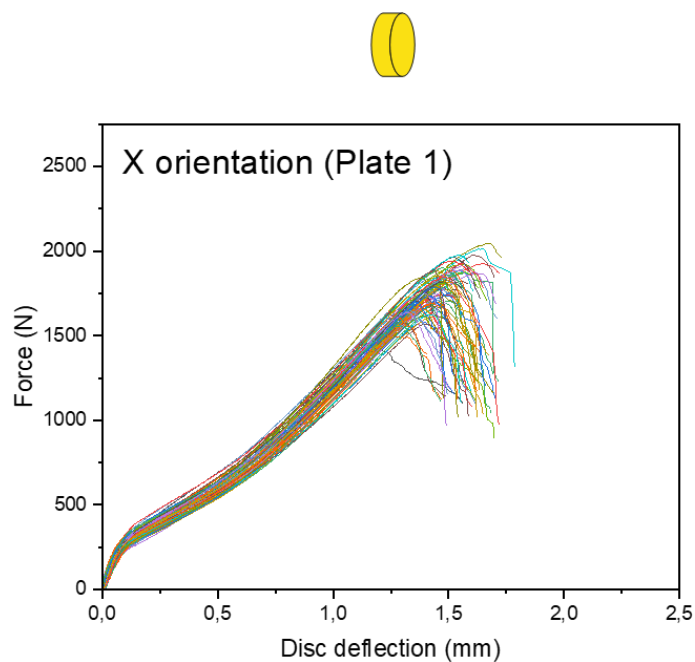


Figura 29. Curvas fuerza-deflexión $\left[\frac{N}{mm}\right]$ de la Placa 1.

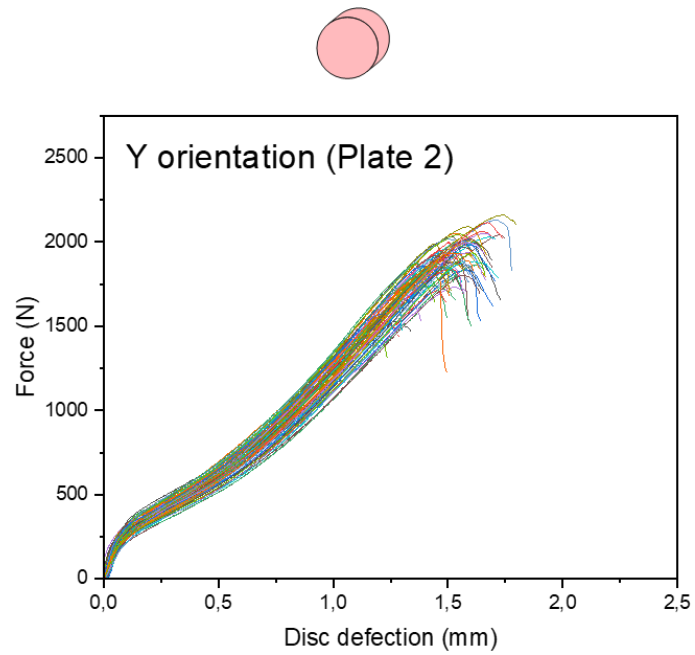


Figura 30. Curvas fuerza-deflexión $\left[\frac{N}{mm}\right]$ de la Placa 2.

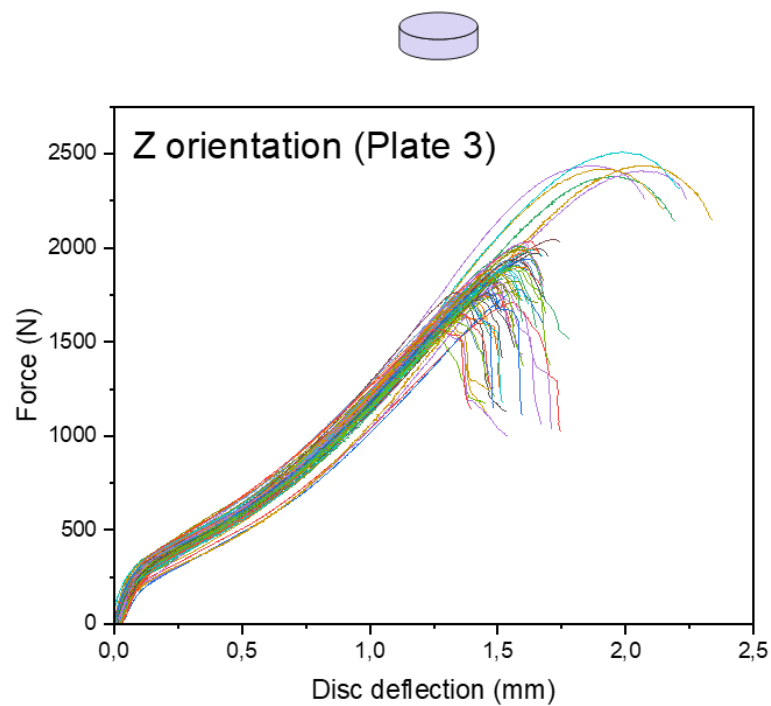


Figura 31. Curvas fuerza-deflexión $\left[\frac{N}{mm}\right]$ de la Placa 3.

Con los datos obtenidos del ensayo se calcula el valor medio y el error del resto de parámetros para cada placa mediante la rutina de cálculo del Visual Basic desarrollada en el CIEMAT, tal y como puede observarse en Tabla 6, en la Tabla 7 y en la Tabla 8:

Tabla 6. Valores medios y errores de los parámetros para la Placa 1.

Cylinder	X position	Z position	Fe/h ² Mean	Fe/h ² Standard Error	Fm/(um*h) Mean	Fm/(um*h) Standard Error	E Mean	E Standard Error
A1A	4,50	115,50	1131,74	118,49	2305,53	78,97	1126,95	138,95
A1B	22,75		985,52	91,96	2272,36	45,31	1162,53	61,64
A1C	41,00		899,77	47,99	2384,68	7,36	1228,87	76,17
A1D	59,25		978,33	91,22	2401,49	24,21	1348,01	137,06
A1E	77,50		875,04	68,32	2374,79	32,26	1505,16	100,13
B1A	4,50	87,75	914,15	115,89	2446,13	18,46	1489,49	179,47
B1B	22,75		983,32	83,40	2327,86	36,11	1216,32	243,27
B1C	41,00		981,54	4,64	2414,50	59,29	1299,51	160,72
B1D	59,25		936,60	58,35	2390,22	62,74	1212,13	51,71
B1E	77,50		931,75	14,33	2313,04	32,30	1297,76	40,89
C1A	4,50	60,00	114,59	14,80	2415,27	63,13	1505,47	242,59
C1B	22,75		1165,80	112,25	2444,73	91,33	1316,89	187,87
C1C	41,00		1126,70	27,70	2421,54	44,99	1289,39	127,51
C1D	59,25		1125,96	110,87	2346,32	56,20	1372,66	196,61
C1E	77,50		1072,58	75,96	2355,59	127,79	1223,50	156,93
D1A	4,50	32,25	1141,91	110,58	2491,57	85,96	1480,97	131,68
D1B	22,75		1210,82	30,27	2470,13	23,88	1407,61	120,34
D1C	41,00		1157,99	53,66	2523,02	65,79	1309,36	112,16
D1D	59,25		1097,24	89,44	2494,27	88,62	1328,23	189,14
D1E	77,50							
E1A	4,50	4,50	1302,25	83,48	2617,90	81,50	1503,42	95,55
E1B	22,75		1168,30	59,83	2624,59	55,64	1409,56	131,76
E1C	41,00		1193,43	84,42	2468,89	26,81	1231,58	134,80
E1D	59,25		1221,10	40,21	2487,49	30,24	1376,42	44,18
E1E	77,50		1123,61	96,05	2484,77	66,34	1188,83	149,70

Tabla 7. Valores medios y errores de los parámetros para la Placa 2.

Cylinder	X position	Z position	Fe/h ² Mean	Fe/h ² Standard Error	Fm/(um*h) Mean	Fm/(um*h) Standard Error	E Mean	E Standard Error
A2	4,50	115,50	959,7	34,4	2496,8	19,9	1566,8	82,4
F2		87,75	984,8	86,6	2546,3	26,9	1326,1	76,0
K2		60,0	1040,8	73,7	2550,4	52,6	1538,2	89,2
P2		32,25	991,9	33,6	2570,6	53,3	1253,7	68,5
U2		4,50	1143,3	60,6	2639,4	33,0	1355,3	95,3
G2	22,75	87,8	1046,2	125,6	2559,9	108,3	1593,8	75,0
L2		60,0	1076,0	54,1	2479,5	19,6	1462,7	91,4
Q2		32,3	1026,1	79,7	2551,5	19,4	1512,0	83,4
V2		4,5	1119,4	37,9	2629,9	14,5	1337,3	162,2
H2		87,8	965,4	51,2	2466,2	51,2	1453,9	32,6
M2	41,00	60,0	1059,1	81,4	2546,1	16,7	1345,9	101,4
R2		32,3	1064,2	65,2	2501,9	21,8	1548,3	141,1
X2		4,5	1107,0	86,4	2579,5	19,0	1331,3	87,1
I2	59,25	87,8	1017,1	25,0	2393,3	52,6	1591,7	173,3
N2		60,0	1009,3	78,6	2410,6	33,6	1278,3	207,8
S2		32,3	1097,8	47,0	2495,5	26,1	1602,8	84,2
Y2		4,5	1135,4	31,7	2629,4	26,6	1589,0	45,8
J2		87,8	948,8	60,0	2465,3	61,5	1261,8	142,2
O2	77,50	60,0	958,6	53,0	2361,4	36,0	1508,1	61,8
T2		32,3	1070,5	33,4	2522,8	37,8	1454,3	34,9
Z2		4,5	1122,5	40,7	2598,9	71,9	1402,1	63,5

Tabla 8. Valores medios y errores de los parámetros para la Placa 3.

Cylinder	X position	Z position	Fe/h ² Mean	Fe/h ² Standard Error	Fm/(um*h) Mean	Fm/(um*h) Standard Error	E Mean	E Standard Error
A3A	4,50	115,50	1124,56	42,79	2378,19	41,96	1200,32	160,52
A3B		87,75	1014,15	26,44	2369,43	133,45	1270,11	39,72
A3C		60,0	985,49	40,05	2391,82	79,17	1183,59	154,57
A3D		32,25	1038,04	42,50	2419,66	66,40	1404,58	62,58
A3E		4,50	1067,00	100,01	2404,70	62,34	1536,02	148,92
B3A	22,75	115,50	841,07	158,49	2373,94	62,16	2446,49	113,12
B3B		87,75	1167,65	23,56	2494,41	78,76	1326,89	98,71
B3C		60,0	1096,18	87,11	2427,60	22,24	1249,69	98,60
B3D		32,25	1050,71	46,67	2483,17	40,37	1297,76	166,93
B3E		4,50	1011,31	151,85	2442,28	64,72	1200,75	156,01
C3A	41,00	115,50	1183,42	89,72	2463,44	28,74	1363,79	251,10
C3B		87,75	1110,34	134,41	2435,43	83,04	1603,06	125,94
C3C		60,0	1185,80	22,05	2427,05	9,00	1545,63	73,06
C3D		32,25	1186,88	72,42	2498,97	34,87	1470,23	175,83
C3E		4,50	1205,44	126,76	2491,10	74,75	1660,16	48,87
D3A	59,25	115,50	1111,46	128,03	2561,24	67,11	2450,30	85,58
D3B		87,75	1174,47	49,05	2515,81	39,18	1385,87	33,07
D3C		60,0	1181,38	27,39	2418,99	102,37	1357,90	124,58
D3D		32,25	897,79	767,19	2412,54	91,04	1258,30	72,46
D3E		4,50	1202,23	91,41	2466,79	108,88	1360,71	185,33
E3A	77,50	115,50	1256,18	56,75	2487,46	90,68	1352,52	161,78
E3B		87,75	1031,83	81,66	2427,56	14,20	1192,40	119,08
E3C		60,0	1010,12	81,75	2506,53	92,41	1344,03	126,77
E3D		32,25	965,48	120,23	2516,37	116,61	1413,83	217,74
E3E		4,50	1107,48	150,21	2485,55	27,94	1617,19	68,02

A partir de aquí puede realizarse el estudio del efecto de la posición, de la orientación y de la historia térmica, así como la medida de tensiones residuales y métodos de aprendizaje automático.

4.1.1 Efecto de la posición

En las tres placas, X se toma como eje horizontal y Z como eje vertical. De izquierda a derecha, las posiciones son x1, x2, x3, x4 y x5; y de abajo a arriba, z1, z2, z3, z4 y z5, pudiendo verse en la Figura 15. De esta forma, cada cilindro tiene coordenadas diferentes: E1A tiene coordenadas (x1, z1), por ejemplo. Teniendo esto en cuenta puede procederse al estudio del efecto de la posición en las placas para ver cómo afecta a las propiedades del material. Puede hacerse para cada parámetro previamente calculado.

4.1.1.1 Fuerza de transición elástico-plástica, F_e

Véase primero la variabilidad del valor de F_e respecto a la posición del disco ensayado. El valor de F_e obtenido mediante el ensayo de SPT se puede correlacionar con el

valor del límite elástico, $R_{p0,2}$, obtenido en el ensayo de tracción. Debe recordarse que de que cada posición (X, Z) se han ensayado un mínimo de tres discos.

En la Figura 32, Figura 33 y Figura 34 se puede ver el valor medio de F_e y la proyección en el plano X-Z.

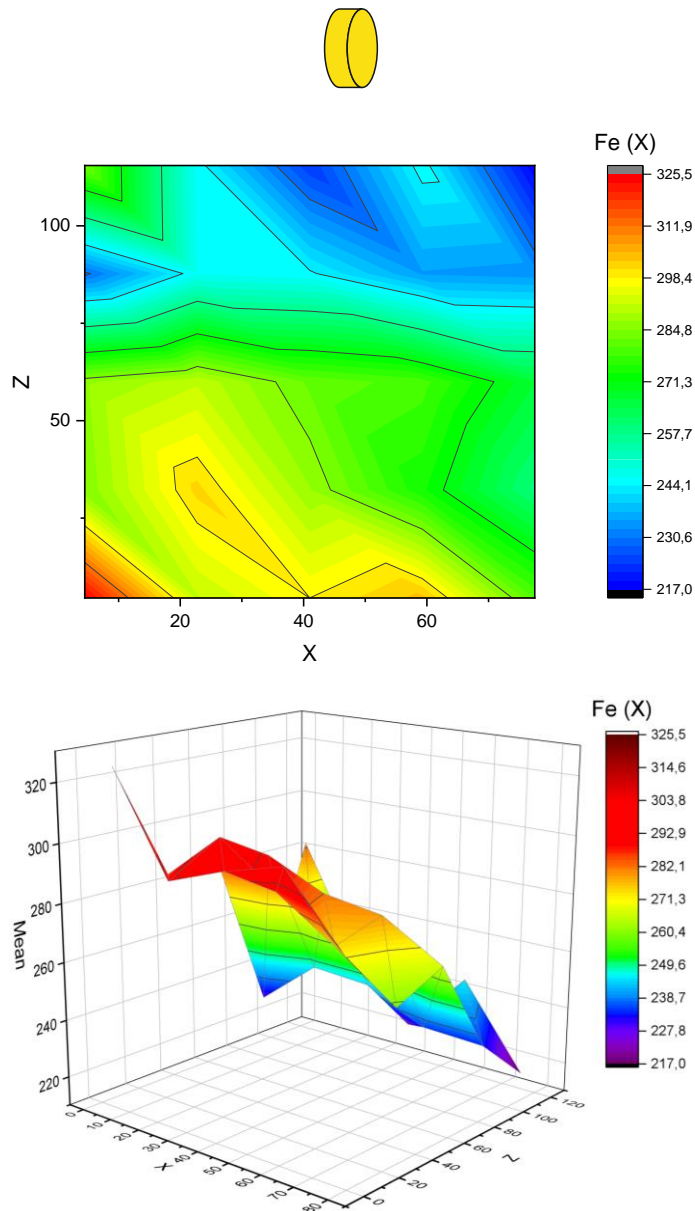


Figura 32. Resultados del valor medio de F_e de los discos extraídos de la Placa 1 (orientación X).

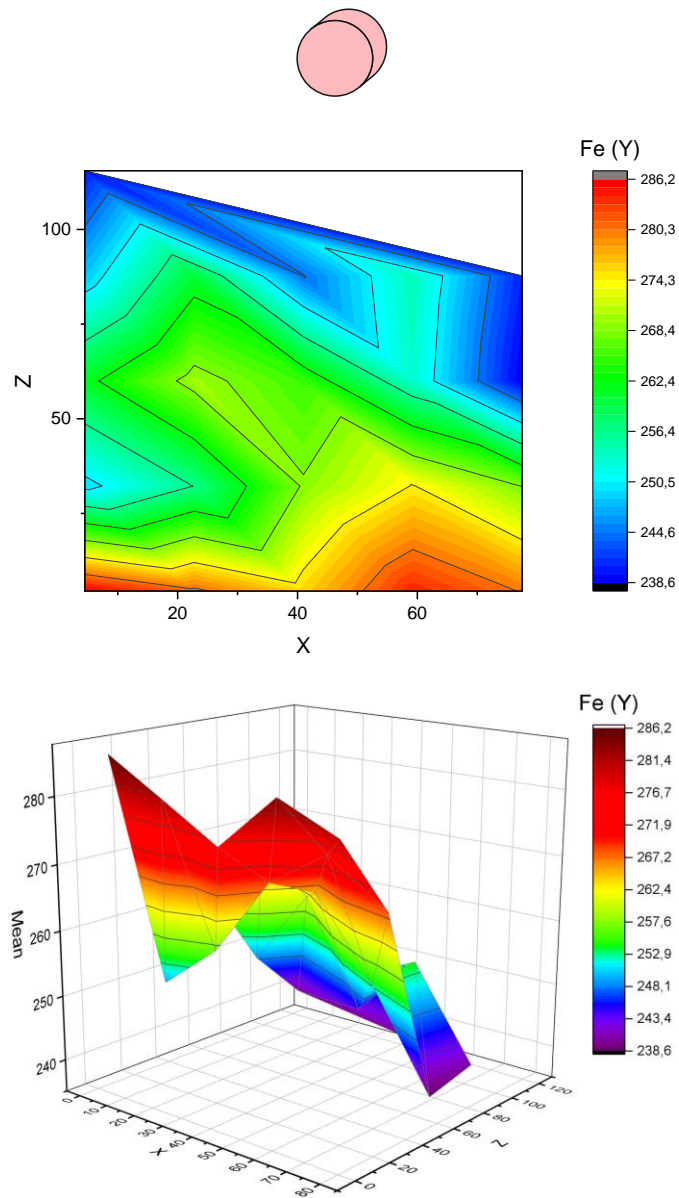


Figura 33. Resultados del valor medio de F_e de los discos extraídos de la Placa 2 (orientación Y).

