

Proyecto final de carrera

Ingeniería de Materiales

Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas de dos chapas de acero avanzado de alta resistencia (AHSS): TRIP800 Y DP800

MEMORIA

Autor: Jordi Sala Serra

Directores: Maria Dolors Baró Mariné (UAB)
Dr. Victor García Fernández (CTM)

Convocatoria: Juny del 2008

La sotasignant, Dolors Baró Mariné, Catedràtica de Física Aplicada del Departament de Física de la Universitat Autònoma de Barcelona,

FA CONSTAR que ha fet el seguiment mitjançant tutories del treball de final de carrera concloent a la titulació d'Enginyeria de Materials titulat "Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas de dos chapas de acero avanzado de alta resistencia (AHSS): TRIP800 y DP800" de l'alumne Jordi Sala Serra.

Al mateix temps considera que és apte i autoritza el projecte per la seva presentació i posterior defensa.

I per que així consti, signo el present escrit, a Bellaterra, 20 de Gener de 2008

Índice

Índice	0
Resumen	5
1.-Introducción	6
1.1-Objetivo	6
1.2-Finalidad	6
1.3- La situación actual	7
2- Los Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS)	9
2.1- Descripción general	9
2.2- Tipos de AHSS	9
2.3-Descripción de Dual Phase steel (DP)	10
2.4- Descripción de los aceros TRIP (Transformation Induced Plasticity)	12
2.5-Conformabilidad de los AHSS	14
2.6- Los materiales a estudiar	15
2.6.1- DP800	15
2.6.2-TRIP800	16
3.-La problemática actual	18
3.1.-Antecedentes	18
3.2- La necesidad de abordar el proyecto	19
4.- Fundamentos teóricos	21
4.1- Modelos teóricos	21
4.1.2-Modelo Ludwick Hollomon	21
4.1.2-Modelo Voce Kocks	22
5.-Fase experimental I	24
5.1- Metodología de ensayo: Ensayo de tracción uní axial	24
5.1.1- Descripción de las muestras	24
5.1.2-Preparación de la muestra	25
5.1.3- Configuración de equipo y programa antes de realizar el ensayo.	25
5.1.4- Colocación de la probeta:	26
5.1.5- Inicio de ensayo	27
5.1.6- Fin de ensayo	28
5.2- Procesado de datos del ensayo a tracción.	28
5.2.1- Obtención gráfica $\sigma - \varepsilon$	28
5.2.2- Cálculo del Incremento de longitud Δl	28
5.3- Cálculo del exponente de endurecimiento n, modelo de Ludwick Hollomon Y de Voce- kocks.	29
5.3.1- Metodología empleada para el cálculo de n y de la ecuación que rige el comportamiento plástico del material según el modelo Ludwick-Hollomon.	29
5.3.2- Metodología empleada para el cálculo de la ecuación que rige el comportamiento plástico del material según el modelo de Voce-Kocks.	33
5.4- Resultados y discusión de resultados	36

5.4.1-Resultados DP800.	36
5.4.1.1-Resultados del ensayo a tracción DP800 .	36
5.4.1.2- Resultados coeficiente n y ecuación de Hollomon para Dp800.	37
5.4.1.3-Resultados Cálculo Voce Kocks DP800.	38
5.4.2- Resultados para Trip800.	38
5.4.2.1-Resultados tracción Trip800	38
5.4.2.2- Resultados Cálculo coeficiente n y ecuación de Hollomon para Trip800.	40
5.4.2.3- Resultados Cálculo Voce Kocks para TRIP800.	40
6.-Fase experimental II: Determinación del Modulo Elástico del material (E)	42
6.1.-Metodología de ensayo	43
6.1.1- Equipo necesario para la realización del ensayo	43
6.1.2-Descripción de las muestras	43
6.1.2- Preparación de la muestra	44
6.1.2.1-Preparación de la superficie	44
6.1.2.2.-Colocación de la galga:	45
6.1.6-Configuración del equipo y programa antes de realizar el ensayo	46
6.1.5-Colocación de la muestra:	46
6.1.7-Comienzo de ensayo	48
6.1.8-Fin de ensayo	48
6.2- Metodología de cálculo	49
6.2.1- Cálculo modulo elástico	49
6.3- Resultados y discusión.	51
6.3.1- Resultados obtenidos Dp800.	51
6.3.2-Resultados obtenidos Trip800	51
7.- Fase experimental III	52
7.1- Metodología de ensayo	52
7.1.1- Descripción de las muestras	52
7.1.2- Preparación de la muestra	53
7.1.3- Configuración de equipo y programa antes de realizar el ensayo.	54
7.1.4- Colocación de la probeta	54
7.1.5-Inicio de ensayo	55
7.1.6-in de ensayo	56
7.2- Procesado de datos	56
7.2.1- Cálculo del coeficiente de anisotropía plástica (r)	56
7.2.2- Cálculo de la anisotropía normal y planar (\bar{r} y Δr).	58
7.3- Resultados	59
7.3.1- Resultados para DP800	59
7.3.2-Resultados para TRIP800	59
8.- Comparativa resultados DP800 vs TRIP800.	60
8.1-Comparativa resultados método experimental I	60
8.1.1-Curva $\sigma - \varepsilon$, valores de $\sigma_{R0,2}$, σ_{max} , $\varepsilon_{homogenea}$, ε_{rotura} .	60
8.1.2-Coeficiente de endurecimiento n	60
8.1.3- Comparativa ajuste curvas modelos Ludwick hollomon vs voce kocks	61
8.1.4-Comparativa resultados módulo elástico	63
8.1.5-Comparativa resultados coeficiente r, anisotropía planar y normal.	63
9.- Aplicación de los resultados obtenidos	64
9.1.-Simulación mediante elementos finitos.	64
9.1.1- Definición general	64

9.1.2- Simulación de elementos finitos para metales _____	64
9.1.3-Ejemplo de aplicación mediante elementos finitos _____	66
10.-Futuras líneas de trabajo _____	69
11.- PRESUPUESTO _____	70
12. IMPACTO AMBIENTAL _____	71
12.1. Indicadores del impacto ambiental. _____	71
12.2 Impacto ambiental por consumos _____	72
12.2.1 Consumo eléctrico. _____	72
12.2.2. Movilidad _____	73
12.3-Resumen final _____	73
13.- Conclusiones _____	74
14.-Bibliografía _____	75

Resumen

En este proyecto se presenta un estudio sobre las propiedades mecánicas de chapa de un nuevo tipo de aceros, los aceros avanzados de ultra resistencia (AHSS), en concreto de dos clases de estos aceros.

Se pretende caracterizar sus propiedades mecánicas así como definir las curvas teóricas que expliquen su comportamiento en régimen plástico para su posterior aplicación en técnicas de simulación mediante elementos finitos y en etapas de conformado, debido a que en el momento actual surgen problemas en ellas, y un conocimiento más detallado de sus propiedades sin duda optimizará sus resultados.

La razón de estudiar dos materiales es debida al interés por comparar dos tipos de estos aceros de igual resistencia máxima y ver como afecta su estructura en sus propiedades mecánicas para obtener así un criterio en etapas de diseño.

La estructura del proyecto consiste en:

Una primera etapa (apartados 1,2,3,4 y anexo IV) trata del estudio de los materiales en cuestión, de la problemática generada en etapas de conformado, en simulación, de las diferentes propiedades mecánicas y técnicas de obtención de estas propiedades con el fin de saber cuales se necesitan caracterizar.

La segunda etapa, una vez definidos los parámetros a estudiar, es la parte práctica (fases experimentales I,II,III y anexos I,II,III), en las que se desarrollan diferentes ensayos y cálculos para obtener los valores de las propiedades mecánicas así como diferentes modelos teóricos de ajuste de curvas tensión deformación.

Una vez caracterizadas las propiedades, se procede a la comparación de las propiedades de dichos materiales, del ajuste de las curvas teóricas calculadas y a la valoración de los resultados.

Seguidamente, se realiza una aplicación de las propiedades obtenidas mediante simulación de elementos finitos, viendo como se optimizan los resultados en la predicción en conformado mediante simulación gracias al estudio llevado a cabo en este proyecto.

Para finalizar, el proyecto incluye un apartado de futuras líneas de investigación, un estudio del impacto ambiental producido a consecuencia de su elaboración y un presupuesto de su coste total.

1.-Introducción

1.1-Objetivo

- 1) Caracterizar las propiedades mecánicas de un acero DP800 y TRIP800, específicamente la curva tensión deformación $\sigma - \varepsilon$, determinando los valores de límite elástico convencional, tensión máxima, deformación homogénea y deformación de rotura $\sigma_{R0,2}, \sigma_{max}, \varepsilon_{homogenea}, \varepsilon_{rotura}$, observando la influencia de la orientación del material en estas propiedades.
- 2) Obtener la ecuación que rige el comportamiento plástico para cada uno de estos materiales, mediante la aplicación de dos diferentes modelos teóricos, Ludwick Hollomon y Voce- Kocks.
- 3) Calcular el coeficiente de endurecimiento n
- 4) Calcular el módulo elástico para cada uno de ellos.
- 5) Calcular el coeficiente de anisotropía r, y a partir de este valor determinar la anisotropía normal y planar de cada material.
- 6) Realizar una comparativa de los dos aceros estudiados, los cuales presentan resistencias similares, analizando el impacto de la microestructura en sus propiedades mecánicas y predecir como afectarán estas a las etapas de conformado y simulación.
- 7) En aceros, el ajuste más comúnmente usado para definir la comportamiento plástico del material es el de L.Hollomon. En el presente proyecto se pretende comparar el ajuste de este modelo con el de Voce Kocks, puesto que para este nuevo tipo de aceros el nivel de ajuste de Hollomon no es del todo satisfactorio.

1.2-Finalidad

La finalidad de los objetivos anteriores viene dada por la necesidad de:

Ahondar en un conocimiento más detallado de las propiedades de cada material, base fundamental para diseño mecánico de componentes estructurales.

De forma concreta estos datos serán de gran utilidad en el desarrollo proceso de conformado de chapa, ya que actualmente surgen acuciantes problemas durante la estampación de estos aceros, haciendo necesario sin duda un mejor conocimiento de las propiedades del material para poder hacer frente de un mejor modo a las dificultades de conformabilidad.

Generar una base de datos exactos de las propiedades mecánicas de cada material para su posterior uso en el diseño mediante simulación con elementos finitos.

En base a las diferencias entre las propiedades mecánicas de estos dos materiales, realizar una valoración de las ventajas de cada acero en función de los requisitos a cumplir.

1.3- La situación actual

El sector de la automoción constituye el segundo mercado del acero después de la construcción y obra pública. Chasis y carrocerías, piezas del motor, la dirección o la transmisión, instalación de escape, etc., son de acero, con lo que éste representa del 55 al 70% del peso del automóvil.

Hoy en día, los aceros de alta resistencia convencionales (HSS) permiten una producción a menor coste de vehículos más ligeros, principalmente debido a las ventajas que presenta con respecto a otras aleaciones ligeras:

- El acero tiene una buena embutibilidad en elementos de carrocería.
- Presenta una buena soldabilidad en comparación con el aluminio.
- Es fácilmente reciclable.

En los últimos años en el sector automovilístico se están dando importantes cambios en cuanto a las exigencias a los nuevos modelos: más seguridad en las pruebas de impacto pero con un menor peso para conseguir una reducción del consumo y en consecuencia menor contaminación. Para cumplir estas exigencias se están incorporando entre otros materiales los aceros de alta resistencia, que por sus altas características permiten reducir los espesores en piezas de la carrocería, tales como los Montantes B, Montantes A, Taloneras, Refuerzos Laterales, etc. (la fig.1.1 muestra aplicaciones de diferentes AHSS en el refuerzo del coche, y la fig.1.2 aplicaciones en elementos de refuerzo que deben absorber impactos).

Los aceros de alta resistencia (HSS) se caracterizan por presentar valores de límite elástico entre 450 y 550 MPa. Por encima de estos aceros, desde el punto de vista mecánico están los aceros avanzados de alta resistencia mecánica (aceros AHSS, acrónimo del inglés 'Advanced High Strength Steel', o aceros de ultra alta resistencia), cuyo límite elástico es superior a 550 MPa [1.1].

La elevada resistencia de estos aceros hace factible el desarrollo de diseños eficientes en términos de masa, que economizan el consumo de combustibles, mientras que de manera simultánea, generan un incremento en la resistencia a los impactos en colisiones. A diferencia de muchos otros materiales competitivos, los AHSS pueden cumplir con estos objetivos sin causar un aumento en el costo total para el fabricante. Diversos diseños conceptuales de vehículos completos y diseños conceptuales de los subsistemas han presentado un ahorro del 25 por ciento en términos de masa, sobre aquellos diseños convencionales actuales que usan aceros de alta resistencia, en tanto

que a la vez logran una mejoría en la resistencia al impacto por colisiones, sin causar un aumento en los costos.

Precisamente, una de las virtudes de estos aceros, su elevado límite elástico, les supone un importante inconveniente para su extensiva aplicación en distintos componentes de piezas del automóvil e incluso les impide dar el salto hacia otros sectores industriales donde la relación resistencia-peso deba ser optimizada.

La elevada resistencia mecánica de estos aceros avanzados, conlleva utilizar mayores presiones durante su conformado y en general aumenta la dificultad de todo el proceso, entre los principales problemas asociados a la incorporación de los AHSS se encuentran el desgaste mucho más severo de los útiles de conformado, e incluso su rotura prematura tras la fabricación de pocas piezas. Otro problema de suma importancia es la fuerte recuperación elástica posterior al conformado, generada por el alto límite elástico de estos materiales. Además, la continua evolución del sector automoción está exigiendo operaciones de conformado altamente complicadas por las sollicitaciones mecánicas a que se someten los utillajes, que rozan en algunos casos el imposible.

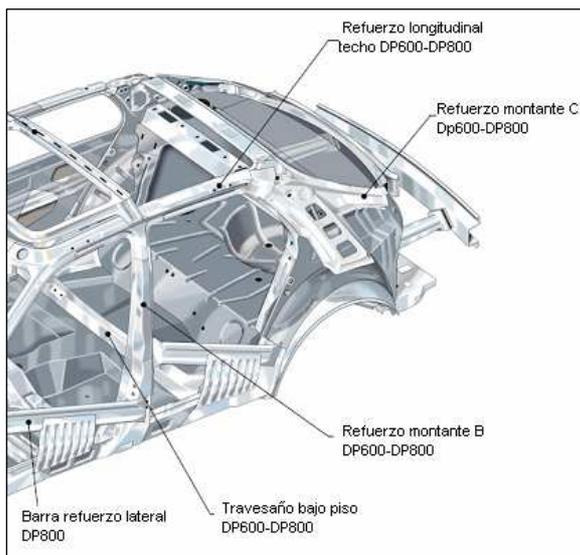


Fig.1.1-Aplicaciones DP en acero estructural del automóvil.[1.2]



Fig. 1.2- Montantes A, B y aplicaciones de AHSS para absorber impactos.

2- Los Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS)

2.1- Descripción general

La principal diferencia entre los aceros convencionales (HSS) y los aceros avanzados de alta resistencia o Advanced High Strength Steels (AHSS) se encuentra en su micro estructura.

Los HSS son aceros que cuentan con una única fase, la ferrítica. En cambio, los AHSS son aceros que tienen una estructura formada de diferentes fases, según el tipo de AHSS del que se trate. Pueden contener ferrita, martensita, bainita y austenita retenida en cantidades suficientes para producir unas propiedades mecánicas únicas. Algunos de estos AHSS tienen una mayor capacidad de endurecimiento por deformación o trabajo en frío. Esta alta capacidad de endurecimiento por deformación permite aumentar la resistencia mecánica de la chapa de acero sin reducir su conformabilidad, e incluso aumentarla, al resistir mejor la estricción localizada durante su conformado.

La buena combinación de resistencia y conformabilidad de los aceros AHSS se consigue gracias a la combinación controlada de fases estables y meta estables en una micro estructura fina, la cual se ve significativamente modificada en el proceso de conformado.

Estos materiales son relativamente blandos y aumentan su resistencia al ser deformados, siendo por lo tanto, fácilmente conformables y extremadamente resistentes una vez han sido deformados (del orden de 4 a 5 veces más que un acero convencional). Además, gracias a su capacidad de ganar resistencia con la deformación, pueden ser embutidos con menor riesgo de rotura, pues las zonas más deformadas y con más tendencia a rasgarse, son las que más resistencia desarrollan.