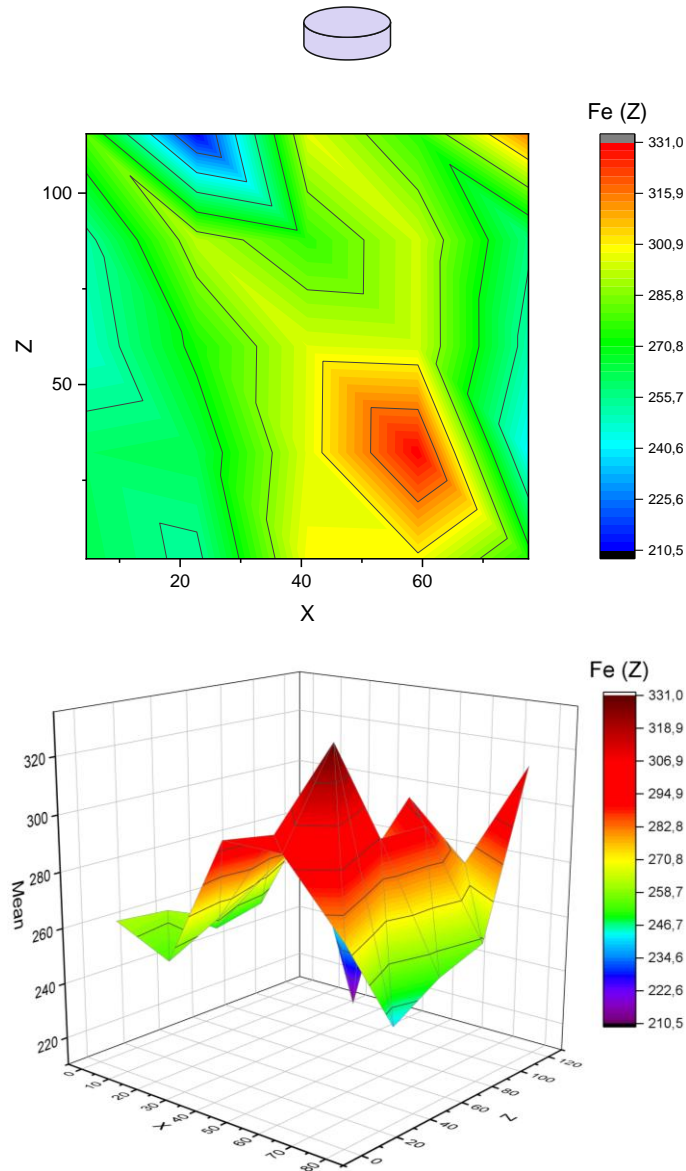


Figura 34. Resultados del valor medio de F_e de los discos extraídos de la Placa 3 (orientación Z).

En estas figuras se observa que los valores de F_e son superiores en la parte inferior de la placa en la orientación X e Y, no siendo tan evidente en la orientación Z.

En la Figura 35 se representa el diagrama de cajas del valor de F_e de los discos mecanizados de la placa 1. En esta figura se observa una ligera tendencia a valores mayores de F_e para valores de x menores. También se confirma que los ensayos de los discos de la parte inferior de la placa (z1) muestran valores mayores de F_e .

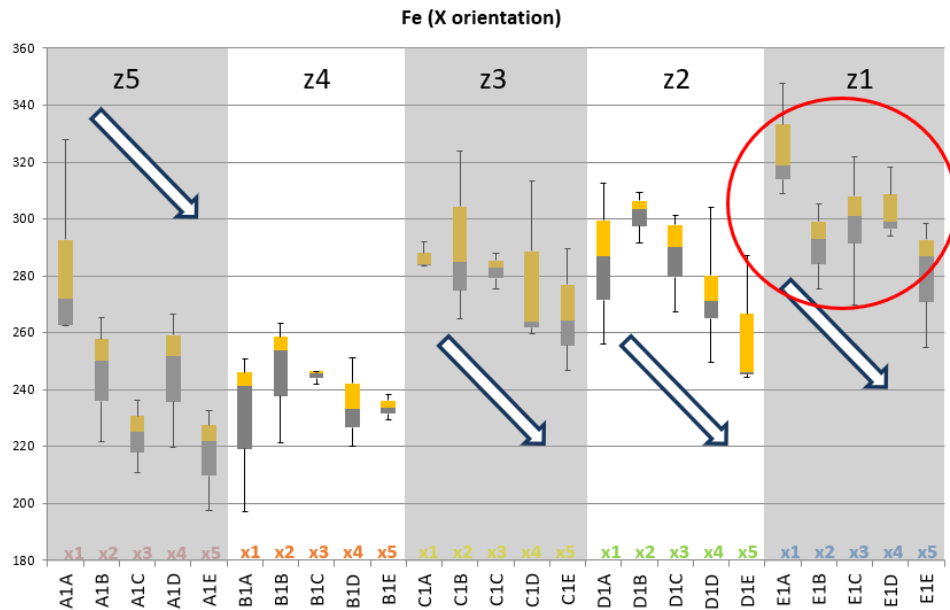


Figura 35. Diagrama de cajas del valor de F_e de los discos mecanizados de la Placa 1 (orientación X).

El diagrama de cajas del valor de F_e de los discos mecanizados de la placa 2 (Figura 36) muestra que la parte inferior de la placa (z1) tiene valores de F_e superiores que en la orientación X, pero en general se observan valores ligeramente inferiores.

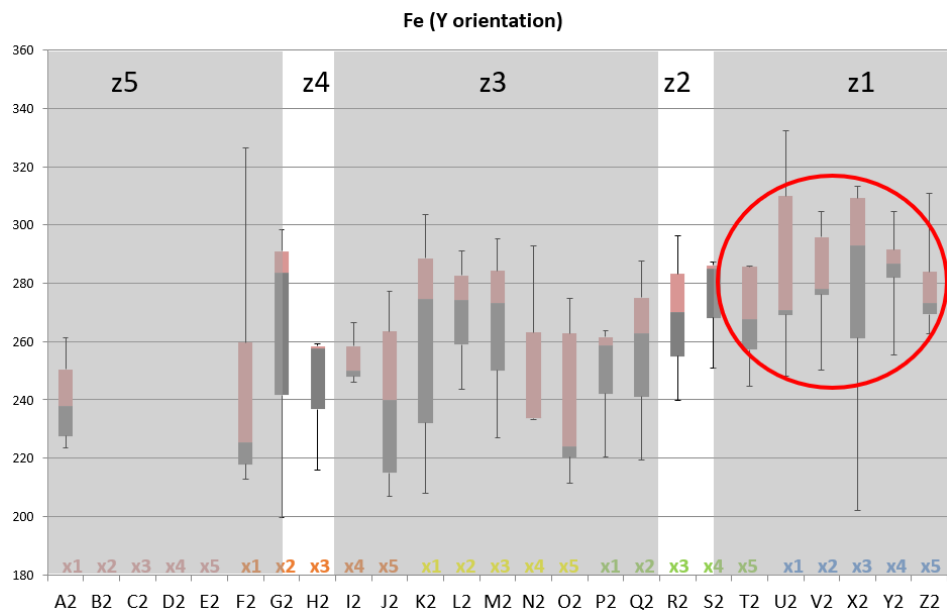


Figura 36. Diagrama de cajas del valor de F_e de los discos mecanizados de la Placa 2 (orientación Y).

En la placa 3, el diagrama de cajas del valor de F_e de los discos mecanizados muestra un aumento de la fuerza F_e en la parte inferior derecha de la placa, en una zona

concentrada. El máximo se encuentra en $x = 60$ y $z = 30$ como puede verse en la Figura 37.

Como consecuencia de la elevada dispersión de los resultados de la placa 3 (orientación Z) no pueden concluirse tendencias claras. Esta alta dispersión se observa en la parte superior de la placa (z5).

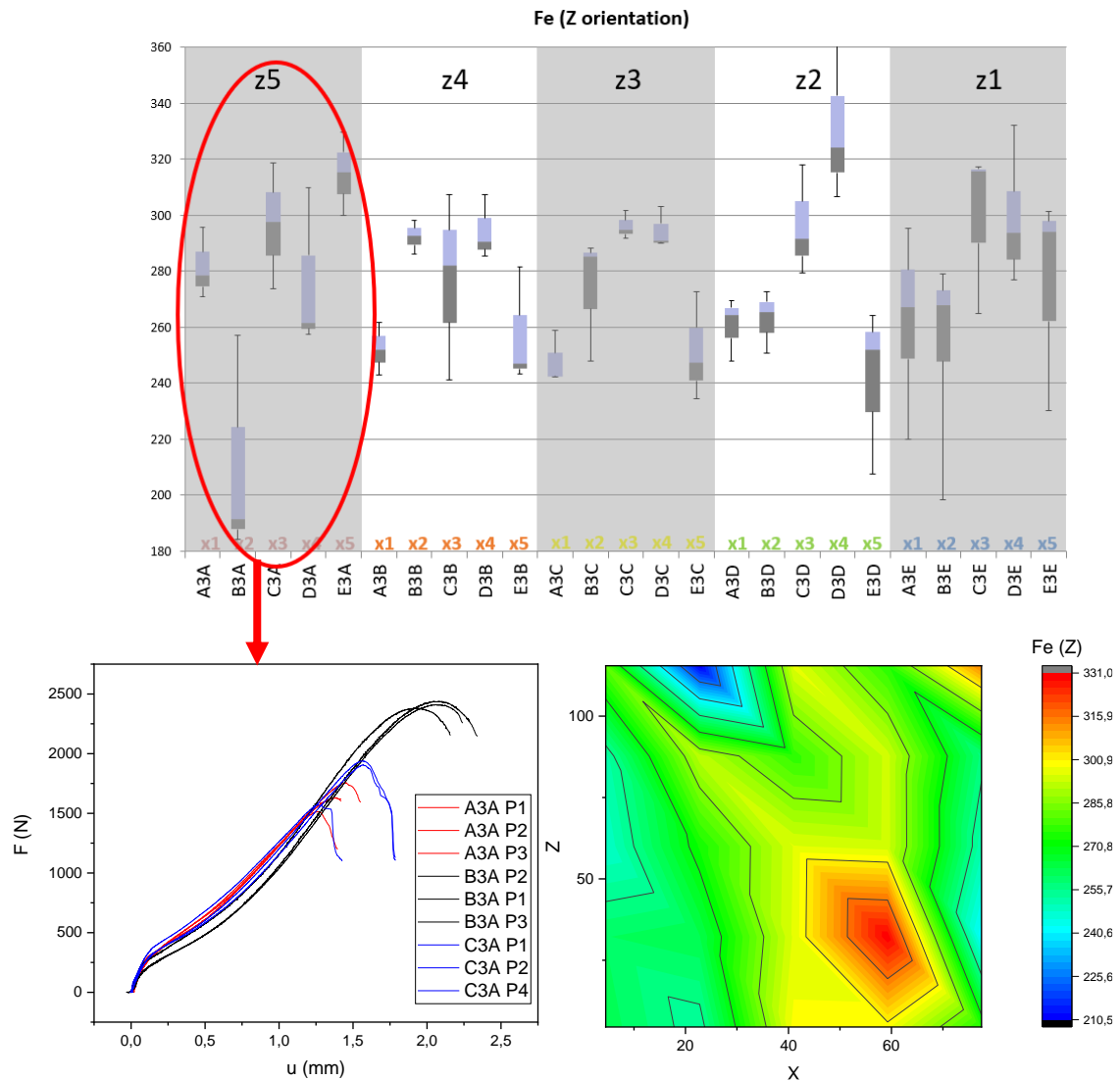


Figura 37. Diagrama de cajas, curva fuerza-deflexión y resultados del valor medio de F_e de los discos mecanizados de la Placa 2 (orientación Y).

En la Figura 38 se superponen las fractografías de los discos ensayados de la placa 3 para diferentes posiciones de X y la misma posición en Z . Puede observarse claramente que los discos extraídos de la posición D3A muestran valores superiores de resistencia (fuerza) indicando además una alta ductilidad (mayor área bajo la curva). Esta mayor

ductilidad se confirma con la apariencia de la fractura de los discos. Los discos de mayor ductilidad muestran una fractura circunferencial, mientras que los discos con menor ductilidad, como el C3A P1, muestran una fractura mixta de orientación circunferencial y radial.

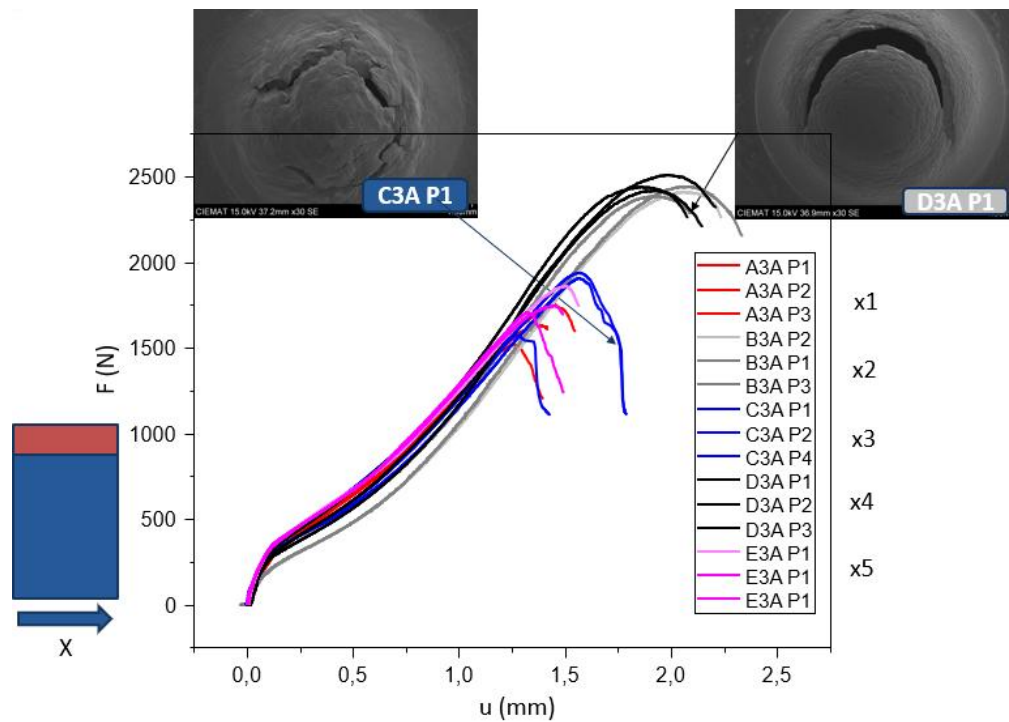
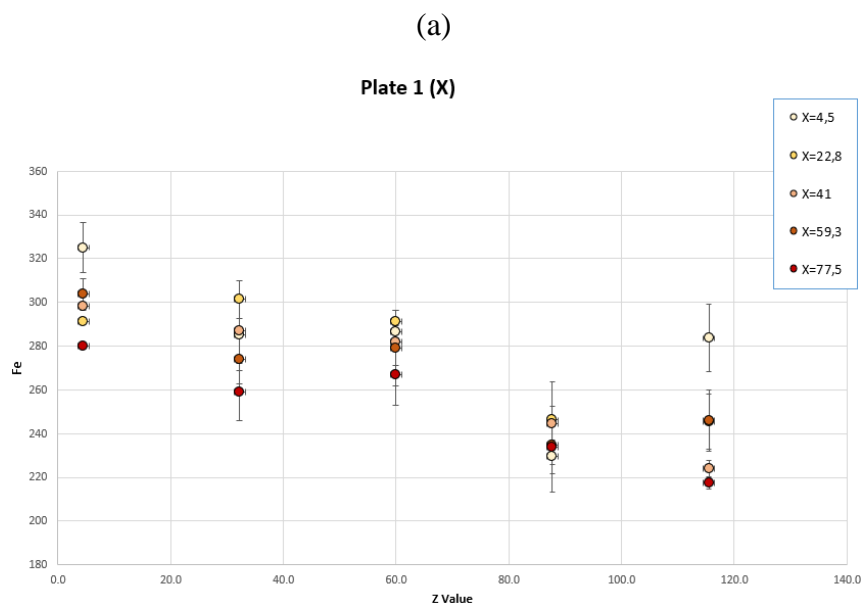


Figura 38. Fractografías de los discos ensayados de la Placa 3 para diferentes posiciones de X y la misma posición en Z.

La Figura 39 muestra los valores de F_e en cada placa:



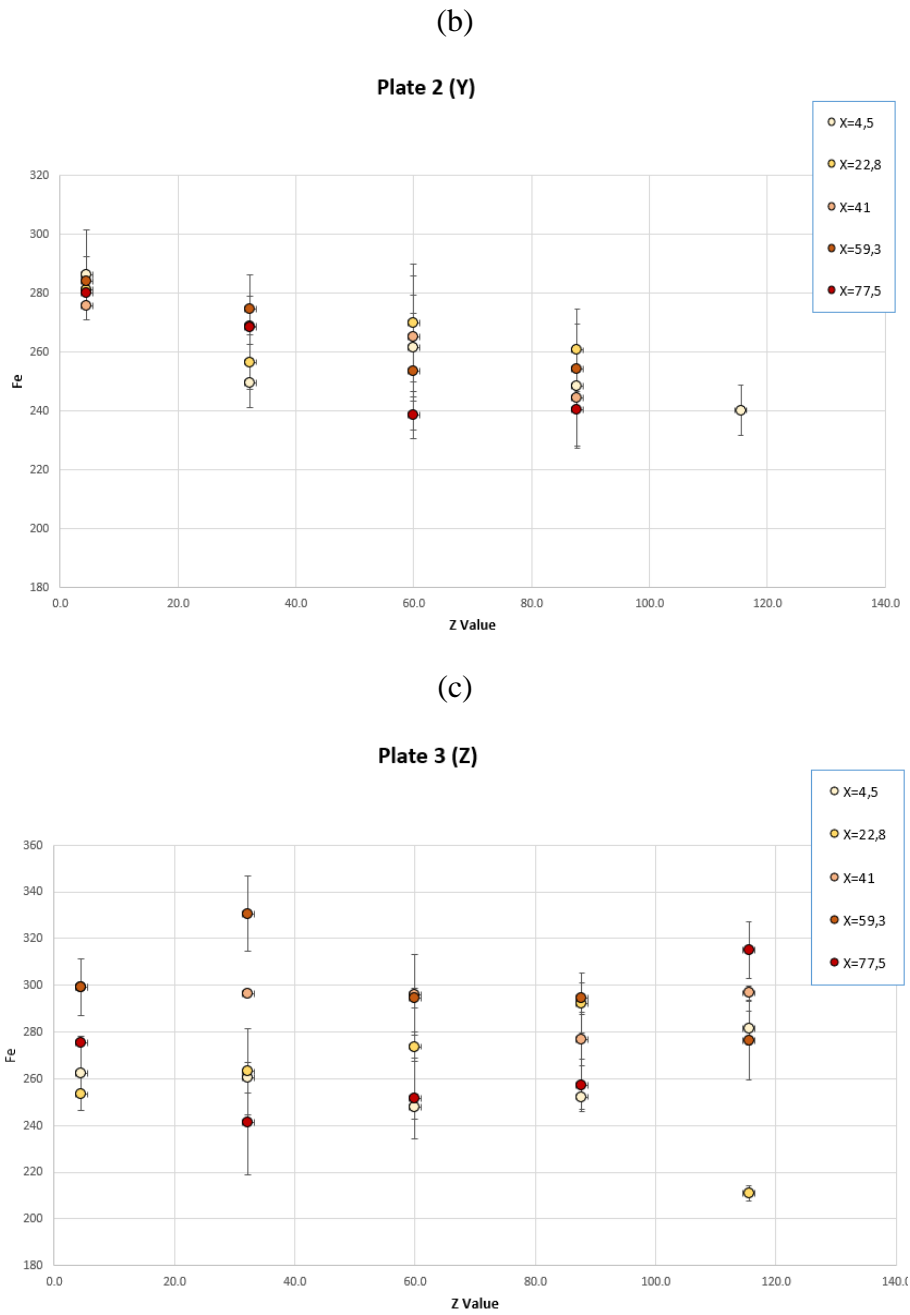


Figura 39. F_e de cada placa, (a) Placa 1; (b) Placa 2; (c) Placa 3.

Adicionalmente se incluyen los errores para F_e de cada placa como puede observarse en la Figura 40:

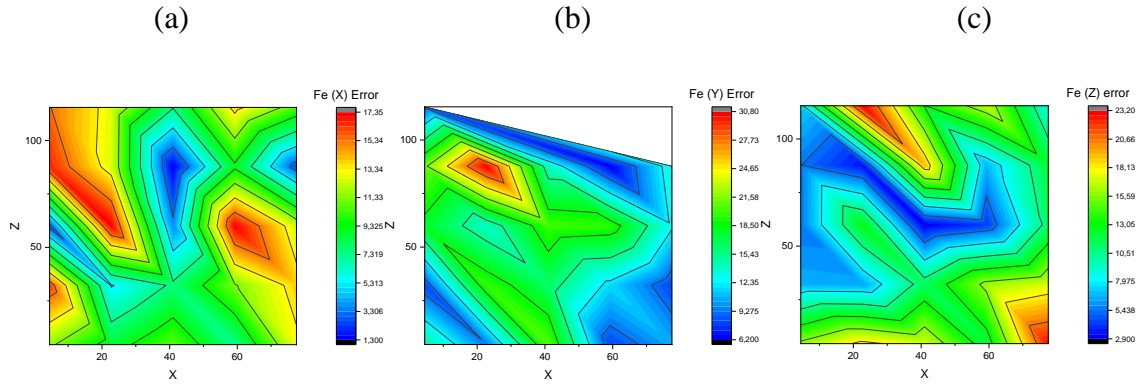


Figura 40. Errores para F_e de cada placa, (a) Placa 1; (b) Placa 2; (c) Placa 3.

La placa 1 muestra un error más uniforme a lo largo de los ejes, mientras que la 2 y la 3 presentan errores más concentrados. En la placa 2 hay un máximo en $x = 25$ y $z = 90$; y en la placa 3, se pueden encontrar dos máximos: uno en la parte inferior derecha de la placa y otro en $x = 25$ y $z = 125$.

4.1.1.2 Fuerza de inestabilidad plástica entre las zonas II y III, F_{II-III}

El valor de F_{II-III} se correlaciona mejor con R_m . En las orientaciones X e Y puede observarse mayor resistencia en la parte inferior de la placa, mientras que en la orientación Z se aprecia un ligero aumento de la resistencia en la parte superior derecha de la placa.

En la Figura 41, Figura 42 y Figura 43 se puede ver el valor medio de F_{II-III} y la proyección en el plano X-Z.

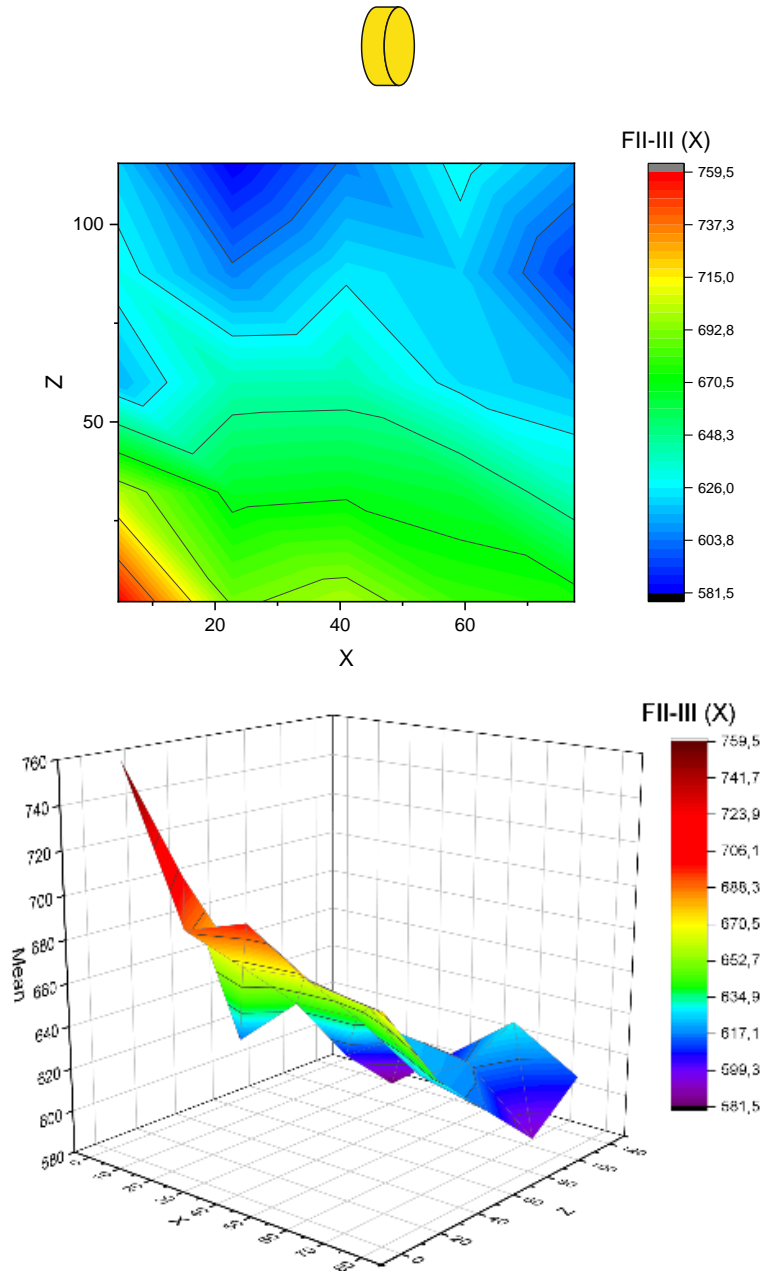


Figura 41. Resultados del valor medio de F_{II-III} de los discos extraídos de la Placa 1 (orientación X).

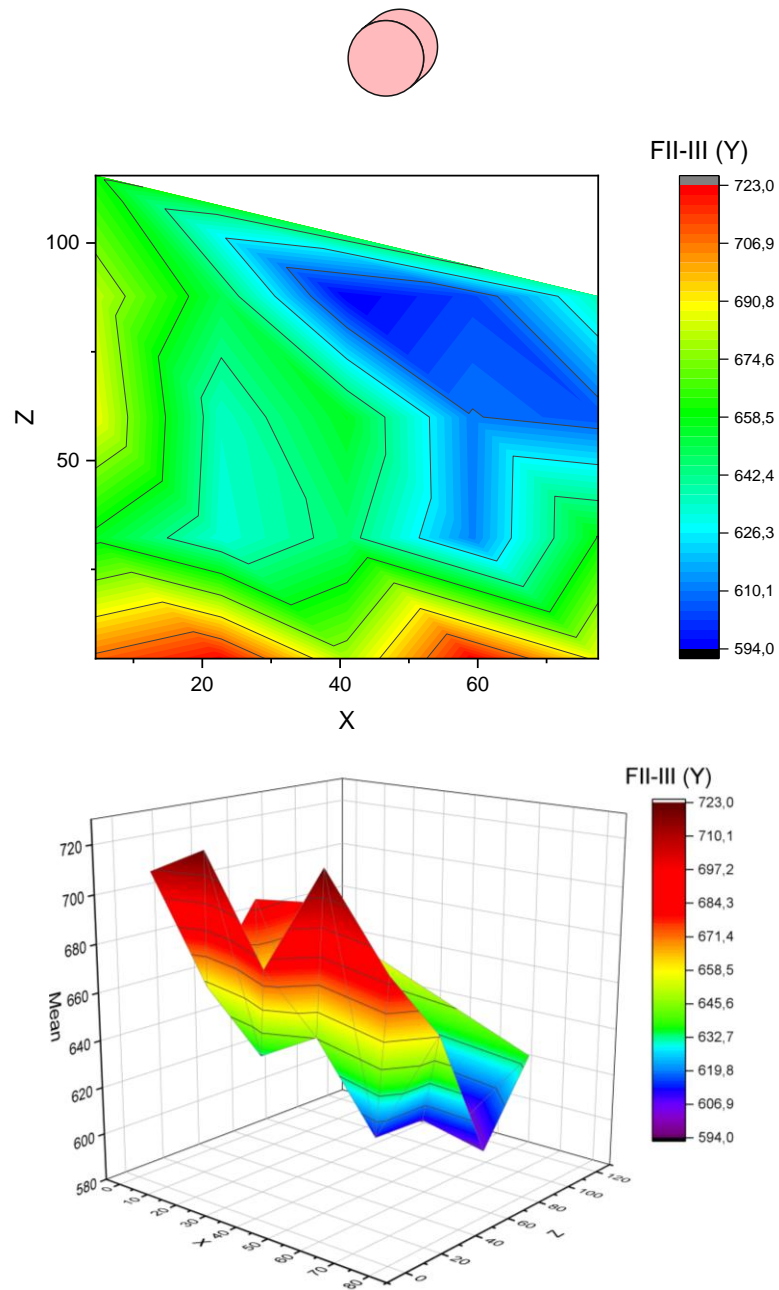


Figura 42. Resultados del valor medio de F_{II-III} de los discos extraídos de la Placa 2 (orientación Y).

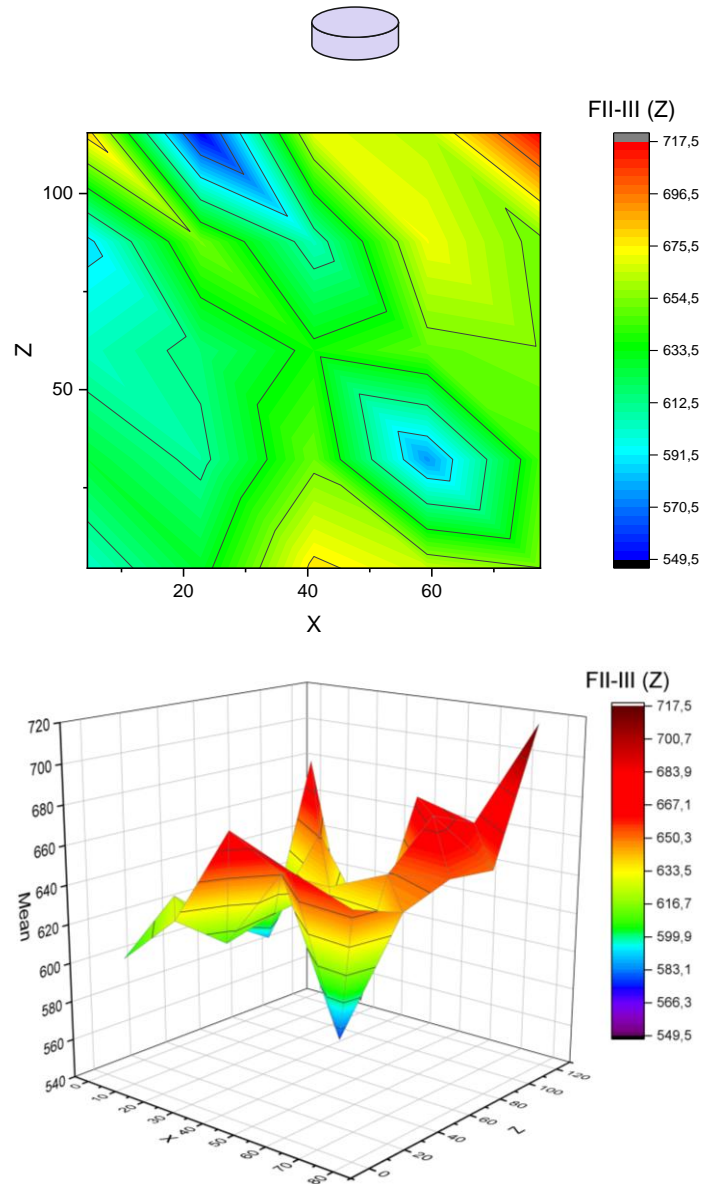


Figura 43. Resultados del valor medio de F_{II-III} de los discos extraídos de la Placa 3 (orientación Z).

En la Figura 44 pueden observarse los diagramas de cajas para la placa 1, que reafirman que los valores más altos se encuentran en la parte inferior de la placa (z1).

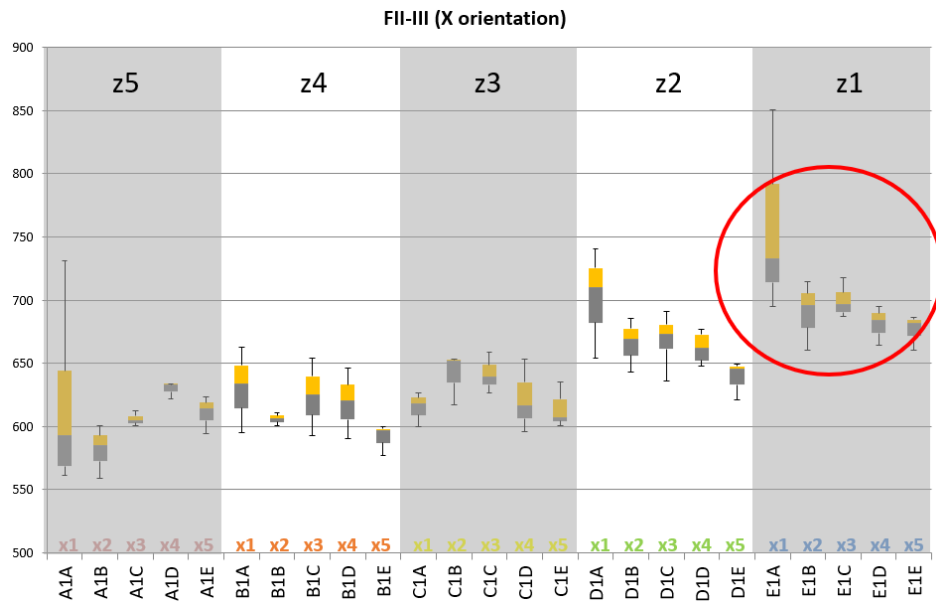


Figura 44. Diagrama de cajas del valor de F_{II-III} de los discos mecanizados de la Placa 1 (orientación X).