2.2- Tipos de AHSS

Los aceros AHSS [2.1] más comunes son los DP, TRIP, CP y MS. En los aceros DP (acrónimo del inglés 'Dual Phase') el término dual proviene de la coexistencia de islas de martensita o bainita embebidas en una matriz de ferrita. Los aceros TRIP (acrónimo el inglés 'Transformation Induced Plasticity') se caracterizan por presentar como mecanismo de endurecimiento por deformación la transformación de austenita a martensita inducida por el campo de tensiones generado a altos niveles de deformación. Su micro estructura consiste en una matriz ferrítica que contiene una dispersión de martensita y bainita, junto con una fracción de austenita retenida, entre el 5 y el 20%. Los aceros CP (acrónimo el inglés 'Complex Phase') presentan una micro estructura muy fina de ferrita con una elevada fracción volumétrica de fases duras que se endurece aún por precipitación de finos íter metálicos. Para fabricar los aceros MART (de martensíticos) la austenita presente durante la laminación en caliente, se transforma totalmente a martensita durante el enfriamiento. Son los aceros de mayor resistencia para conformado en frío,

llegando hasta 1400 MPa de carga de rotura. Más allá de estos niveles se sitúan los aceros de conformado en caliente, donde la austenita se transforma totalmente a martensita por el temple que sigue a la operación de conformado a alta temperatura (800-900 °C). Entre los aceros de conformado en caliente destacan los aceros al B, con una resistencia del orden de 1500 MPa. Los aceros AHSS se suelen denominar por sus siglas seguidas de su valor de resistencia a rotura (DP600, TRIP800, CP800, etc.).

En la fig.2.1 se clasifican estos aceros de alta resistencia en función de su conformabilidad en términos de alargamiento a rotura, de resistencia mecánica, y de resistencia a rotura.

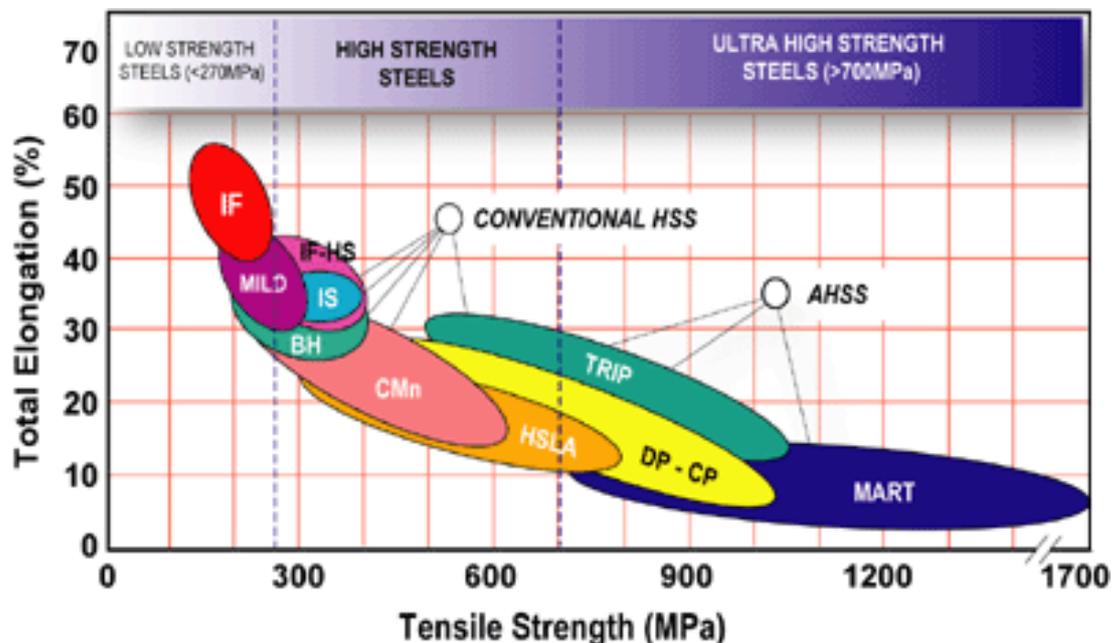


Fig. 2.1-Clasificación de aceros AHSS en función de su conformabilidad en términos de alargamiento a rotura, y de resistencia mecánica, en términos de su resistencia a rotura.

2.3-Descripción de Dual Phase steel (DP)

Los aceros de doble fase o DP[2.1] como se ha comentado en el apartado anterior, consisten en una matriz de ferrita que contiene una segunda fase de martensita dura en forma de islas.

Generalmente incrementando la fracción de volumen de segundas fases duras incrementa la resistencia del material.

Los aceros DP son producidos mediante el control del enfriamiento a partir de la fase austenita (para productos elaborados mediante laminado en caliente) o desde la doble fase, ferrita con austenita (para productos laminados en frío con recocido continuo o con temple en caliente) para transformar parte de la austenita a ferrita antes de que un enfriamiento rápido transforme la austenita restante a martensita.

Dependiendo de la composición i de el proceso de obtención, los aceros laminados en caliente requieren una mejora de su capacidad de resistencia al estiramiento en el mejor eje (es típicamente medurado a partir de la capacidad de expansión de agujero) puede que la micro estructura contenga cantidades significantes de bainita.

Ferrite-Martensite DP

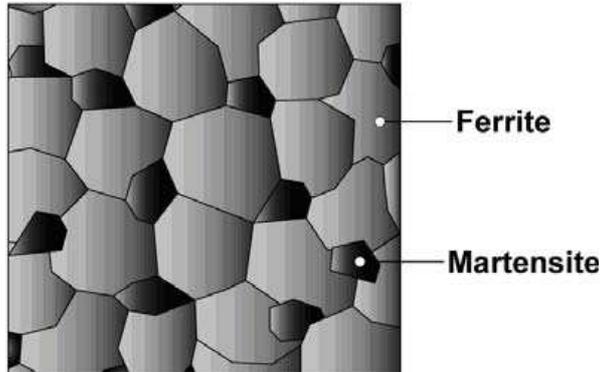


Fig 2. 2-Esquema de la microestructura de un acero DP, se ven ilustradas las islas de martensita en la matriz de ferrita.

En la fig.2.2 vemos un esquema de la micro estructura típica de el acero DP, matriz de ferrita con islas de martensita. La fase blanda de ferrita es generalmente continua, dando a estos aceros una excelente ductilidad. Cuando este acero se deforma, la deformación se concentra en la fase ferrita alrededor de las islas de martensita, creando un alto rendimiento en el trabajo de endurecimiento exhibido por estos aceros .

Este trabajo de endurecimiento sumado a una excelente elongación hace que un DP con características de límite elástico similares a las de un acero convencional tenga muchas mejores prestaciones como se puede observar en la fig 2.3.

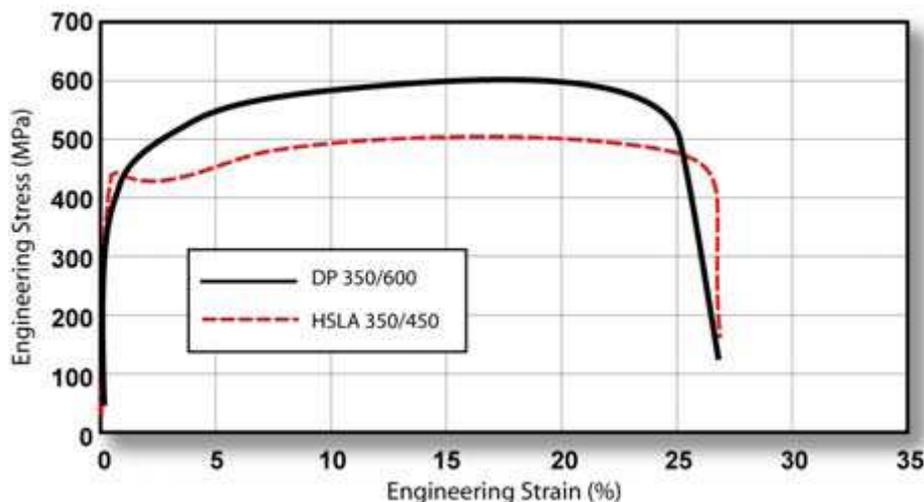


Fig 2.3- Comparación de la curva $\sigma - \epsilon$ de un DP con un HSLA con el límite elástico similar(350MPa).El acero DP presenta un trabajo de endurecimiento inicial más elevado, una tensión máxima más elevada y un radio YS/TS más pequeño que el HSLA.

Los aceros DP i otros AHSS a veces presentan un efecto de endurecimiento por cocido que es un importante beneficio respecto a los aceros convencionales. El efecto de endurecimiento por cocido incrementa el límite elástico debido a las elevadas temperaturas de envejecimiento (conseguido mediante el tratamiento térmico en el horno de cocido), después de la deformación (generada por el trabajo de endurecimiento durante la estampación u otro proceso de conformado).

La existencia de endurecimiento por cocción en los AHSS depende de la química específica de cada acero y del historial térmico del acero.

En los aceros DP, el carbono permite la formación de martensita a velocidades prácticas de enfriamiento mediante el incremento de la dureza del acero. Manganeso, Cromo, molibdeno, vanadio y níquel añadidos por separado o combinados, también pueden ayudar al incremento de dureza.

El carbono consolida la martensita como soluto endurecedor en la ferrita, al igual que el silicio y el fósforo, pero manteniendo también la buena resistencia y su capacidad de conformado.

2.4- Descripción de los aceros TRIP (Transformation Induced Plasticity)

Los aceros TRIP[2.1] (acrónimo el inglés ‘Transformation Induced Plasticity’) se caracterizan por presentar como mecanismo de endurecimiento por deformación la transformación de austenita a martensita inducida por el campo de tensiones generado a altos niveles de deformación. Su micro estructura consiste en una matriz ferrítica que contiene una dispersión de martensita y bainita, junto con una fracción de austenita retenida, entre el 5 y el 20%.

Los aceros TRIP requieren el uso de un tratamiento isoterma a una temperatura intermedia, para producir un poco de bainita.

El alto contenido en silicio y carbono se acaba traduciendo en una significativa fracción de volumen de austenita retenida en la micro estructura final.

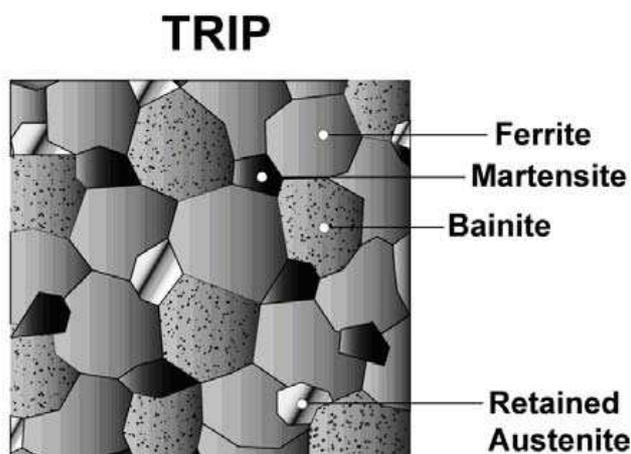


Fig. 2.4-Estructura típica aceros TRIP, se observan las diferentes fases que coexisten en estos aceros. La bainita y la austenita retenida son fases adicionales en los aceros Trip.

Durante la deformación, la dispersión de las segundas fases(duras) in la ferrita(blanda) crea un elevado trabajo de endurecimiento, como se ha observado en los DP. Sin embargo, en los aceros Trip la austenita retenida

progresivamente se transforma a martensita aumentando la deformación y incrementando el endurecimiento a altos niveles de tensión.

Este comportamiento se ve ilustrado en la Fig.2.5, donde se ve el comportamiento $\sigma - \varepsilon$ de HSLA, DP y TRIP de un límite elástico similar. El TRIP tiene un comportamiento de endurecimiento inicial menor que el DP, pero el endurecimiento perdura a altos niveles de deformación cuando ya decrece en el DP.

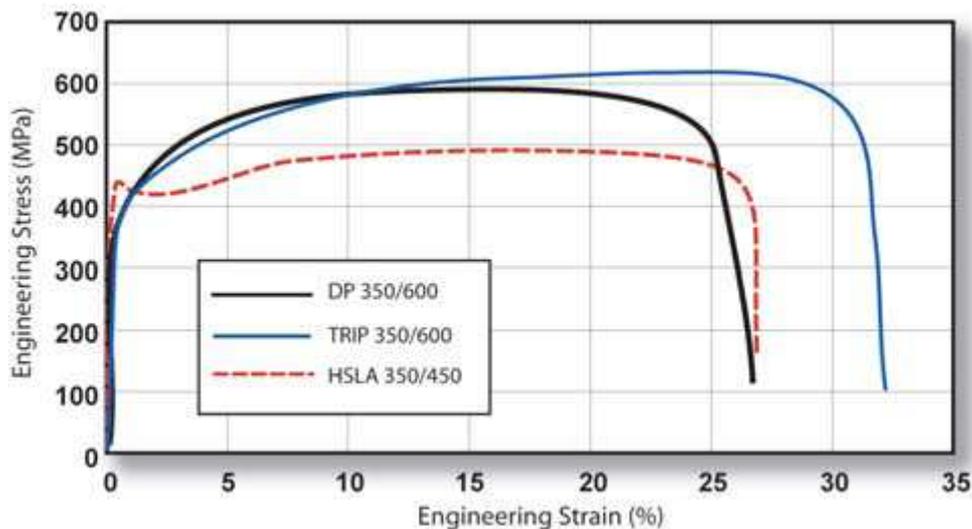


Fig 2.5- Comparación de TRIP, DP y HSLA mediante curva eng $\sigma - \varepsilon$.

El trabajo de endurecimiento de los aceros TRIP es substancialmente más elevado que el de los aceros convencionales HSS, siendo un importante avance en el conformado. Esto es particularmente interesante en cuestiones de diseño, puesto que se pueden conseguir más opciones de conformado que con el DP.

Los aceros TRIP usan cantidades mas elevadas de carbono que los DP, con el fin de tener suficiente contenido de carbono para estabilizar la austenita retenida a temperatura ambiente. Los elevados contenidos de silicio y o aluminio sirven para acelerar la formación de ferrita/bainita.

Estos elementos ayudan en el mantenimiento del carbono suficiente para mantener la austenita retenida.

La supresión de la precipitación de carburos durante la transformación bainítica es fundamental para la creación de los aceros TRIP. Se consigue mediante la adición de aluminio y silicio.

Mediante el ajuste de contenido en carbono se consigue el nivel de deformación a partir del cual la austenita retenida empieza a transformar en martensita. A bajos contenidos en carbono, la austenita retenida comienza la transformación casi cuando empieza la deformación del material, incrementando el endurecimiento y la formabilidad durante el proceso de estampación.

A elevados contenidos de carbono, la austenita retenida es más estable y transforma a niveles de deformación más allá de los producidos durante el conformado. A estos niveles la austenita retenida persiste en la parte final. Transformando a martensita durante un proceso posterior, como podría ser una rotura.

Los aceros TRIP pueden ser usados para dotar de excelentes propiedades de conformado y resistencia a piezas, así como para dotar de excelentes propiedades de resistencia a la rotura y de absorción de impacto.

2.5-Conformabilidad de los AHSS

La principal diferencia en cuanto a conformabilidad entre los aceros AHSS, y los aceros de alta resistencia convencionales, como los aceros micro aleados o HSLA, es que los primeros poseen una mayor capacidad de endurecimiento por deformación o trabajo en frío. Esta alta capacidad de endurecimiento por deformación permite aumentar la resistencia mecánica de la chapa de acero sin reducir su conformabilidad, e incluso aumentarla, al resistir mejor la estricción localizada durante su conformado.

La buena combinación de resistencia y conformabilidad de los aceros AHSS se consigue gracias a la combinación controlada de fases estables y meta estables en una micro estructura fina, la cual se ve significativamente modificada en el proceso de conformado. La micro estructura de los aceros DP y TRIP consiste en una matriz ferrítica en la que se dispersan islotes de martensita y bainita, con presencia de austenita retenida en el caso de los TRIP.

Estos materiales son relativamente blandos y aumentan su resistencia al ser deformados, siendo por lo tanto, fácilmente conformables y extremadamente resistentes una vez han sido deformados (del orden de 4 a 5 veces más que un acero convencional). Además, gracias a su capacidad de ganar resistencia con la deformación, pueden ser embutidos con menor riesgo de rotura, pues las zonas más deformadas y con más tendencia a rasgarse, son las que más resistencia desarrollan.