En la placa 2 (Figura 45) se observan valores más altos para z más bajos, es decir, valores más altos en la parte inferior de la placa (z1).

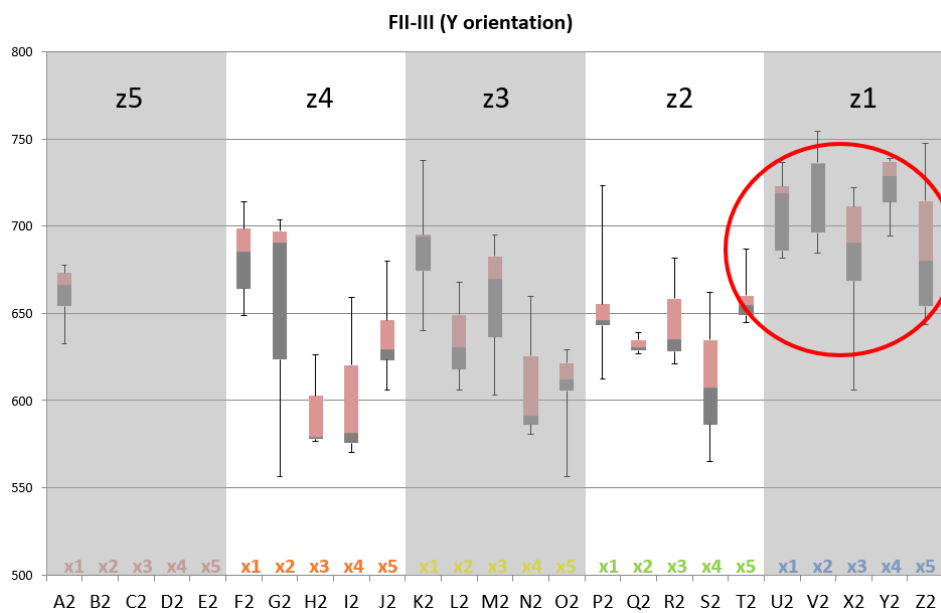


Figura 45. Diagrama de cajas del valor de F_{II-III} de los discos mecanizados de la Placa 2 (orientación Y).

Para la placa 3 (Figura 46) se observa una dispersión muy alta, especialmente en la parte superior.

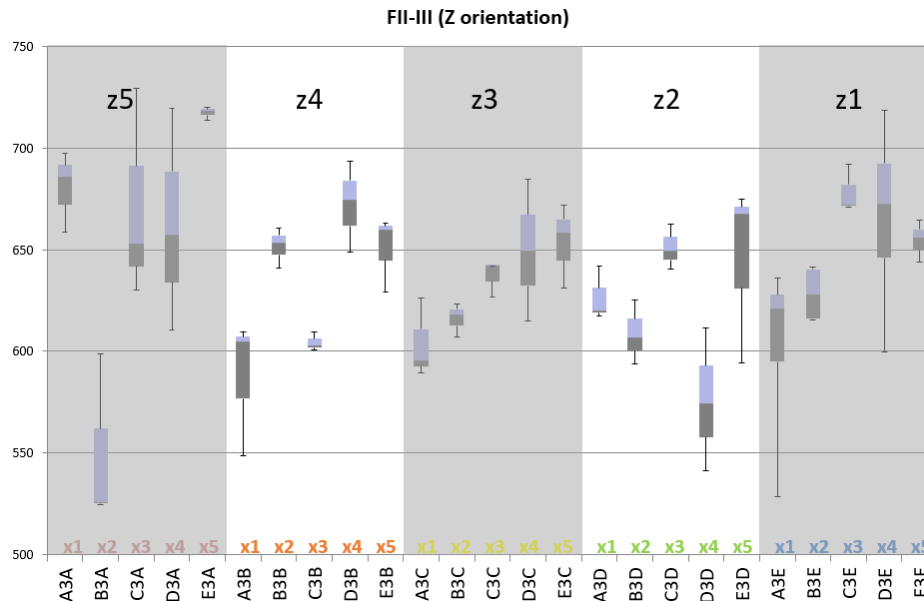


Figura 46. Diagrama de cajas del valor de F_{II-III} de los discos mecanizados de la Placa 3 (orientación Z).

Adicionalmente se incluyen los errores para F_{II-III} en cada placa como puede observarse en la Figura 47:

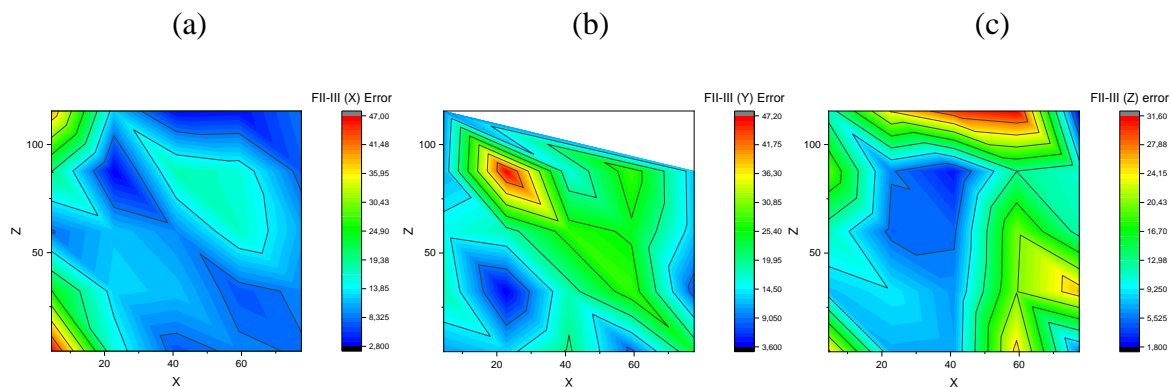


Figura 47. Errores para F_{II-III} de cada placa, (a) Placa 1; (b) Placa 2; (c) Placa 3.

La placa 1 muestra un error uniforme a lo largo de los ejes con valores más bajos, mientras que la 2 y la 3 presentan errores más concentrados. En la placa 2 hay un máximo en $x = 25$ y $z = 90$; y en la placa 3, se encuentra un error más elevado en la parte superior.

4.1.1.3 Energía de ensayo, E

El valor de E se correlaciona mejor con la ductilidad. En la orientación X puede observarse mayor ductilidad en la parte izquierda de la placa, y en la Y en la parte superior

izquierda e inferior derecha. En la orientación Z se aprecia un ligero aumento de la ductilidad en la parte superior de la placa con dos máximos: uno en $x = 25$ y $z = 115$, y otro en $x = 60$ y $z = 115$.

En la Figura 48, Figura 49 y Figura 50 se puede ver el valor medio de E y la proyección en el plano X-Z.

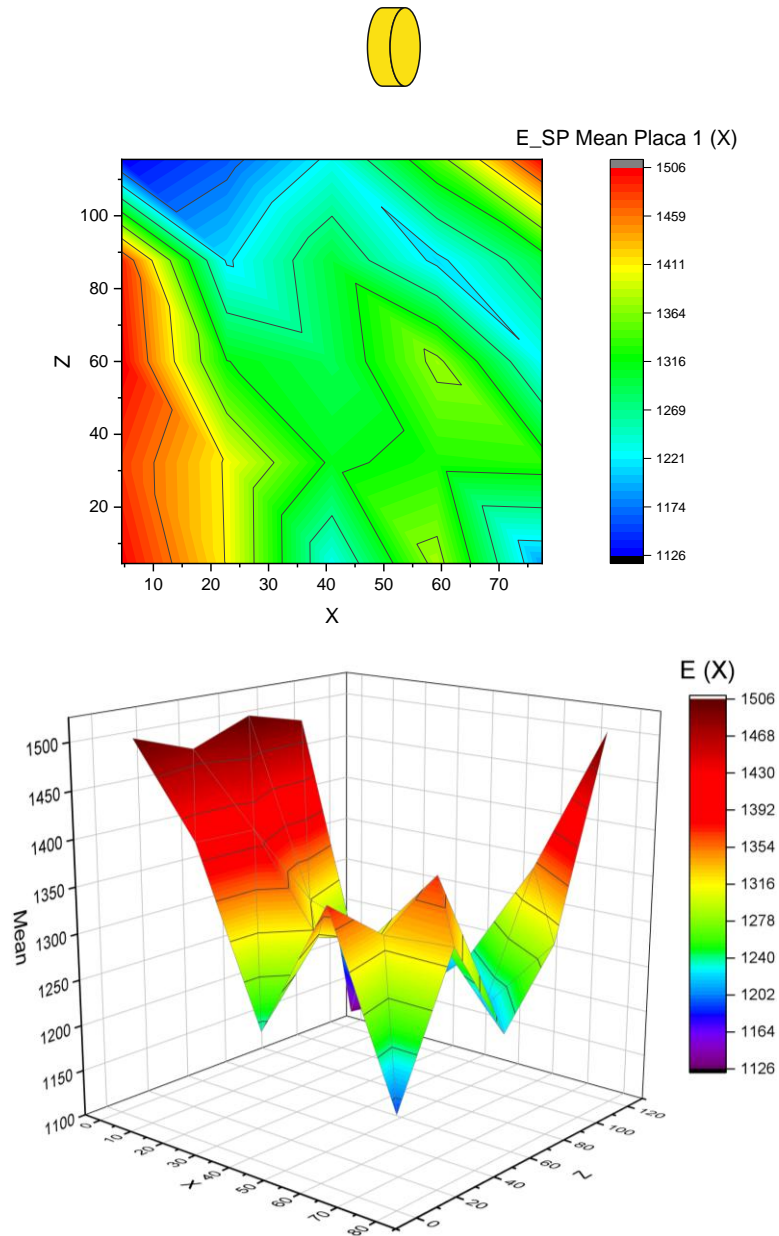


Figura 48. Resultados del valor medio de E de los discos extraídos de la Placa 1 (orientación X).

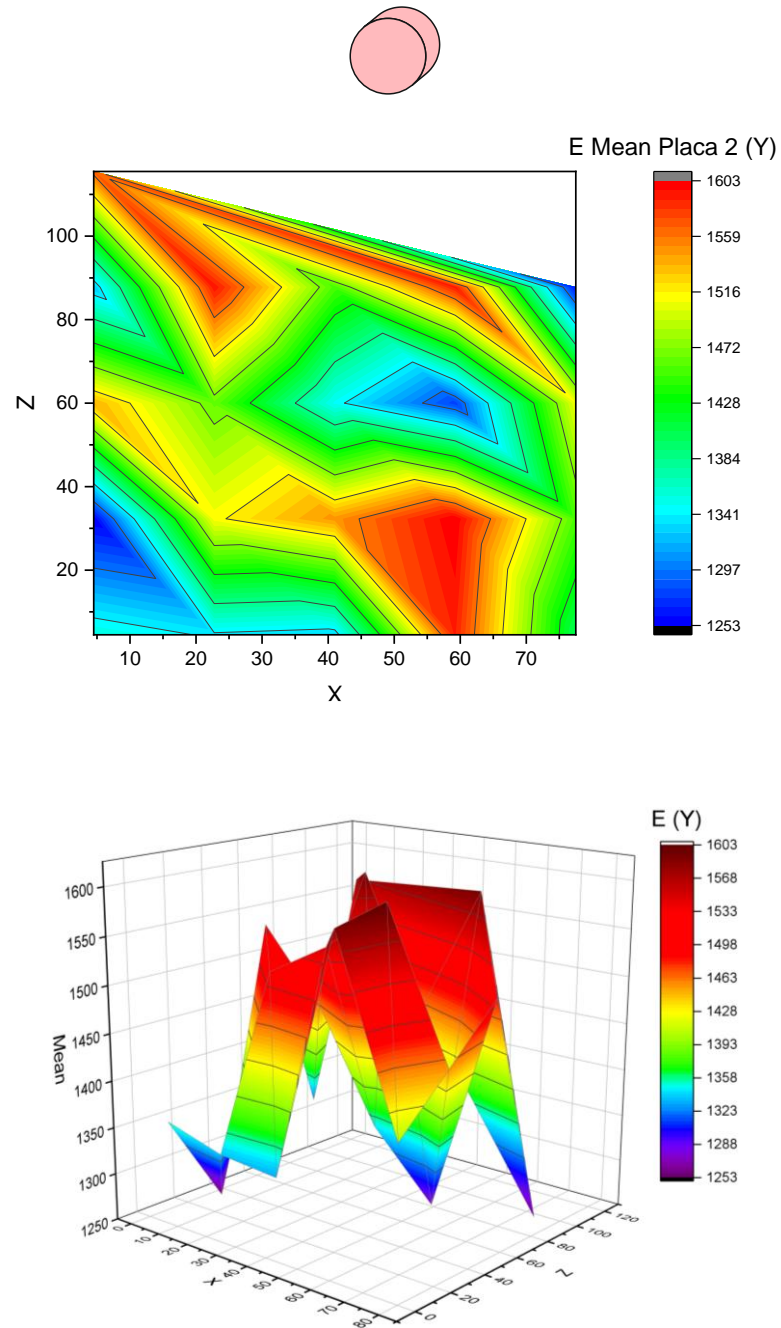


Figura 49. Resultados del valor medio de E de los discos extraídos de la Placa 2 (orientación Y).

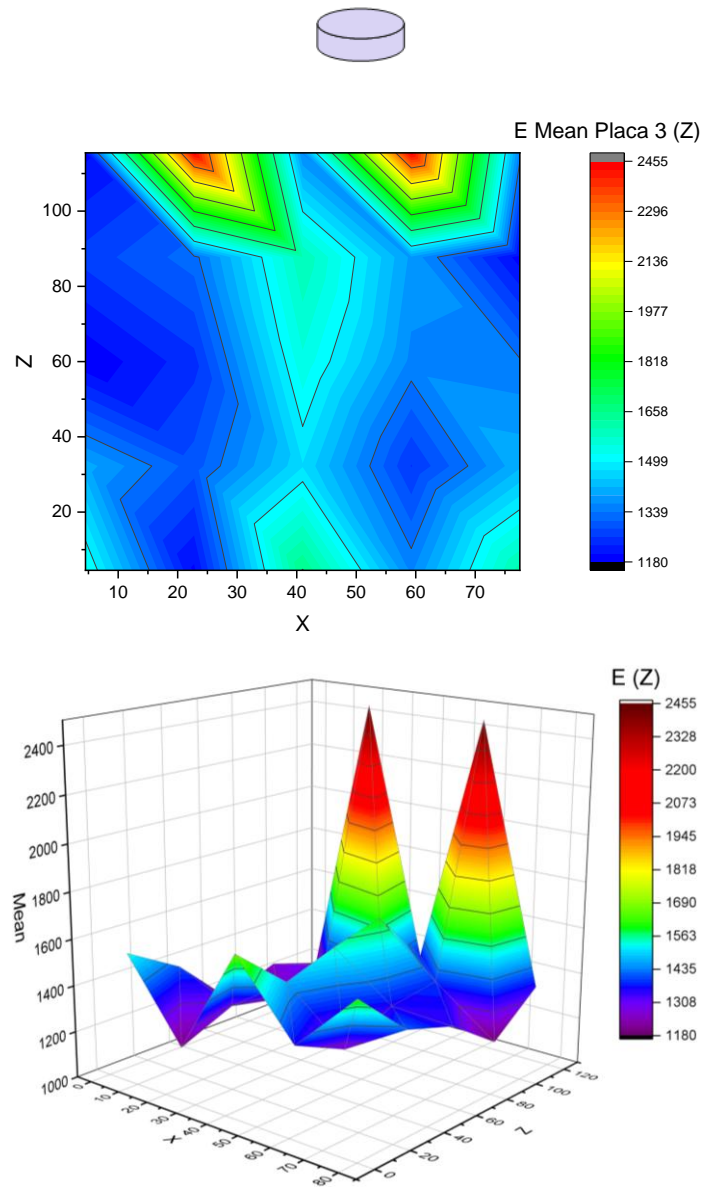


Figura 50. Resultados del valor medio de E de los discos extraídos de la Placa 3 (orientación Z).

En la Figura 51 pueden observarse los diagramas de cajas para la placa 1, en los que se aprecia que en la parte superior de la placa la ductilidad es mayor, aunque parece disminuir hacia la derecha.

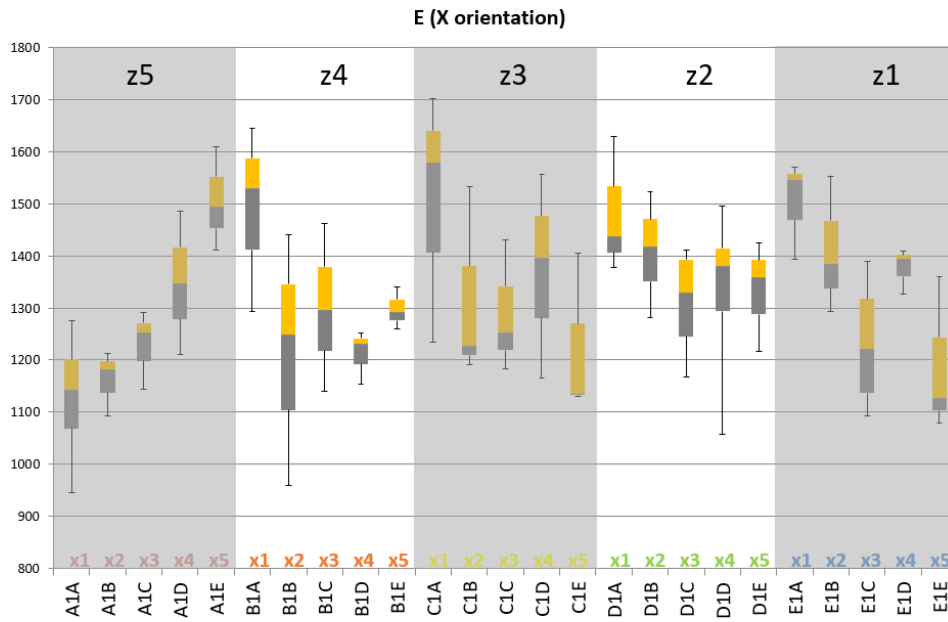


Figura 51. Diagrama de cajas del valor de E de los discos mecanizados de la Placa 1 (orientación X).

En la placa 2 (Figura 52) no pueden sacarse conclusiones claras.

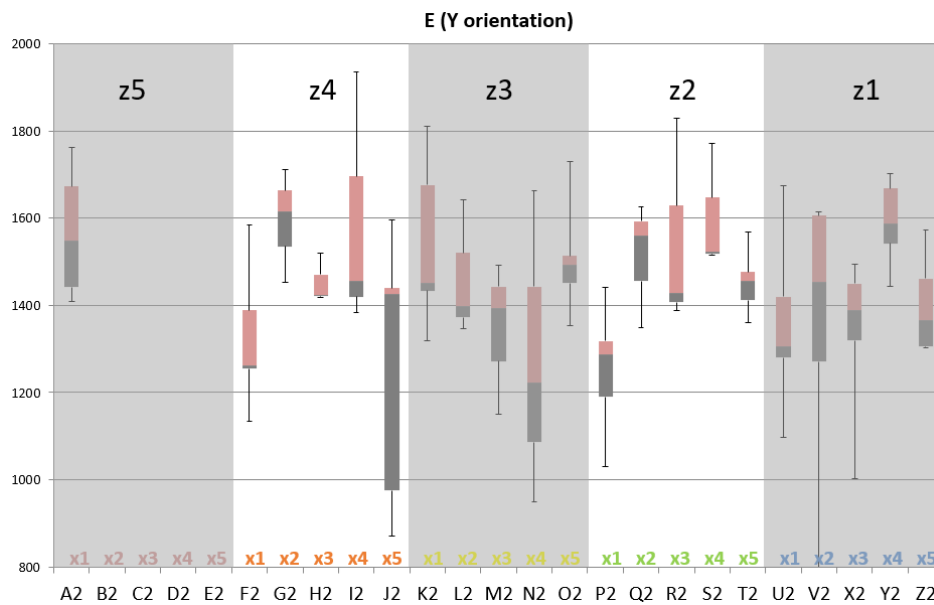


Figura 52. Diagrama de cajas del valor de E de los discos mecanizados de la Placa 2 (orientación Y).

Para la placa 3 (Figura 53) se observa alta dispersión en la parte superior de la placa como se venía comentando.

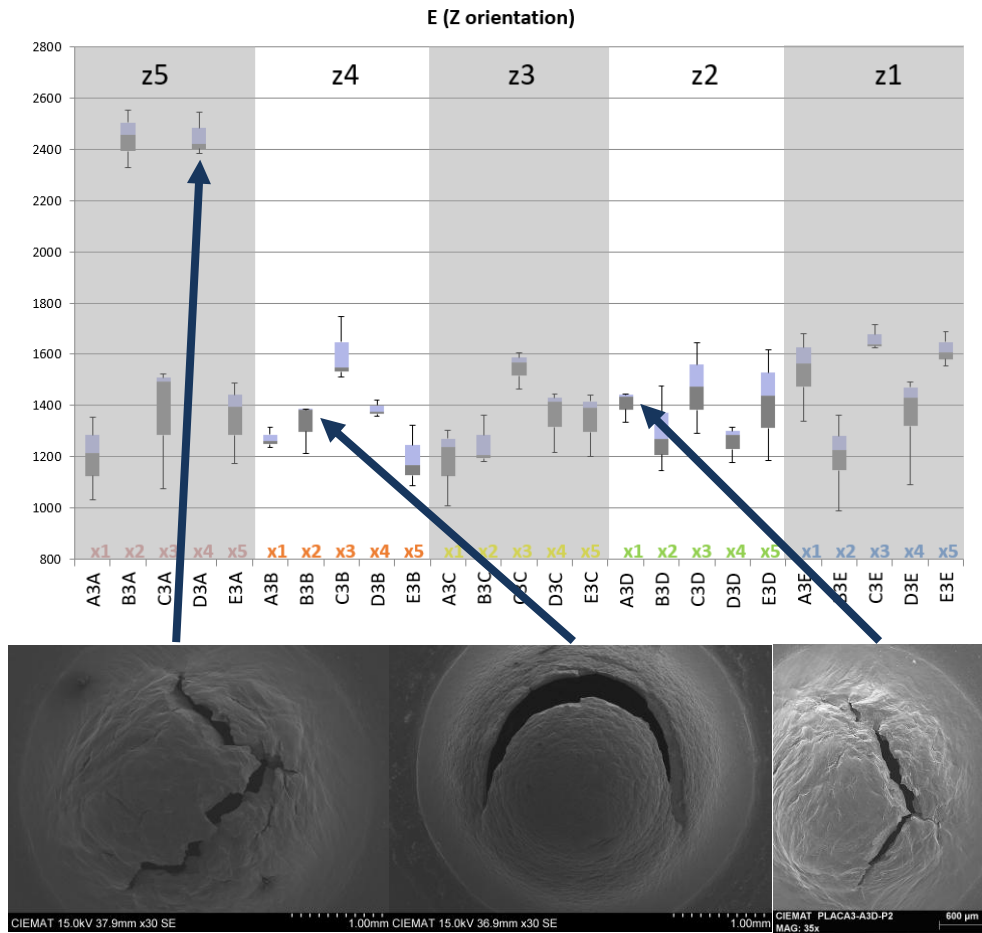
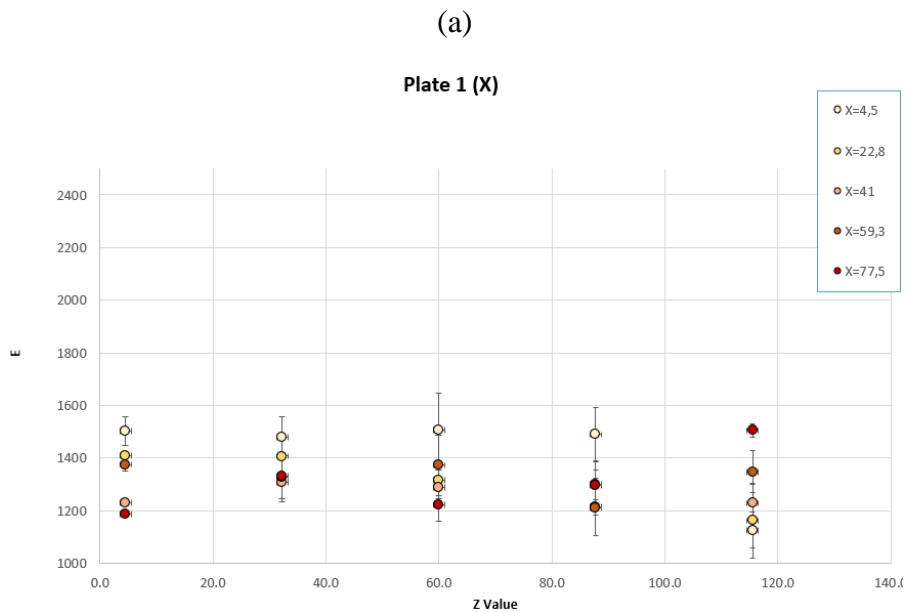


Figura 53. Diagrama de cajas del valor de E de los discos mecanizados de la Placa 3 (orientación Z) y fractografías características.

La Figura 54 muestra los valores de E en cada placa:



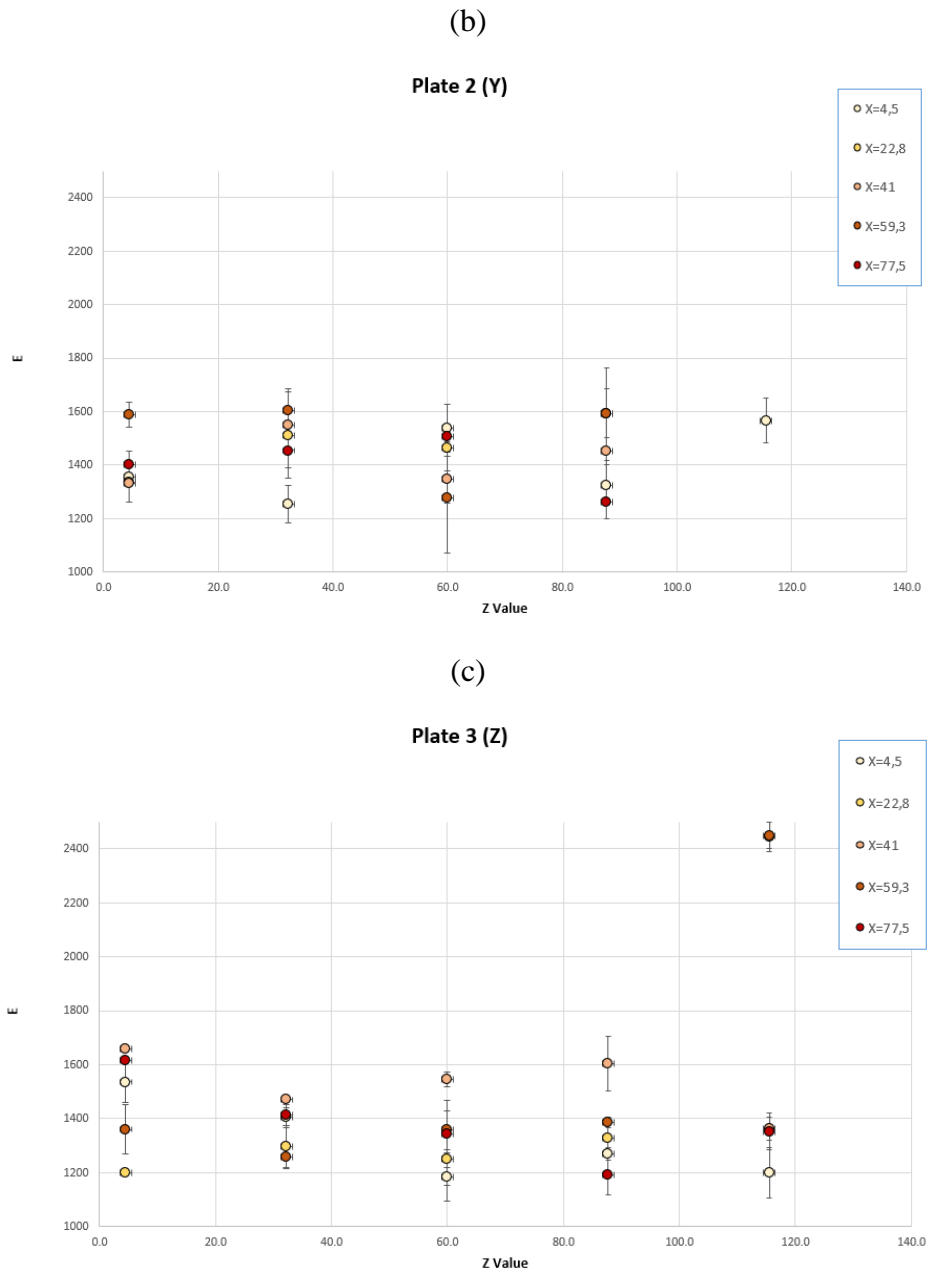


Figura 54. E de cada placa, (a) Placa 1; (b) Placa 2; (c) Placa 3.

Adicionalmente se incluyen los errores para E en cada placa como puede observarse en la Figura 55:

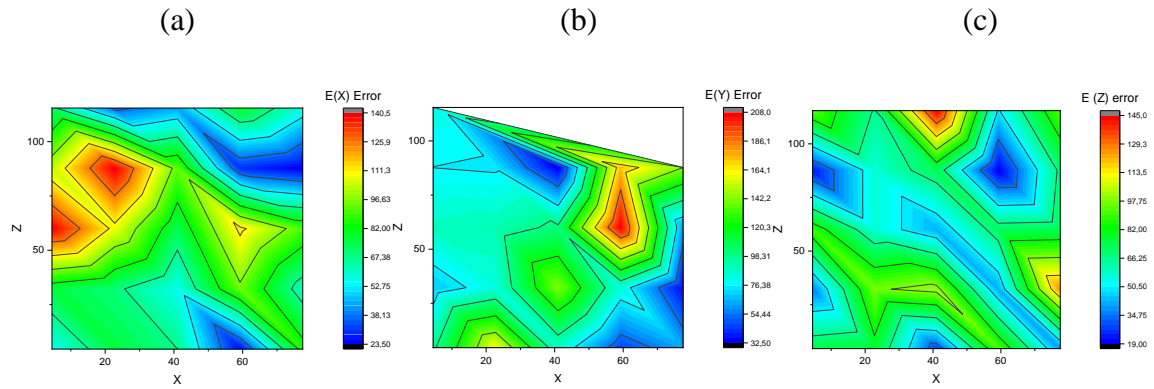





Figura 55. Errores para E de cada placa, (a) Placa 1; (b) Placa 2; (c) Placa 3.

Las tres placas muestran errores concentrados a lo largo de los ejes. En la placa 1 hay dos máximos en la parte izquierda: uno en $x = 0$ y $z = 60$, y otro en $x = 25$ y $z = 80$. En la placa 2 hay un máximo en $x = 60$ y $z = 60$; y en la placa 3, se observa un ligero aumento en la parte superior.

4.1.2 Efecto de la orientación

Las probetas ensayadas se obtienen a partir de los cilindros mecanizados de las placas. Estos cilindros se extraen en tres orientaciones:

- Placa 1: orientación X, .
- Placa 2: orientación Y, .
- Placa 3: orientación Z, .

El objetivo de extraer cilindros en distintas direcciones es analizar el efecto de la orientación con respecto a las propiedades del propio material, que se estudia a continuación.

4.1.2.1 Fuerza de transición elástico-plástica, F_e

En la Figura 56 puede observarse un aumento de F_e para valores inferiores a z , tanto en la orientación X como en la Y. Los resultados de la orientación Z presentan un valor elevado hacia la parte central de la placa.