Como contraste, y debido a su elevada resistencia mecánica, aparecen problemas paralelos como mayores presiones y en general aumenta la dificultad en las etapas de conformado, lo que se traduce en un desgaste mucho más acusado de los útiles de conformado, e incluso su rotura prematura tras la fabricación de pocas piezas.

2.6- Los materiales a estudiar

Para la elaboración del presente proyecto, han sido seleccionados 2 de estos aceros avanzados de alta resistencia, uno perteneciente a DP y el otro a TRIP, con la finalidad de poder determinar y comparar sus propiedades mecánicas. Por ello, se ha elegido 2 chapas que cuentan con características lo más similares posibles, teniendo un espesor parecido, 2mm para TRIP y 1,8mm en el caso del DP, el mismo proceso de obtención de chapa (laminado en frío), y unas características similares (la misma resistencia máxima, TRIP800 y DP800), de aquí su nombre puesto que estos aceros se nombran en función del valor de su resistencia máxima según el sistema de clasificación de aceros usado por el programa ULSAB-AVC (Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts)[1.1].

2.6.1- DP800

Las características estructurales generales de este tipo de acero han sido descritas en el apartado anterior 2.3.

En este apartado se procederá a exponer la composición específica de la chapa a estudiar así como la observación de su micro estructura, antes de realizar los ensayos para obtener sus propiedades mecánicas.

- Composición química:

Tabla 2.1-Composición química DP800 en estudio.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Ni	Al%
0.10	0.15	1.89	0.02	<0.001	0.10	0.05	0.03	0.02
DP800 2mm								

Acero de bajo contenido en Carbono y con los elementos de aleación; Mn, Si y Cr. Calmado con aluminio.

-Estudio microestructural:

Para la observación de la microestructura de la muestra, se han analizado dos distintas secciones de la chapa como se muestra en la fig.2.6.

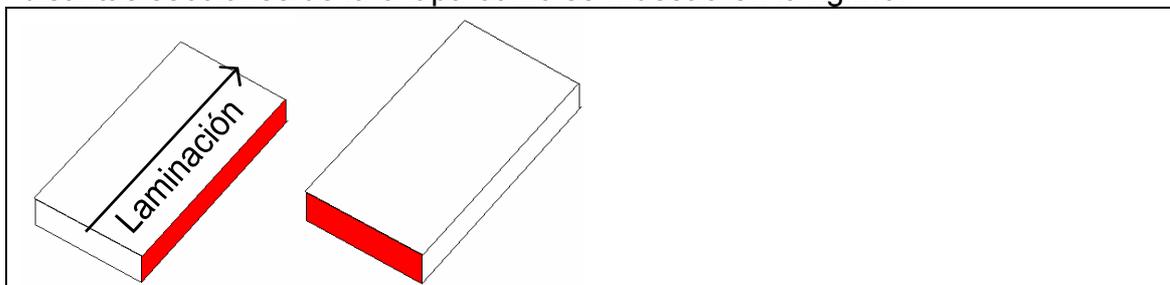
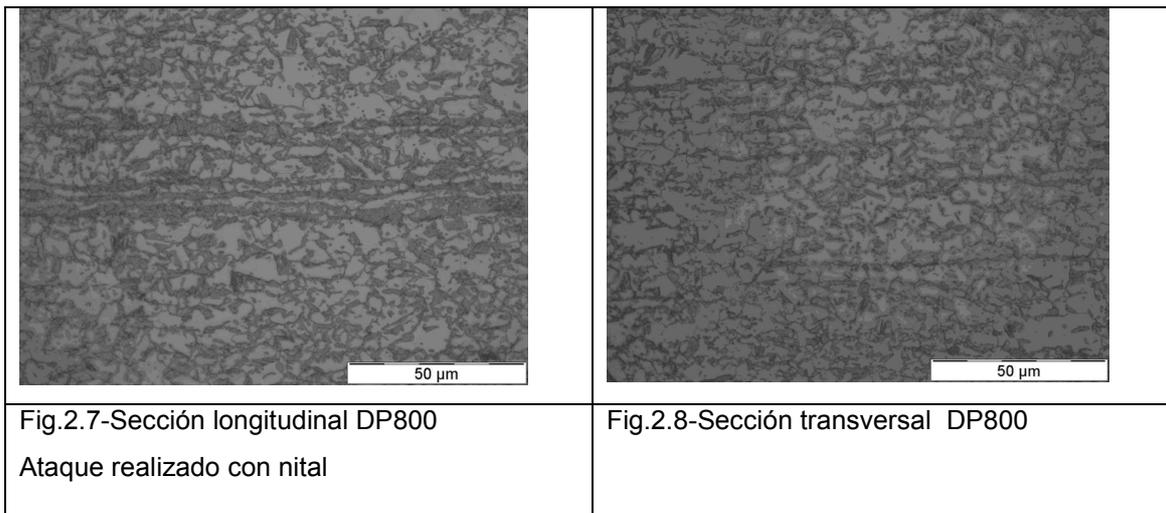


Fig. 2.6- Secciones de la chapa analizadas: longitudinal y transversal.



Micro estructura de base ferrítica (la fase más clara de la imagen) con presencia de martensita formando bandas (la fase oscura), tanto longitudinales (Fig.2.7) de mayor espesor y longitud, como transversales (Fig.2.8).

También presencia de martensita en forma de pequeños islotes intergranulares.

Tamaño de grano muy fino, relativamente heterogéneo y equiaxial.

La aparición de bandas va acorde al sentido de laminación del material, siendo de menor longitud en el transversal puesto que es la sección de la banda original en sentido de laminación.

2.6.2-TRIP800

Las características estructurales generales de este tipo de acero han sido descritas en el apartado anterior 2.4.

En este apartado se procederá a exponer la composición específica de la chapa a estudiar así como la observación de su micro estructura, antes de realizar los ensayos para obtener sus propiedades mecánicas.

-Composición química:

Tabla 2.2- Composición química de acero **TRIP800** espesor 2,0 mm.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	Al%	%Nb	%Ti
0,201	1,614	1,729	0,016	<0,001	0,024	<0,005	0,032	0,042	0,010	0,003

Acero de bajo contenido en carbono, aleado con manganeso, con presencia de cromo, níquel y niobio, y calmado con silicio y aluminio. El niobio se usa para refinar el grano.

-Estudio microestructural:

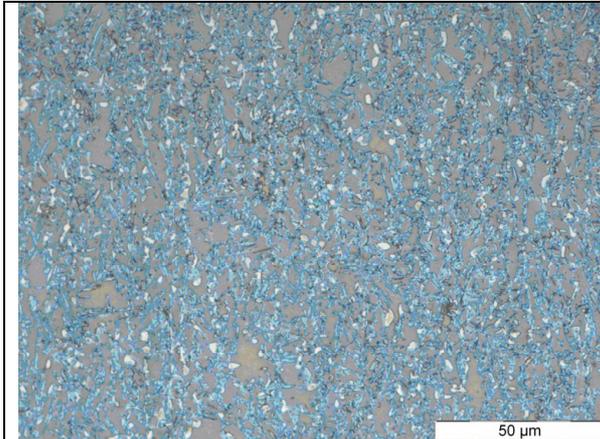


Fig.2.7-Sección long. TRIP800
Ataque realizado con bisulfito

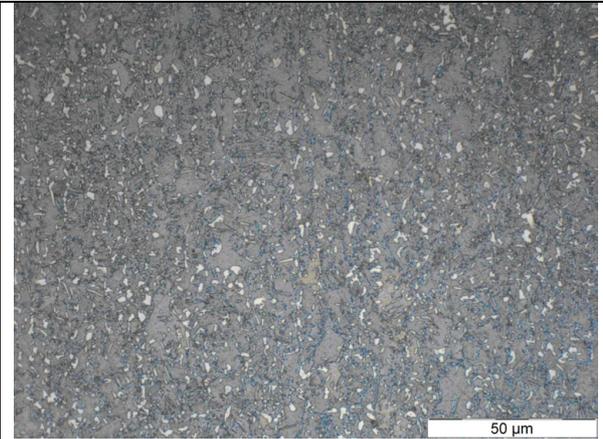


Fig.2.8-Sección trans. TRIP800

Microestructura básica de austenita retenida en una matriz de ferrita/bainita, además de presentar fase dura de martensita.

Se observa la fase ferrita en color azul, la bainita en color marrón claro y la martensita y austenita retenida en color blanco.