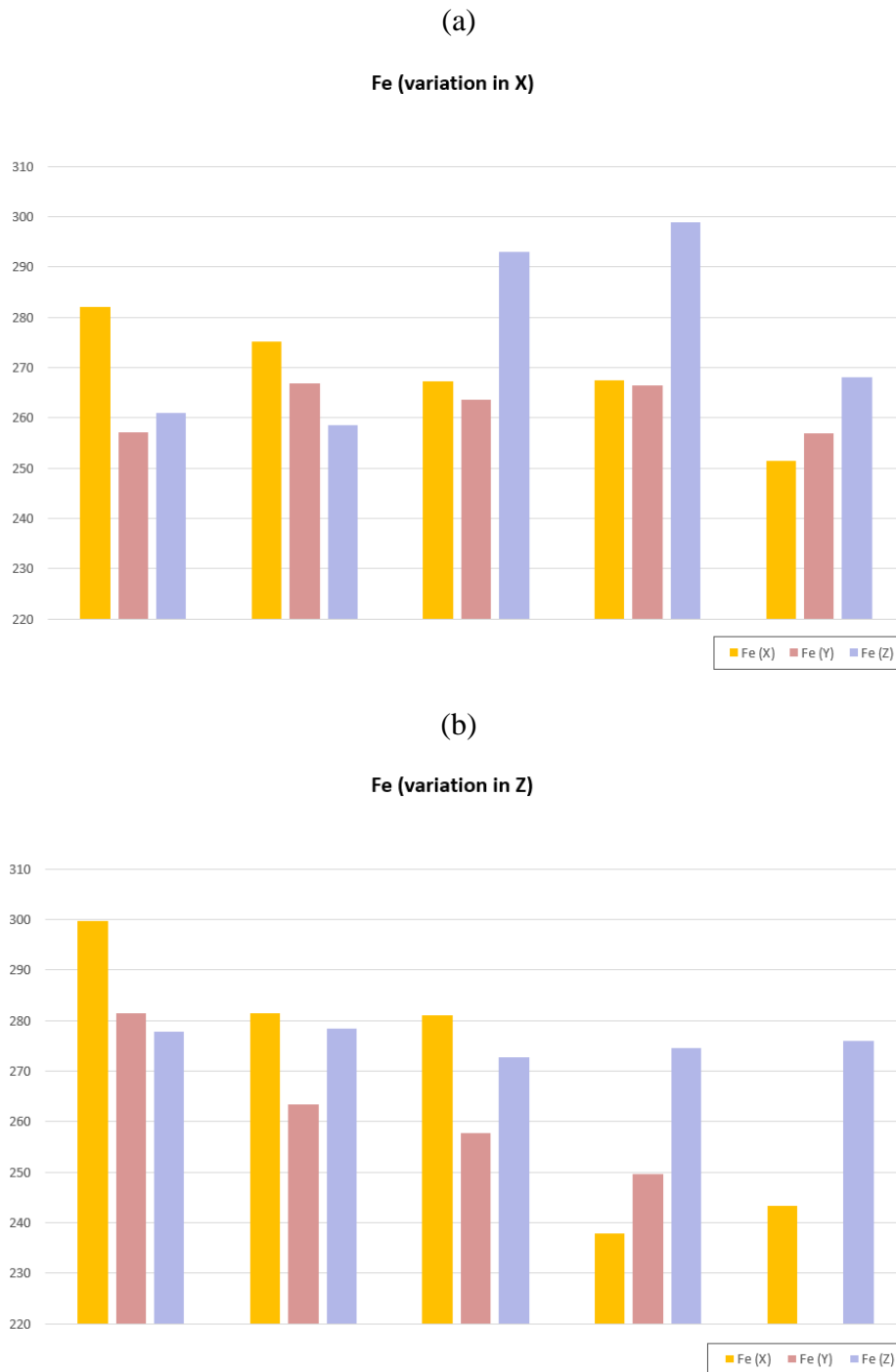


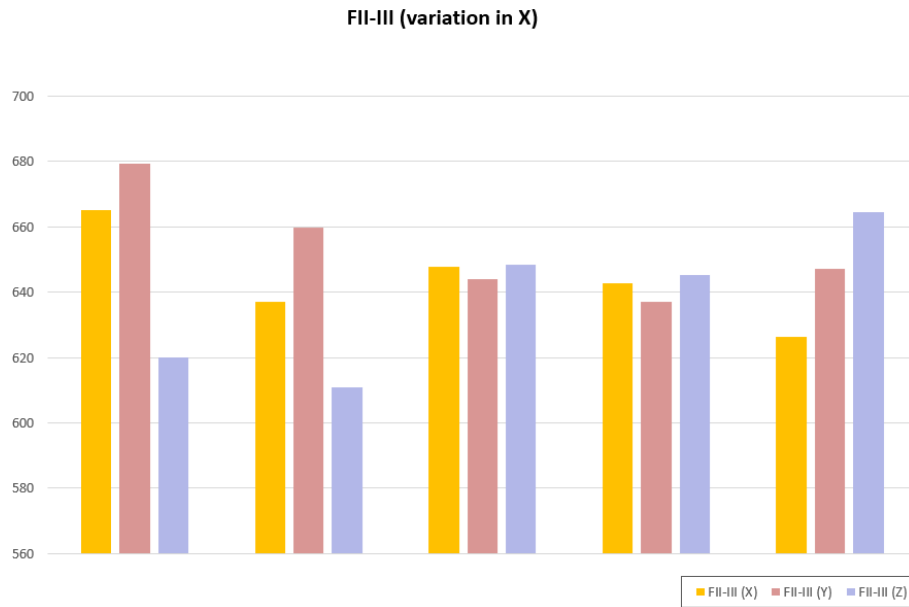
Figura 56. Efecto de orientación en F_e , (a) Con variación en X; (b) Con variación en Z.

4.1.2.2 Fuerza de inestabilidad plástica entre las zonas II y III, F_{II-III}

En la Figura 57 puede observarse un aumento de F_{II-III} para valores inferiores a z, tanto en la orientación X como en la Y. Los resultados de la orientación Z presentan un

valor elevado hacia la parte central de la placa. Los resultados de la orientación Z presentan un valor elevado hacia la parte derecha de la placa.

(a)



(b)

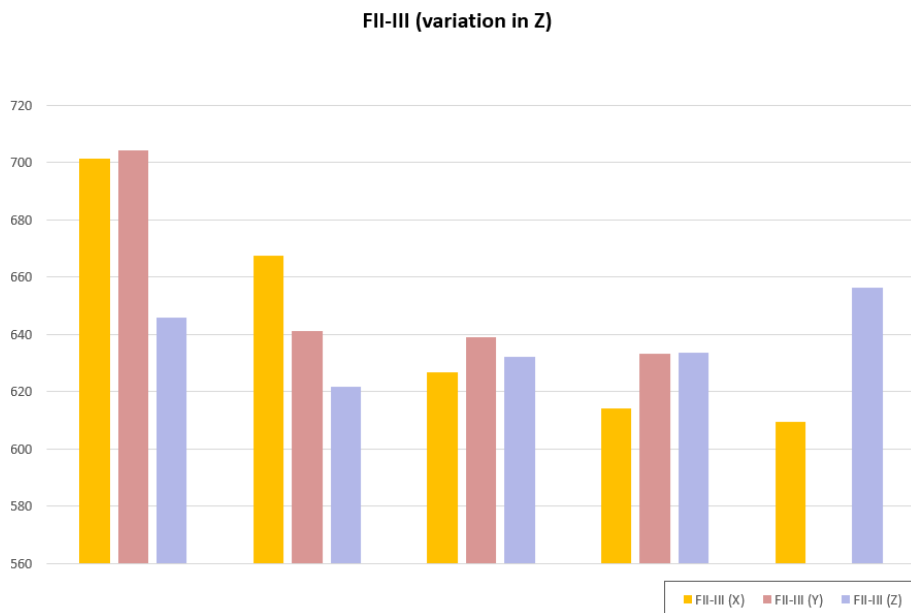


Figura 57. Efecto de orientación en F_{II-III} , (a) Con variación en X; (b) Con variación en Z.

4.1.2.3 Energía de ensayo, E

De la Figura 58 puede observarse que la placa presenta mayor ductilidad en la parte central de la dirección Z.

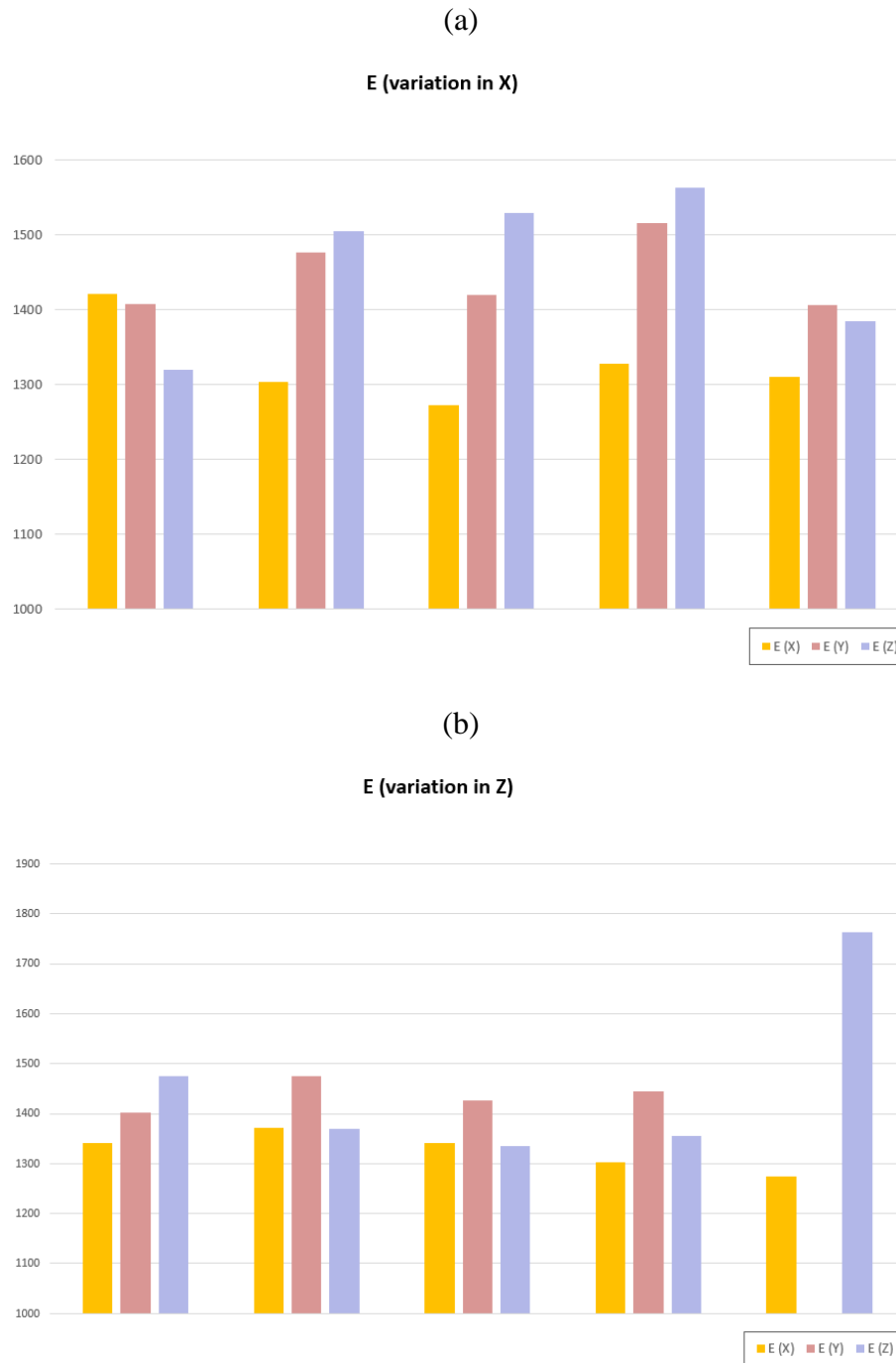


Figura 58. Efecto de orientación en E , (a) Con variación en X; (b) Con variación en Z.

4.1.3 Historia térmica

La variabilidad de las cargas térmicas en las paredes hace necesario su estudio, ya que afecta a las propiedades mecánicas del material y, por ende, a sus posibles aplicaciones.

Se observa mayor resistencia y menor elongación en las probetas más cercanas a la base debido a los ciclos térmicos, en los que se produce un enfriamiento rápido en la parte inferior de las placas causado por la extracción de calor de la placa base. A medida que se produce un aumento en el eje Z, la pared comienza a calentarse, lo que provoca una reducción del límite elástico y un aumento de la elongación.

4.1.4 Medida de Tensiones Residuales

El ensayo triaxial empleado para la obtención de medidas fue llevado a cabo sobre la superficie y también se realizó una medida a 200 μm de profundidad tras realizar electropulido. Las medidas en superficie salieron correctas, pero en profundidad se observa mucha anisotropía que hace que las medidas con la técnica de difracción no sean válidas, lo cual va a demostrarse a continuación. Además, este problema suele aparecer en piezas creadas por fabricación aditiva.

Se incluyen dos picos de difracción a diferentes inclinaciones para que se pueda ver (sobre todo en el caso de la medida en profundidad) la alta textura del material, dado que las intensidades son muy diferentes. Además, ha de tenerse en cuenta que cuanto mayor es la altura del pico (más intenso), mayores son los granos que están orientados en esa dirección. Si en una dirección hay más granos orientados que en otra se puede observar que el material presenta textura.

Medidas sobre la superficie inicial de la muestra (relación de intensidades = 2,84)

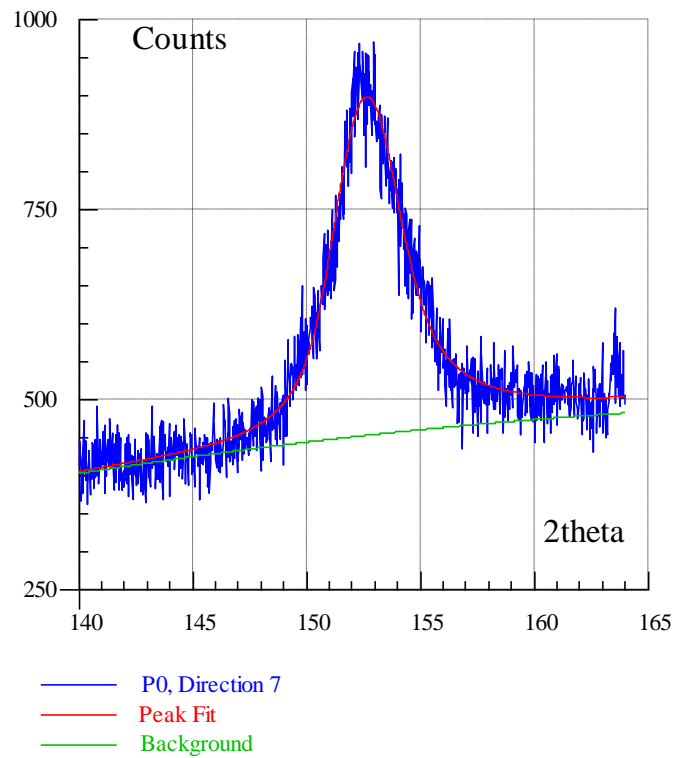


Figura 59. Pico de difracción en la superficie de la muestra en los ángulos $PHI = 0^\circ$ y $PSI = 0^\circ$.

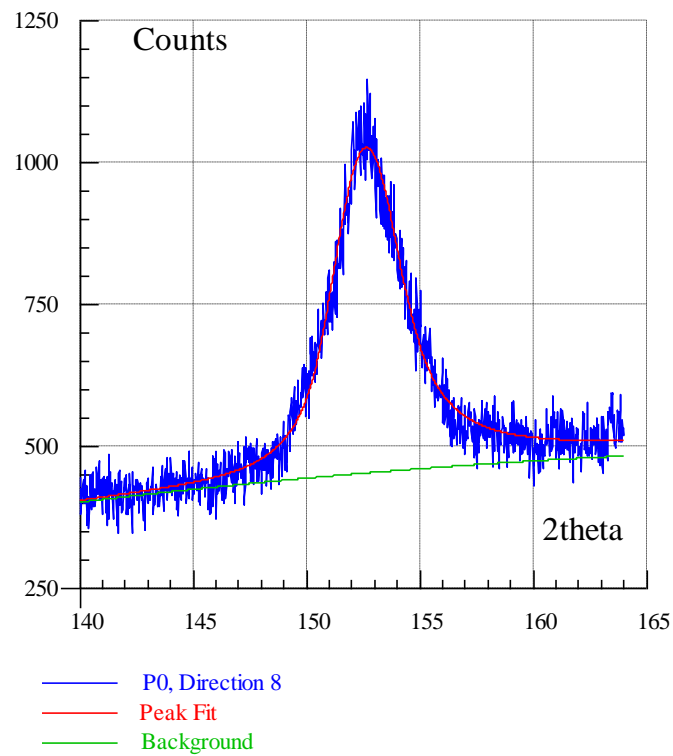


Figura 60. Pico de difracción en la superficie de la muestra en los ángulos $PHI = 0^\circ$ y $PSI = -10,52^\circ$.

Medidas en profundidad, una vez hecho el electropulido (relación de intensidades = 12,45)

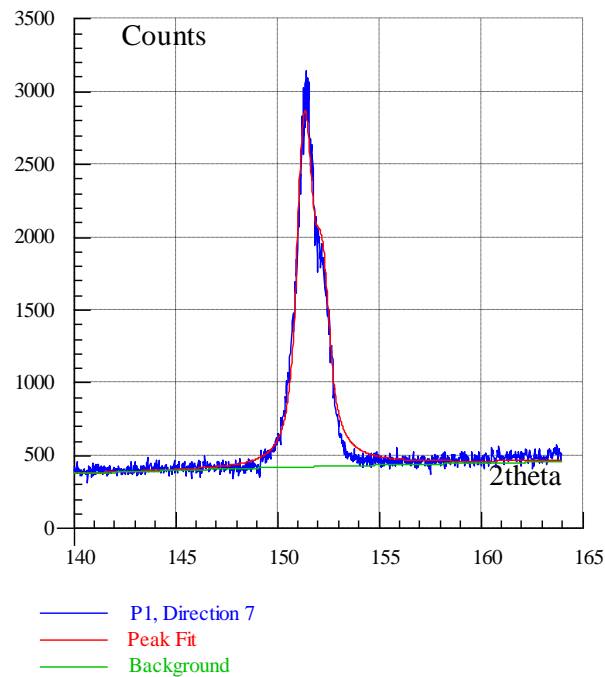


Figura 61. Pico de difracción en la superficie de la muestra en los ángulos $PHI = 0^\circ$ y $PSI = 0^\circ$.

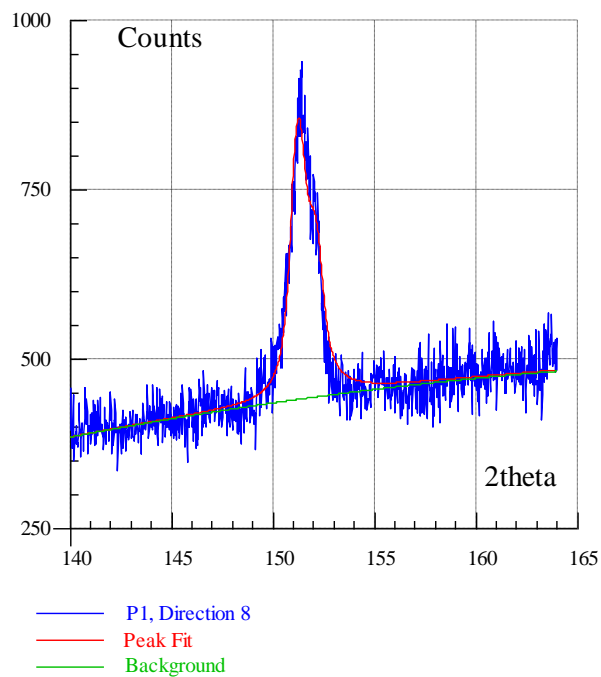


Figura 62. Pico de difracción en la superficie de la muestra en los ángulos $PHI = 0^\circ$ y $PSI = -10,52^\circ$.

Con ello puede justificarse que por la naturaleza del material no es posible medir tensiones residuales por difracción de rayos X, ya que se obtienen valores de la relación de

intensidades muy elevados. También puede afirmarse que se trata de un material muy texturizado.