El tamaño de grano es muy fino.

La distinción de las fases martensita y ferrita es imposible en estas imágenes puesto que las dos aparecen en blanco, para la comprensión de ellas se ha usado el artículo de la referencia [2.3].

3.-La problemática actual

3.1.-Antecedentes

La historia de los aceros de alta resistencia para aplicaciones estructurales de componente de automóvil se ilustra en la figura 3.1, donde se indica aproximadamente la fecha de aparición en el mercado europeo del primer grado industrial de cada acero. Se aprecia que el desarrollo de aceros de alta resistencia es previo a 1980. Los aceros DP fueron los primeros aceros AHSS en desarrollarse, pero su uso industrial, al igual que los TRIP, no empezó hasta 1995, impulsado por el consorcio ULSAB (acrónimo del inglés 'Ultra Light Steel Automotive Body', es decir chasis ultraligero en acero). El objetivo del consorcio ULSAB[1.1] era fabricar chasis ligeros de acero, reduciendo el espesor de sus componentes mediante el desarrollo de aceros de mayor resistencia mecánica. Los resultados del proyecto ULSAB desembocaron en la implementación industrial de estos aceros a mediados años 90, tal como muestra la figura 3.1.

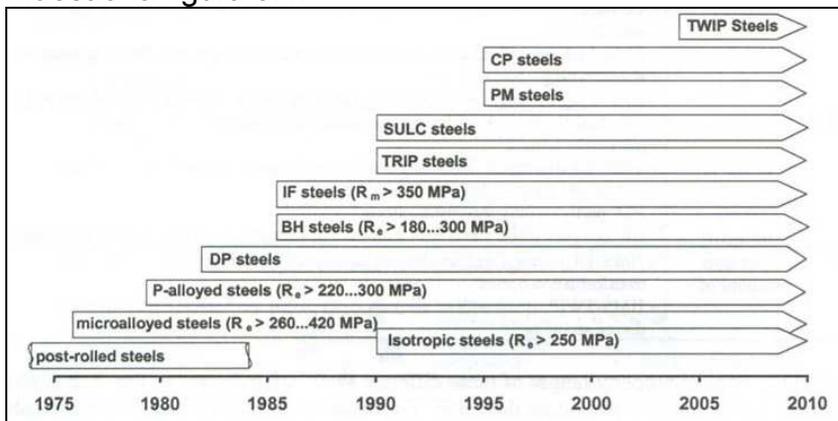


Figura 3.1: Evolución histórica del desarrollo de aceros de alta resistencia.

Los principales problemas de la implementación de estos aceros son:[3.1]

- La rotura de herramientas a causa de los elevados requerimientos de tonelaje necesarios para la formación de piezas, a partir de acero con resistencias del doble o triple de que aquella de los aceros convencionales de alta resistencia
- Desgaste de la herramienta: Los insertos endurecidos y los filos de las cuchillas de corte pueden desgastarse en el transcurso de una sola corrida de producción, a causa de la dureza de los materiales AHSS, la cuál casi igual a aquella del material con el que está hecho el mismo troquel.
- Problemas de calidad en las dimensiones de las piezas que surgen a causa de la recuperación elástica (springback, consultar anexo IV apartado C.1) asociado con la alta resistencia, y con el aumento de la sensibilidad en el

proceso por la variabilidad en las propiedades del material a niveles superiores de resistencia.

- La ausencia de datos metalúrgicos detallados del acero para dar soporte en las simulaciones del proceso de formado, y así asegurar la continuidad en el uso del mismo material a través de todo el proceso de desarrollo y pruebas, lo que ayudaría a disminuir los errores al predecir el efecto de la recuperación elástica (springback).

3.2- La necesidad de abordar el proyecto

Los aceros de alta resistencia se plantean como potenciales candidatos para aquellas aplicaciones donde se deba optimizar la relación resistencia-peso y deban ser fabricados con materiales metálicos. Sin embargo y pese a las excelentes perspectivas que ofrece la aplicación de estos nuevos aceros, su efectiva y pronta implantación depende en gran medida de la capacidad de las industrias del sector metal-mecánico para conformarlos y fabricar correctamente componentes a partir de ellos.

A raíz de los diversos problemas que aparecen en etapas de conformado al trabajar con este tipo de aceros (los AHSS), varias industrias establecieron un convenio para el estudio exhaustivo de los problemas que se producen con el fin de encontrar soluciones y así poder seguir con la evolución y implementación de estos aceros en el mercado.

Este estudio se lleva a cabo mediante un consorcio entre centros tecnológicos que se encargan de la parte de I+D con el fin de solucionar los diferentes problemas que traen consigo esta nueva gama de aceros con mejores prestaciones que cualquier acero convencional.

El presente proyecto se desarrolla en el centro tecnológico de Manresa, centro de investigación dónde se lleva a cabo parte de este gran proyecto sobre conformado de chapa con AHSS.

En dicho centro, se desarrollan tareas de diseño mediante simulación con elementos finitos, así como pruebas de conformado en chapa.

Para realizar dichas tareas, es necesario el buen conocimiento de las propiedades mecánicas de cada chapa que este en estudio, puesto que tanto en etapas de simulación como de conformado estas son las que permiten poder predecir como actuará el material ante los diferentes procesos a los que será sometido y, consecuentemente, serán las que determinen las posibilidades y los límites de cada material.

El presente proyecto encuentra su razón de ser en la necesidad de tener datos detallados y comparados de las propiedades mecánicas específicas para su posterior uso en la simulación mediante elementos finitos y en conformado.

4.- Fundamentos teóricos

Debido a que en el presente proyecto se realizará un estudio de las propiedades mecánicas de las chapas de acero, el apoyo teórico buscado en el inicio del proyecto se centra en teoría sobre propiedades mecánicas obtenidas mediante el ensayo de tracción uní axial.

Esta recopilación de información sobre el ensayo, la curva $\sigma - \varepsilon$ y propiedades mecánicas básicas en general se encuentra en el anexo IV apartado C.3.

Cabe destacar que para una mejor comprensión de los parámetros relacionados con conformado de chapa, se ha hecho un resumen de la información encontrada (Anexo IV, apartado C.2) con la intención de una mejor comprensión de la importancia de la caracterización de las propiedades mecánicas para los procesos de conformado y como se relacionan en el. (Coeficiente de endurecimiento, anisotropía del material, apartados C.2.4 y C.2.3 del anexo IV).

Para el cálculo de la ecuación de Hollomon y Voce Kocks, la información recogida se detalla en el siguiente apartado.

4.1- Modelos teóricos

Existen varios modelos de endurecimiento por deformación que permiten definir la curva esfuerzo deformación mediante una expresión matemática de pocos parámetros. Este trabajo presenta un análisis de la capacidad de los modelos fenomenológicos de Voce- Kocks y el modelo empírico de Ludwik-Hollomon, de ajustarse a las curvas experimentales de tracción.

4.1.2-Modelo Ludwick Hollomon

Un primer modelo matemático para describir la curva esfuerzo-deformación es el propuesto por Ludwik [A.4.3], simplificado posteriormente por Hollomon para a la zona plástica de la curva [A.4.4]. La expresión simple del modelo Ludwik-Hollomon (LH) es,

$$\sigma = K * \varepsilon^n \quad (4.1)$$

y propone que el esfuerzo, σ , aumenta potencialmente con la deformación, ε , de tal manera que el coeficiente K(constante de Hollomon) y el exponente de endurecimiento n, definen la curva.

Este modelo es ampliamente utilizado para estudiar la tracción en aceros. Sin embargo se le critica por ser empírico, porque σ crece infinitamente con el

aumento de ϵ y porque n no es constante ($n=(d\sigma/d\epsilon)(\epsilon/\sigma)$). A pesar de las críticas se ajusta bien a cortas deformaciones obtenidas en tracción.

Como n no es constante han propuesto diferentes métodos para asignarle un valor. El método más frecuente es el de medir la pendiente después de un ajuste lineal a la última parte de la curva Log σ -Log ϵ .

4.1.2-Modelo Voce Kocks

Voce [4.1] propuso otro modelo matemático basado en el aumento de σ hasta un valor denominado esfuerzo de saturación, σ_{Sat} . Posteriormente Kocks [4.2] realizó una demostración física para justificar la ecuación del modelo Voce-Kocks (VK).

Puesto que σ , en vez de ϵ , se ha relacionado con la densidad de dislocaciones, ρ (según la conocida relación física $\sigma = M\alpha\mu b\rho^{0.5}$ de Taylor [4.3] donde M y α son constantes, μ es el módulo de cizalladura y b es el vector de Burgers), entonces Kocks propuso relacionar la tasa de endurecimiento por deformación, $\Theta = d\sigma/d\epsilon$, con el esfuerzo, σ , para independizarla del modo de deformación.

Una gráfica Θ - σ inicia con un valor alto de Θ definido como $\Theta_0 = \sigma_{Sat}/\epsilon C$ donde ϵC es un valor de deformación. Y dependiendo de las condiciones de ensayo y el material, el valor de Θ disminuye a medida que σ aumenta hasta un valor próximo a σ_{Sat} .

Kocks llegó a desarrollar una expresión para el incremento de ρ a medida que aumenta la cizalla en un plano cristalino, γ , así que

$$\frac{d\rho}{d\gamma} = \left(\frac{\sqrt{\rho}}{\alpha b}\right) * \left(\frac{L_{recov}}{b}\right) * \rho = \frac{(K_1 * \sqrt{\rho} - K_2 * \rho)}{b} \quad (4.2)$$

donde $(\alpha/\rho^{0.5})$ es el espacio libre medio entre dislocaciones definido estadísticamente, L_{Recov} es la longitud de dislocaciones restauradas (aniquiladas), k_1 y k_2 son constantes.

Si se sustituye en la ec. (4.2) la relación de Taylor y luego se multiplica por el factor de Taylor apropiado (M^2) entonces se puede obtener una expresión para la tasa de endurecimiento por deformación

$$\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right) = \left(\frac{\alpha\mu M^2}{2\beta}\right) - \left(\frac{L_{recov}M}{2b}\right) * \sigma = K_3 - K_2(M/2) * \sigma \quad (4.3)$$

Se puede apreciar que la ec. (4.3) es una ecuación lineal la cual se puede reescribir como

$$\Theta = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right) = \Theta_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{sat}} \right) \quad (4.4)$$

e integrando la ec. (4.4) se obtiene

$$\sigma = \sigma_{sat} + (\sigma_0 - \sigma_{sat}) \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) \quad (4.5)$$

sin embargo en este trabajo se considerará σ_0 y ε_0 igual a cero. Si σ_0 y ε_0 son cero el ajuste comienza en (0,0). Así la ec. (4.5) se reduce a

$$\sigma = \sigma_{sat} * [1 - \exp(-W\varepsilon)] \quad (4.6)$$

donde por simplicidad $W = 1/\varepsilon C$, el cual representa la longitud de dislocaciones restauradas multiplicada por $M/2b$.

5.-Fase experimental I

Para la obtención de las propiedades mecánicas, tales como la curva $\sigma - \varepsilon$, para hacer el cálculo de los valores de $\sigma_{R0,2}$, σ_{max} , $\varepsilon_{homogenea}$, ε_{rotura} , así como para establecer la ecuación que define el comportamiento plástico del material y el coeficiente de endurecimiento n , se llevarán a cabo ensayos de tracción uní axial.

A continuación se procede a la descripción de la metodología empleada para llevar a cabo este ensayo, seguidamente de la descripción del método de cálculo de las distintas variables y para finalizar este apartado los resultados finales para cada uno de estos materiales.

Cabe destacar que el ensayo de tracción uní axial se realiza mediante el cumplimiento de la Norma **EN-10002-1**.

Mediante la curva obtenida $\sigma - \varepsilon$ se obtendrá el coeficiente de endurecimiento n y los valores de la ecuación que rige el comportamiento plástico del material. Para definir la ecuación que rige el comportamiento de estos aceros, se utilizarán dos diferentes modelos, la ecuación de **Ludwick-Hollomon** y la de **voce-kocks**. (detallados en el apartado 4), con el fin de ver cual de ellos se ajusta más a cada uno de estos aceros.

5.1- Metodología de ensayo: Ensayo de tracción uní axial

5.1.1- Descripción de las muestras

Se extrajeron un total de 12 probetas para cada material, cortadas a diferentes direcciones respecto a la laminación (Longitudinales, Transversales y a 45°), como se muestra en la figura 5.1. Las dimensiones de las probetas normalizadas fueron de 12mm de anchura, 2 mm de espesor para TRIP800 y 1,8 para DP800, 75 mm de longitud calibrada de probeta.

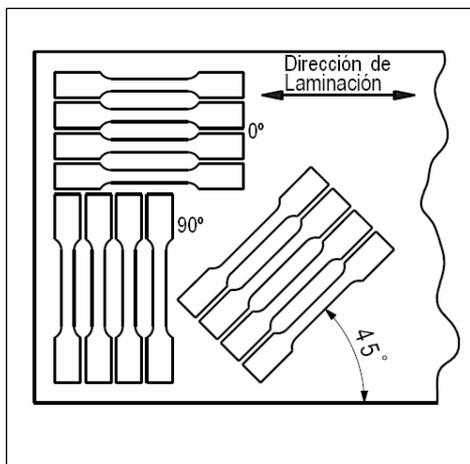


Figura 5.1. Probetas extraídas para realizar los ensayos mecánicos de tracción uní axial.

5.1.2-Preparación de la muestra

Una vez mecanizada la probeta, el siguiente paso trata de prepararla para proceder a su ensayo.

Se numera con el número de probeta, el material al que pertenece y la orden de trabajo, también se marcan dos líneas perpendiculares a la probeta en la zona exterior no calibrada con el fin de facilitar la colocación de la probeta en las mordazas pues la perpendicularidad es fundamental para que la carga se aplique uniaxialmente es un factor importante en el ensayo.

Posteriormente se procede a marcar una línea de centro en la zona calibrada también perpendicular al eje de la probeta, para después marcar 2 líneas más a 25mm (una en cada sentido) consiguiendo así la zona calibrada a 50mm que es la que se usará para medir la deformación durante el ensayo.

Se toman 3 medidas de anchura y 3 de espesor, una en cada una de las tres líneas dibujadas anteriormente en la zona calibrada.

Para la obtención de estas medidas se emplea un micrómetro digital de Mitutoyo.

Finalmente se procede a marcar 2 puntos, que servirán para que el equipo de toma de medidas de deformación, un videoextensómetro de la casa Instron, siga la evolución de la deformación durante el proceso de ensayo.

En la siguiente figura 5.2 , muestra ya preparada para la mejor comprensión del proceso de preparación esta.

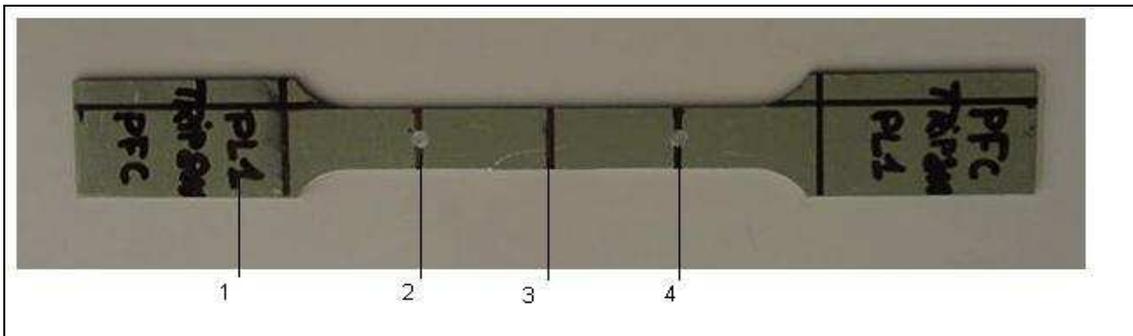


Fig.5.2.-1) nomenclatura de la muestra. 2 y 4) líneas a 50mm para toma de medidas, y para colocación de puntos para toma de datos de deformación del equipo de videoextensometría. 3) línea de centro de la zona calibrada.

5.1.3- Configuración de equipo y programa antes de realizar el ensayo.

Una vez preparada la muestra el siguiente paso trata de preparar la máquina y el programa que controla el ensayo. La máquina de tracción en cuestión es una Instron 5585H con una carga máxima a tracción de 250kN, y el programa es Instron Bluehill.

Para la toma de datos de deformación se usa un equipo de videoextensimetría que permite tomar datos de deformación, en este tipo de ensayo solo se precisan datos de deformación uní axial.