4.2 Machine Learning

El análisis de datos mediante técnicas de aprendizaje no supervisado ha sido realizado en colaboración entre la División de Materiales de Interés Energético, en la que se engloba este proyecto, y la División de Tecnología de la Información y Comunicaciones, con Andrés de Bustos Molina y Rafael Mayo García.

Las ventajas principales de este enfoque es la eficiencia computacional y la escalabilidad, pero tiene dos limitaciones principales: sensibilidad a la colocación inicial de centroides y la necesidad de preseleccionar el número de grupos. Esto introduce sesgo, que queda ejemplificado en la Figura 63.

Se trata de dos histogramas normalizados (PDFs) de cada una de las 6 variables experimentales, indicando los cuantiles. Estas 6 variables son los parámetros de interés de los ensayos de *Small Punch*: F_e ISO (intersec), F_e ASTM (proj), u_m , F_m , F_{II-III} y E . Su representación se refiere al procesamiento de los 240 ensayos por Marta Serrano García y por mí, lo que permite apreciar el sesgo humano en la interpretación de datos. Estos datos son los mismos, así como las técnicas de procesado. Lo único que cambia es la persona que los procesa. Adicionalmente se observa que F_e ISO (intersec) y E son muy independientes.

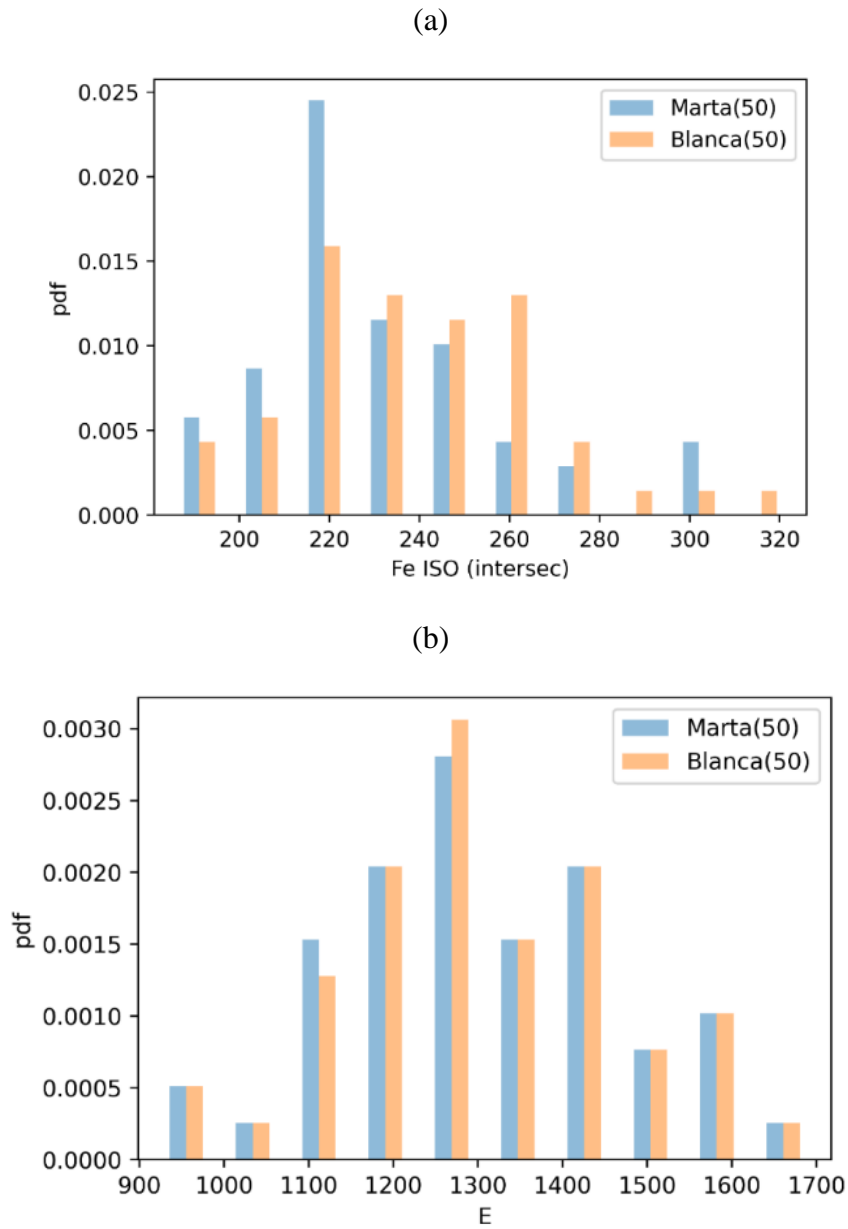


Figura 63. (a), (b): Histogramas normalizados con cuantiles.

Se incluye también la matriz de correlación de las variables en la Figura 64:

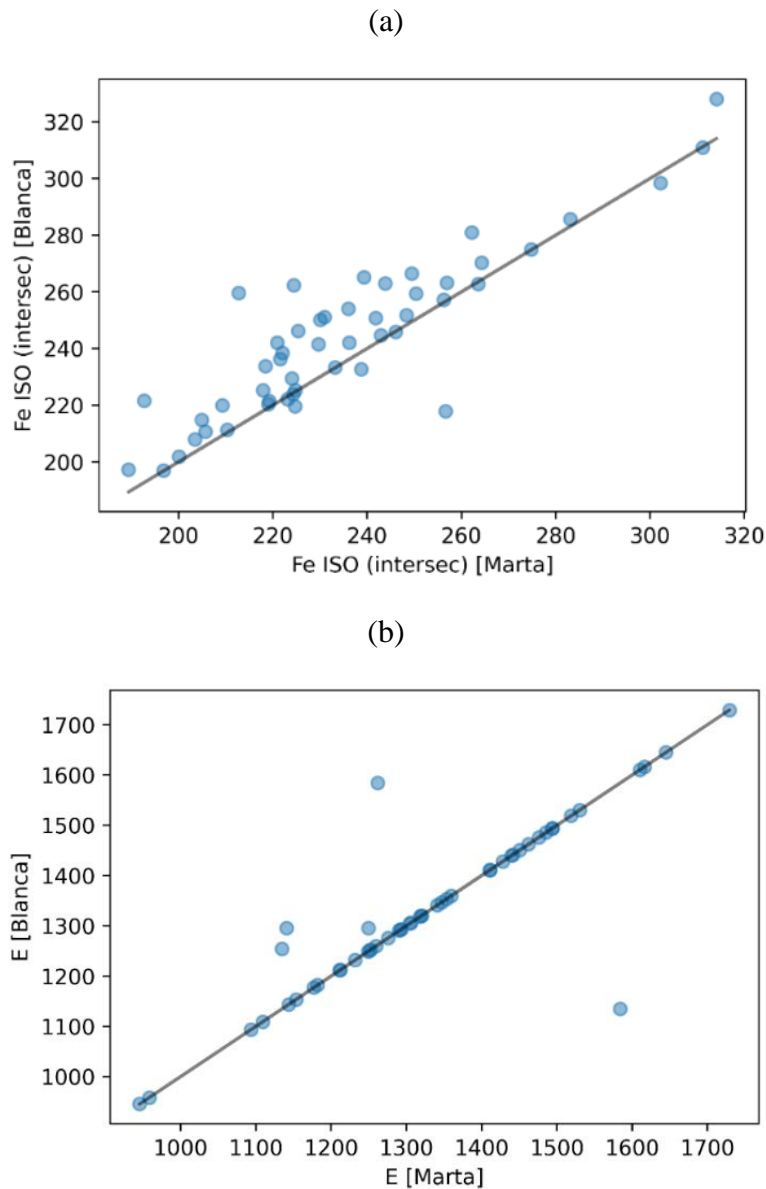


Figura 64. (a), (b): Matriz de correlación de las variables.

En cuanto a la selección de *clusters*, se han explorado números de grupos desde 0 hasta 25. Lo que agrupa a los *clusters* es una distancia definida entre cada uno de los elementos que se tienen (cada uno de los ensayos). Cada ensayo viene representado por un vector de 6 variables, y dos experimentos serán parecidos si sus dos vectores están cerca en R^6 . Si son parecidos, probablemente acaben en el mismo *cluster*.

Para evitar problemas con las unidades y dispersión de cada una de las 6 variables, estas están normalizadas por separado para tener media cero y desviación típica 1. Las 6 variables son las mencionadas previamente y todas ellas se tienen en cuenta para determinar los *clusters*.

La determinación del número óptimo de grupos se lleva a cabo con el método del codo (*elbow method*) [28] mediante la ecuación (3.4) Esta métrica disminuye monótonamente con el aumento de k, con el número óptimo de grupos apareciendo en un “punto de codo”, donde la tasa de disminución cambia notablemente.

En este caso, es en el punto 15 (Figura 65) donde puede observarse la disminución de la tasa.

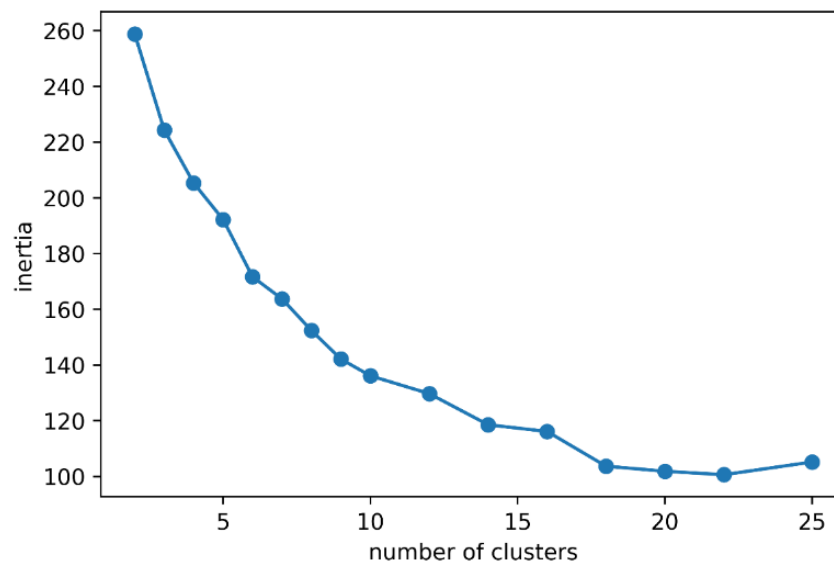


Figura 65. Método del codo para la determinación de la disminución de la tasa.

Para la visualización se utiliza t-SNE (*t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding*), descrita anteriormente, y asegura que los puntos que son similares en el espacio de alta dimensión permanezcan cercanos en la representación reducida [29].

En las figuras siguientes se muestran los resultados obtenidos:

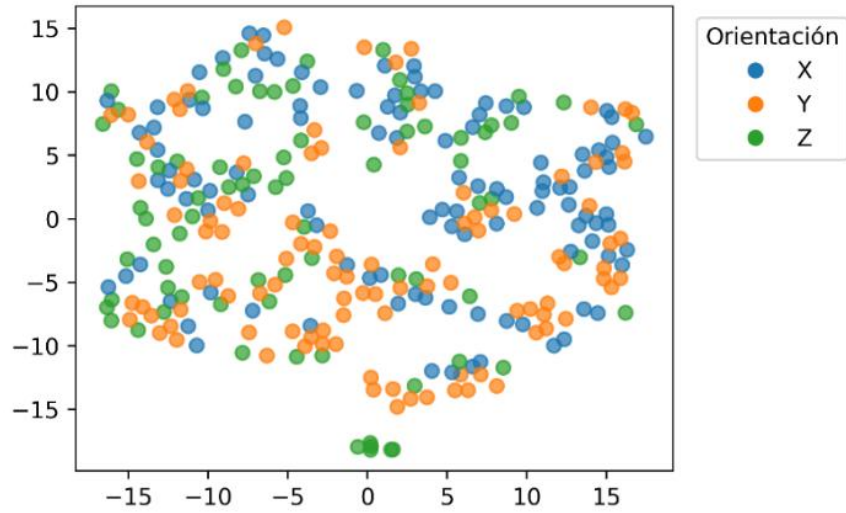


Figura 66. tSNE para las orientaciones X, Y, Z.

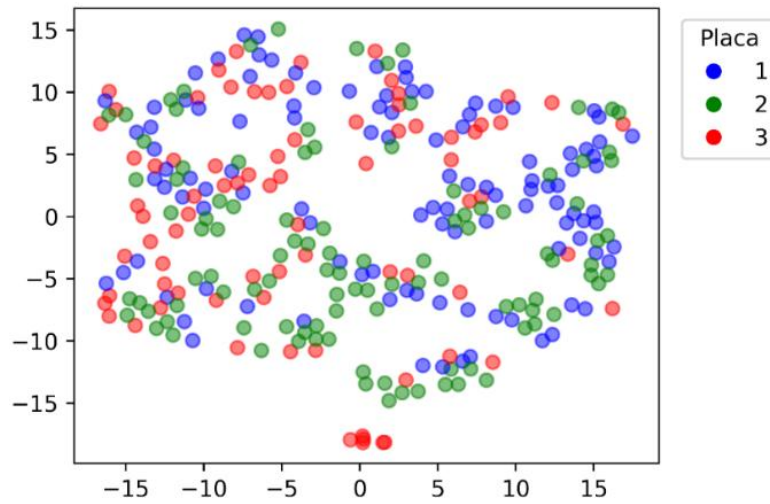


Figura 67. tSNE para las placas.

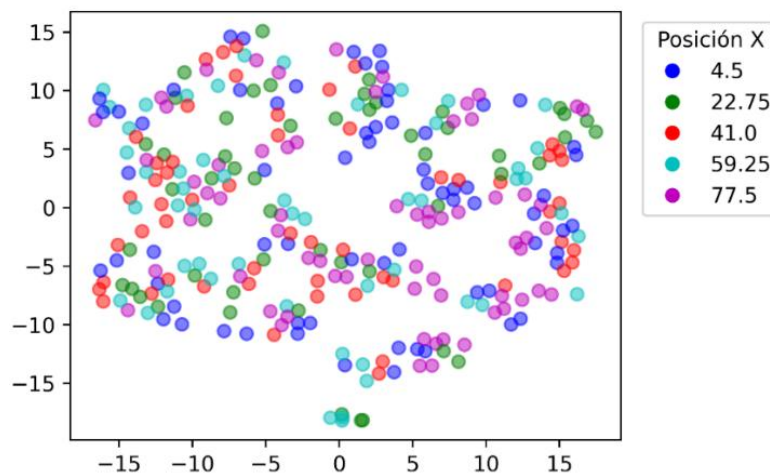


Figura 68. tSNE para la posición X.

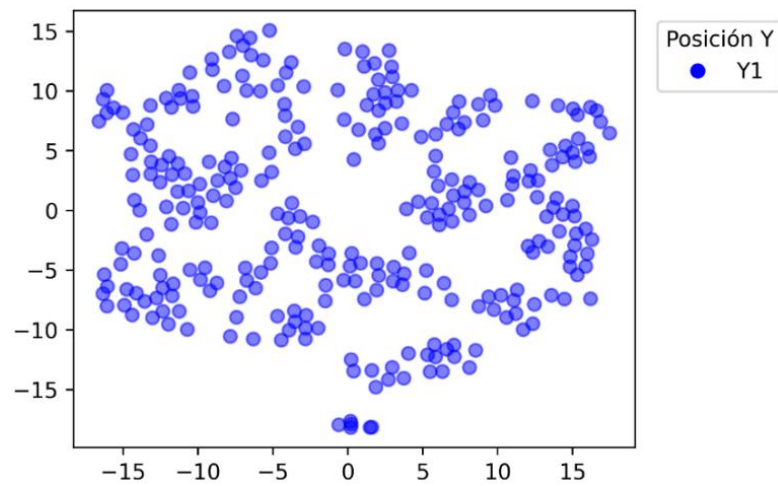


Figura 69. tSNE para la posición Y.

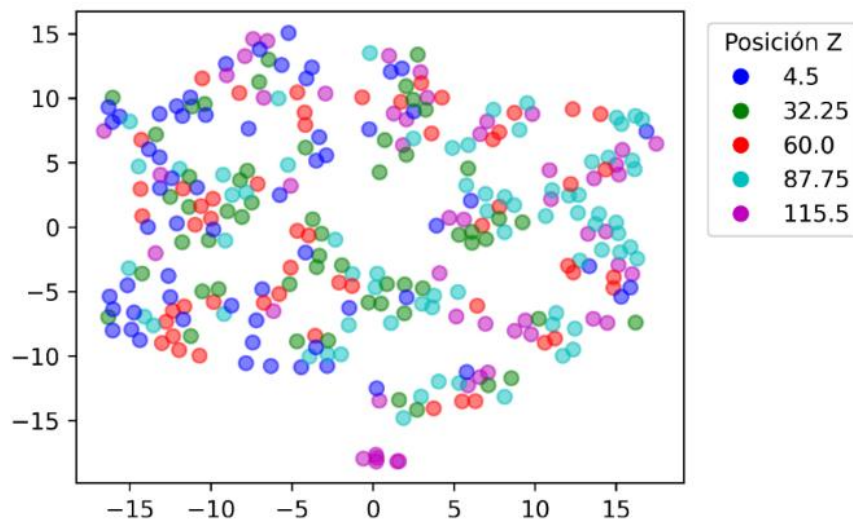


Figura 70. tSNE para la posición Z.

Como puede verse en las figuras, hay una gran dispersión, por lo que no existen agrupaciones claras. Esto puede compararse con la Figura 71, que es una distribución característica de *clusters* siguiendo el mismo método.

Unsupervised clustering

Centroid ■ ■

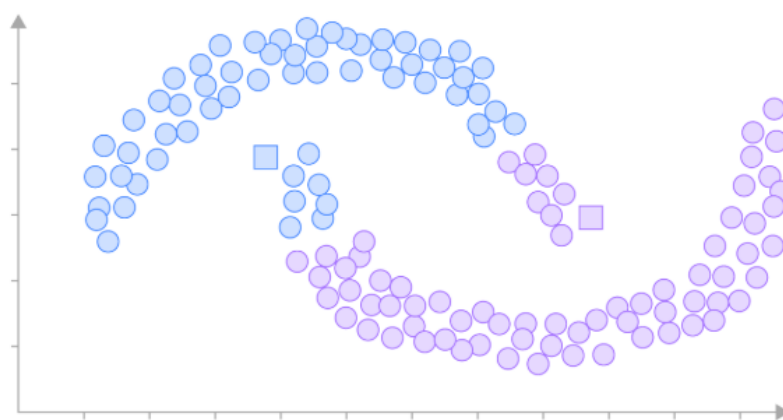


Figura 71. Distribución característica de *clusters* [30].

5 Conclusiones

La variabilidad de tres placas de acero de 316L fabricadas por DED (*Directed Energy Deposition*) es estudiada mediante el ensayo de *Small Punch*, técnicas estadísticas avanzadas y el uso de métodos de aprendizaje no supervisado para determinar criterios de aceptabilidad.

Las tres placas son fabricadas con el mismo material y bajo las mismas condiciones, con la única diferencia en la placa 2, en la que el proceso sufrió una interrupción a mitad de camino para rellenar la tolva de polvo.

En el estudio de la propiedades mecánicas con respecto a los parámetros de interés F_e , F_{II-III} y E pueden sacarse las siguientes conclusiones con respecto al efecto de la posición.

En el caso de la fuerza de transición elástico-plástica, F_e , se observa un aumento para valores menores de z , tanto en la orientación X como en la Y. La orientación Z presenta valores más elevados en la parte central de la placa.

En cuanto a la fuerza de inestabilidad plástica entre las zonas II y III, F_{II-III} , las orientaciones X e Y también presentan valores más elevados en la parte inferior de la placa, mientras que la orientación Z presenta una gran dispersión, especialmente en la parte superior derecha.

Para una energía de ensayo pequeña, E , la ductilidad en la orientación X es mayor en la parte izquierda y superior derecha de la placa, pero menor hacia la derecha. En la orientación Y no se pueden extraer conclusiones claras y en la Z se observa una gran dispersión en la parte superior.

El efecto de la orientación muestra que en X e Y las resistencias son similares, mientras que para la diferencia en Z no se ha encontrado una explicación clara, ya que el proceso de fabricación de las paredes es el mismo. Además, las placas se radiografiaron previo a ensayo para descartar defectos graves y no se detectaron grietas ni porosidad.

Tampoco una diferencia visible en la placa 3 y, aunque la parte superior de las placas siempre sufre recalentamiento, debería poder observarse en las tres placas, no solo en esta. La única explicación que podría darse es que el recalentamiento incide más en la placa 3 debido a la orientación, que implica una tracción entre capas y la hace más débil.

En relación a la historia térmica, se observa mayor resistencia y menor elongación en las probetas más cercanas a la base debido a los ciclos térmicos, en los que se produce un enfriamiento rápido en la parte inferior de las placas causado por la extracción de calor de la placa base. A medida que se produce un aumento en el eje Z, la pared comienza a calentarse, lo que provoca una reducción del límite elástico y un aumento de la elongación.

Estos resultados están respaldados por la medida de tensiones residuales y la aplicación de métodos de aprendizaje no supervisado, ya que ambas técnicas indican una gran dispersión en sus propiedades. Así, la elevada anisotropía de las placas ensayadas hace necesaria la realización de más estudios en el campo de la fabricación aditiva por el método DED para garantizar las condiciones de seguridad exigidas en su desempeño nuclear.

6 Trabajos futuros

El análisis de la variabilidad de las propiedades mecánicas de una placa de 316L fabricada por DED (*Directed Energy Deposition*) se ha llevado a cabo a partir de los datos obtenidos con el ensayo de *Small Punch*. Estos datos se han procesado mediante el uso de análisis estadístico y *Machine Learning*.

De cara a una futura investigación, se propone integrar los Mapas Auto-Organizados (*Self-Organising Maps*, SOMs) como una herramienta complementaria al análisis de agrupamiento de datos utilizado.

Los SOMs son redes neuronales artificiales que crean representaciones simplificadas de datos complejos conservando las relaciones entre muestras, que permite tanto la reducción de dimensionalidad de los datos, como el descubrimiento natural de patrones sin parámetros de *clustering* predeterminados [31].

Una ventaja clave de los SOMs sobre el enfoque actual de *K-means* es su capacidad para revelar agrupaciones de forma natural. Mientras que actualmente se utiliza el método del codo para determinar el número de *clusters*, los SOMs muestran automáticamente patrones de datos a través de sus propiedades topológicas. Esto elimina el sesgo de la selección manual de grupos y permite un descubrimiento más orgánico de patrones de datos [32].

Existen numerosas aplicaciones prácticas para los SOMs en esta investigación, como podría ser la creación de mapas de propiedades de materiales en los que materiales similares se agrupen en la cuadrícula SOM, facilitando así la identificación de familias de materiales con comportamientos comparables. Al analizar nuevos materiales, su posición en el mapa podría sugerir, de manera instantánea, propiedades basadas en la proximidad a materiales conocidos. Esta agrupación natural podría revelar relaciones inesperadas que podrían pasarse por alto con el enfoque actual de agrupamiento predeterminado.

La combinación de SOMs con el análisis estadístico y de clustering realizado en este proyecto proporcionaría una comprensión más completa de los datos obtenidos en los

ensayos realizados puesto que, aunque el enfoque actual ofrece agrupaciones cuantitativas claras, los SOMs añadirían perspectivas cualitativas a través de su visualización de variaciones continuas de propiedades y formación natural de grupos. La naturaleza visual de los SOMs también haría que los resultados obtenidos fueran más fáciles de entender y representar.

7 Referencias

- [1] D. D'Andrea, «Additive Manufacturing of AISI 316L Stainless Steel: A Review», *Metals*, vol. 13, n.º 8, p. 1370, jul. 2023, doi: 10.3390/met13081370.
- [2] J. Bedmar, A. Riquelme, P. Rodrigo, B. Torres, y J. Rams, «Comparison of Different Additive Manufacturing Methods for 316L Stainless Steel», *Materials*, vol. 14, n.º 21, p. 6504, oct. 2021, doi: 10.3390/ma14216504.
- [3] V. Nen-En, «Metalen - Miniatuur drukproef Metallic materials - Small punch test method».
- [4] J. Torres y A. P. Gordon, «Mechanics of the small punch test: a review and qualification of additive manufacturing materials», *J. Mater. Sci.*, vol. 56, n.º 18, pp. 10707-10744, jun. 2021, doi: 10.1007/s10853-021-05929-8.
- [5] D.-G. Ahn, «Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art», *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, vol. 8, n.º 2, pp. 703-742, mar. 2021, doi: 10.1007/s40684-020-00302-7.
- [6] A. Stoll y P. Benner, «Machine learning for material characterization with an application for predicting mechanical properties», *GAMM-Mitteilungen*, vol. 44, n.º 1, p. e202100003, mar. 2021, doi: 10.1002/gamm.202100003.
- [7] J. K. L. Lai, C. H. Shek, y K. H. Lo, *Stainless Steel: An Introduction and Their Recent Developments*. Bentham eBooks, 2012.
- [8] J. Peng, K. Li, Q. Dai, G. Gao, Y. Zhang, y W. Cao, «Estimation of mechanical strength for pre-strained 316L austenitic stainless steel by small punch test», *Vacuum*, vol. 160, pp. 37-53, feb. 2019, doi: 10.1016/j.vacuum.2018.11.015.
- [9] J. Donovan y M. Klingenboeck, «La energía nucleoelectrica en el siglo XXI».
- [10] World Nuclear Association, «Economía de la energía nuclear».

- [11] S. J. Zinkle y G. S. Was, «Materials challenges in nuclear energy», *Acta Mater.*, vol. 61, n.º 3, pp. 735-758, feb. 2013, doi: 10.1016/j.actamat.2012.11.004.
- [12] Á. Rodríguez-Prieto, A. Camacho, y M. Sebastián, «Análisis de la regulación y de los distintos códigos de fabricación de vasijas de reactor en la industria nuclear», pp. 50-55, 2016.
- [13] ISO/ASTM 52900:2021, *Additive Manufacturing-General Principles-Fundamentals and vocabulary*, Ginebra, Suiza., 2021.
- [14] A. Ozols, «Producción y caracterización de polvos metálicos obtenidos por atomización y enfriado rápido», Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 1998.
- [15] E. M. Ruiz-Navas, C. Edil Da Costa, F. Velasco López, y J. M. Torralba Castelló, «Aleación mecánica: Método de obtención de polvos metálicos y de materiales compuestos», *Rev. Metal.*, vol. 36, n.º 4, pp. 279-286, ago. 2000, doi: 10.3989/revmetalm.2000.v36.i4.578.
- [16] D. Svetlizky *et al.*, «Directed Energy Deposition (DED) Additive Manufacturing: Physical Characteristics, Defects, Challenges and Applications», *Mater. Today*, vol. 49, pp. 271-295, oct. 2021, doi: 10.1016/j.mattod.2021.07.005.
- [17] Y. Zhang *et al.*, «Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review», *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, n.º 1, pp. 1-13, ene. 2018, doi: 10.1007/s11665-017-2747-y.
- [18] ASTM F3187-16, *Standard guide for directed energy deposition of metals*, West Conshohocken, PA., 2016.
- [19] UNE-EN 15305. *Ensayos no destructivos. Método de ensayo para el análisis de la tensión residual por difracción de rayos X.*, 2010.
- [20] ASTM E8, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, United States of America., 2004.
- [21] ISO 6892-1:2020, *Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature*, 2020.
- [22] D. T. Pham, S. S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov, y K. Popov, «Micro-EDM—recent developments and research issues», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, n.º 1-3, pp. 50-57, jun. 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.008.

- [23] D. P. Gallego, J. R. Hervías, y D. A. C. Franco, «GENERACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES DE CORTADURA MEDIANTE TORSIÓN».
- [24] S. H. C. DuToit, *Graphical exploratory data analysis*. Springer, 2012.
- [25] A. Burkov, *The Hundred-Page Machine Learning Book*. 2019.
- [26] J. Cervantes, F. Garcia-Lamont, L. Rodríguez-Mazahua, y A. Lopez, «A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends», *Neurocomputing*, vol. 408, pp. 189-215, sep. 2020, doi: 10.1016/j.neucom.2019.10.118.
- [27] J. Cervantes, X. Li, y W. Yu, «Support Vector Machine Classification Based on Fuzzy Clustering for Large Data Sets», en *MICAI 2006: Advances in Artificial Intelligence*, vol. 4293, A. Gelbukh y C. A. Reyes-Garcia, Eds., en *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4293. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 572-582. doi: 10.1007/11925231_54.
- [28] H. Humaira y R. Rasyidah, «Determining The Appropriate Cluster Number Using Elbow Method for K-Means Algorithm», en *Proceedings of the Proceedings of the 2nd Workshop on Multidisciplinary and Applications (WMA) 2018, 24-25 January 2018, Padang, Indonesia, Padang, Indonesia: EAI, 2020*. doi: 10.4108/eai.24-1-2018.2292388.
- [29] L. van der Maaten y G. Hinton, «Visualizing Data using t-SNE», *Journal of Machine Learning Research* 9, pp. 2579-2605, nov. 2008.
- [30] IBM, «¿Qué es el clustering?» [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/clustering>
- [31] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation (2nd Edition)*. Prentice-Hall, 1999.
- [32] Y. Liu, R. H. Weisberg, y C. N. K. Mooers, «Performance evaluation of the self-organizing map for feature extraction», *J. Geophys. Res. Oceans*, vol. 111, n.º C5, p. 2005JC003117, may 2006, doi: 10.1029/2005JC003117.

Apéndice A

Gráficas características de ensayo

Probeta Placa 1: A1A P1



General

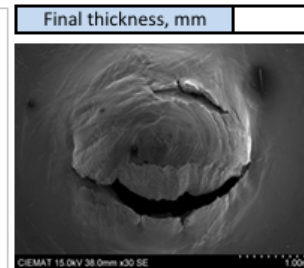
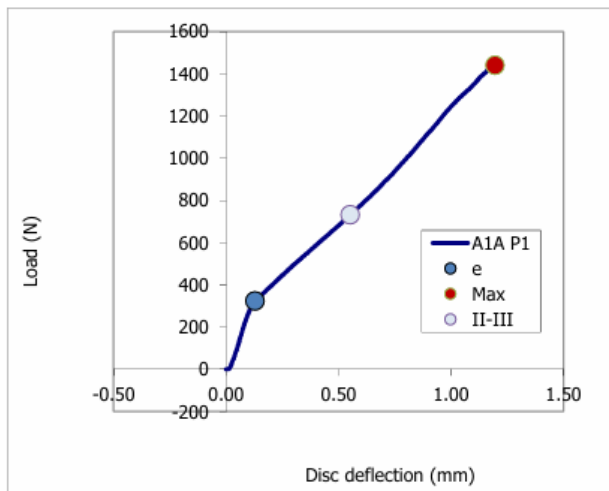
Responsible	M. Serrano	Project Name	AIMEN
Technician	D. Plaza	Project Nº	
Material	A1A	Date	Mar-23
Specimen ID	A1A P1	Temperature (°C)	20

Specimen and testing details

Disc diameter, d1 (mm)	8.00		Disc thickness, h (mm)			
Punch/ball	Punch	Material				
Punch tip/ball radius, r (mm)	0.50					
Punch/Ball Supplier						
Specimen Holder ID						
Receiving die diameter, d2 (mm)	0.75					
Chamfer, l	0.20	Radius			Angle	45
Punch velocity (m/s)						

Results

Elastic plastic transition			II-III			Max		
Deflect	Load	Energy	Deflect	Load	Energy	Deflect	Load	Energy
mm	N	Nmm	mm	N	Nmm	mm	N	Nmm
0.13	323.08	0.00	0.55	731.25	244.28	1.20	1439.75	945.59



Probeta Placa 2: U2 P2



General

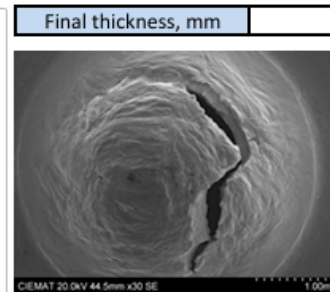
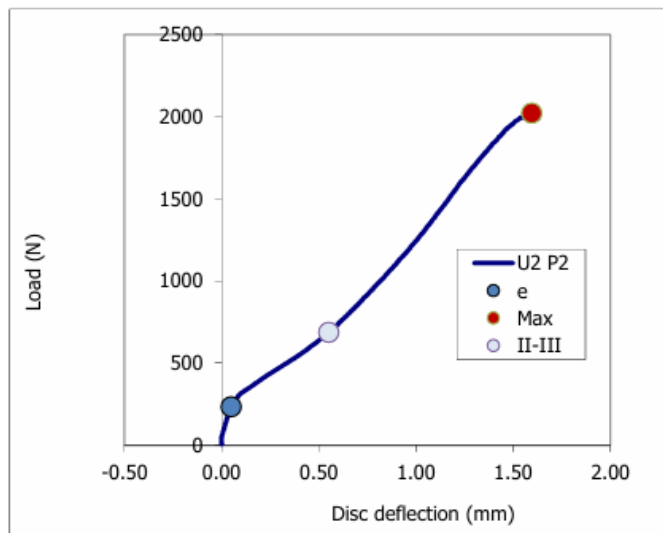
Responsible	M. Serrano	Project Name	AIMEN
Technician	D. Plaza	Project N°	
Material	U2	Date	Mar-23
Specimen ID	U2 P2	Temperature (°C)	23

Specimen and testing details

Disc diameter, d1 (mm)	8.00			Disc thickness, h (mm)			
Punch/ball	Punch	Material					
Punch tip/ball radius, r (mm)	0.50						
Punch/Ball Supplier							
Specimen Holder ID							
Receiving die diameter, d2 (mm)						0.75	
Chamfer, l	0.20	Radius				Angle	45
Punch velocity (m/s)							

Results

Elastic plastic transition			II-III			Max		
Deflect	Load	Energy	Deflect	Load	Energy	Deflect	Load	Energy
mm	N	Nmm	mm	N	Nmm	mm	N	Nmm
0.05	233.22	0.00	0.55	685.93	245.34	1.60	2020.91	1675.01



Probeta Placa 3: C3A P1



General

Responsible	M. Serrano	Project Name	AIMEN
Technician	D. Plaza	Project Nº	
Material	C3A	Date	Mar-23
Specimen ID	C3A P1	Temperature (°C)	20

Specimen and testing details

Disc diameter, d1 (mm)	8.00		Disc thickness, h (mm)	
Punch/ball	Punch	Material		
Punch tip/ball radius, r (mm)	0.50			
Punch/Ball Supplier				
Specimen Holder ID				
Receiving die diameter, d2 (mm)	0.75			
Chamfer, l	0.20	Radius		Angle 45
Punch velocity (m/s)				

Results

Elastic plastic transition			II-III			Max		
Deflect	Load	Energy	Deflect	Load	Energy	Deflect	Load	Energy
mm	N	Nmm	mm	N	Nmm	mm	N	Nmm
0.11	278.12	0.00	0.55	630.27	218.82	1.57	1905.35	1493.66