El primer paso es la calibración de los diferentes elementos del equipo (célula de carga, videoextensómetro, presión de las mordazas).

Una vez realizada la calibración se procede a configurar el programa para conseguir el ensayo deseado.

Los parámetros básicos usados en este ensayo:

- velocidad de bastidor: 2,5 mm/min
- toma de datos de deformación axial en %.
- toma de datos de carga aplicada
- entrada de anchura y espesor medias de la muestra

En la Fig. 5.3 se puede observar los diferentes componentes el equipo necesario para la realización de este ensayo.

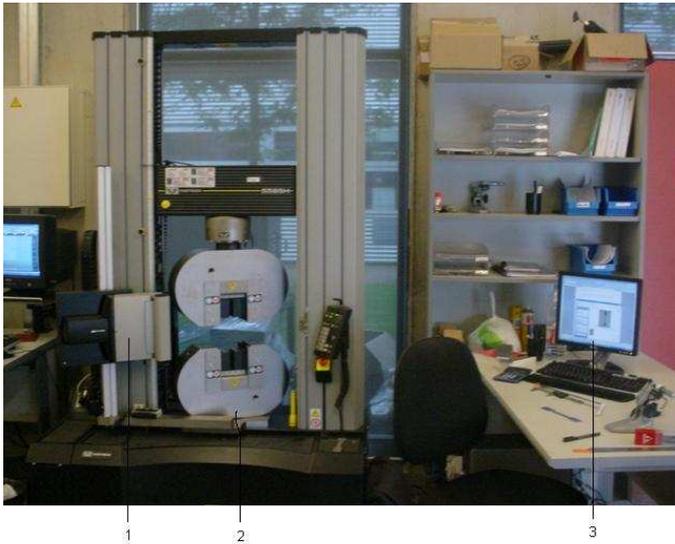


Fig. 5.3- Equipo para realización del ensayo de tracción. 1)equipo de videoextensimetría.2)máquina de tracción Instron 5585H. 3) computadora para control y

toma de datos.

5.1.4- Colocación de la probeta:

Una vez introducidos los parámetros de ensayo se procede a la colocación de la probeta como se observa en la fig.5.4.



Fig.5.4- Colocación de la probeta.

5.1.5- Inicio de ensayo

Una vez colocada la probeta, se procede a la localización de los puntos mediante el videoextensómetro, para obtener una longitud inicial de referencia mediante la cual poder calcular el tanto % de deformación que se va produciendo a medida que aumenta la carga. Se introducen los datos de anchura y espesor de la probeta, y se inicia el ensayo.

En la siguiente fig.5.5 vemos la pantalla del programa para realizar un ensayo a tracción.



Fig. 5.5- pantalla del programa para ensayo de tracción uní axial. El gráfico resultante de tracción deformación en la parte superior.

5.1.6- Fin de ensayo

Una vez finalizado el ensayo, se toma la medida resultante de la anterior zona Calibrada inicial (50mm). A partir de este se calcula el Δl y se contrasta con el obtenido para asegurar la fiabilidad de los datos del equipo de videoextenseometría.

5.2- Procesado de datos del ensayo a tracción.

Para consultar los cálculos de este apartado consultar Anexo I.

5.2.1- Obtención gráfica $\sigma - \varepsilon$

Una vez finalizado el ensayo, se procede a calcular las diferentes propiedades mecánicas del material.

Primeramente, y partiendo de los datos en bruto obtenidos del ensayo, se hace una hoja Excel para cada sentido de laminación, que contiene tensión (MPa) – deformación (%), para cada probeta.

El siguiente paso es graficar mediante la ayuda del programa Origin las curvas con los datos anteriores.

Una vez obtenidas las curvas para cada muestra, usamos la gráfica para obtener los valores de:

- Límite elástico (σ_0) Mpa (0,2%)
- Resistencia máxima (σ_m) en MPa
- Deformación plástica homogénea (ε_p) en %
- Deformación a rotura (ε_r) en %

5.2.2- Cálculo del Incremento de longitud Δl

El Incremento de longitud (Δl) en % se define como:

$$\Delta l = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (5.1)$$

Donde:

- Longitud final (l_0)
- Longitud inicial (l_f)

Este incremento se calcula de dos formas, la primera mediante el gráfico y la segunda mediante la toma manual de longitud final para comprobar que concuerda.

5.3- Cálculo del exponente de endurecimiento n , modelo de Ludwick Hollomon Y de Voce- kocks.

Posteriormente se muestra la ley de Ludwick Hollomon:

$$\sigma = K * \varepsilon^n \quad (5.2)$$

Donde:

n = coeficiente de endurecimiento

K = constante de Hollomon

ε = deformación verdadera

Modelo de Voce-Kocks:

$$\sigma = \sigma_{sat} * [1 - \exp(-W\varepsilon)] \quad (5.3)$$

Donde:

σ_{sat} = Esfuerzo de saturación

W = longitud de dislocaciones restauradas multiplicada por $M/2b$.

ε = deformación verdadera

Debe decirse que para el cálculo de las ecuaciones, primero se obtienen los valores mediante Origin, se busca los valores en el gráfico y después de obtener esos valores aproximados se ha realizado el ajuste mediante iteraciones según el criterio de Levenberg- Marquard, con el fin de obtener el ajuste más preciso posible.

5.3.1- Metodología empleada para el cálculo de n y de la ecuación que rige el comportamiento plástico del material según el modelo Ludwick-Hollomon.

-Una vez obtenida la curva $\sigma - \varepsilon$:

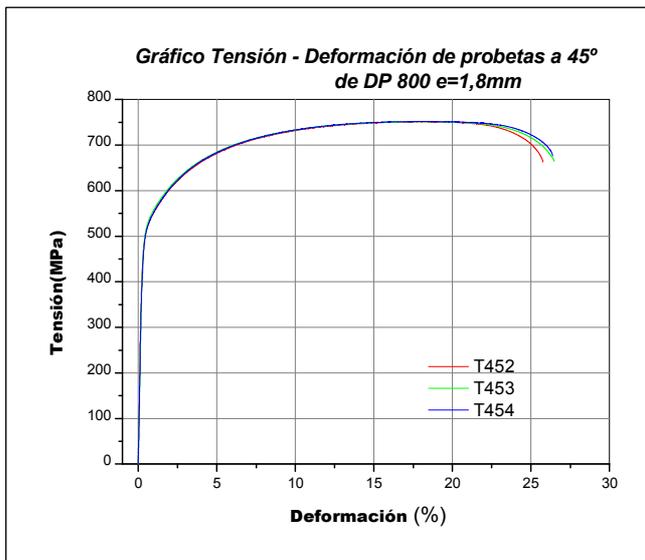


Fig.5.7-Gráfico tensión-deformación ingenieril.

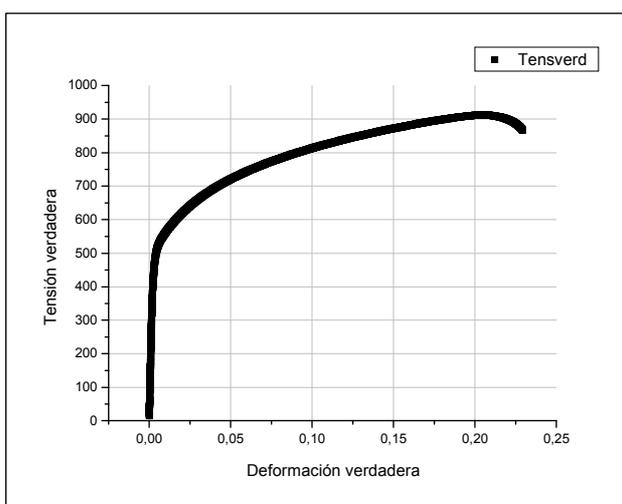
a) Primeramente se hace una recta media de las tres obtenidas. A partir de ella, se procede a convertir la curva a $\sigma - \varepsilon$ verdadera (Fig 5.8), mediante la aplicación en la columna de resultados de las siguientes fórmulas :

$$\sigma_{verdadera} = \sigma_{eng} \times (1 + \varepsilon_{eng} / 100) \quad : \text{Tensión verdadera} \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_{verdadera} = \ln(1 + (\varepsilon_{eng} / 100)) \quad : \text{Deformación verdadera} \quad (5.5)$$

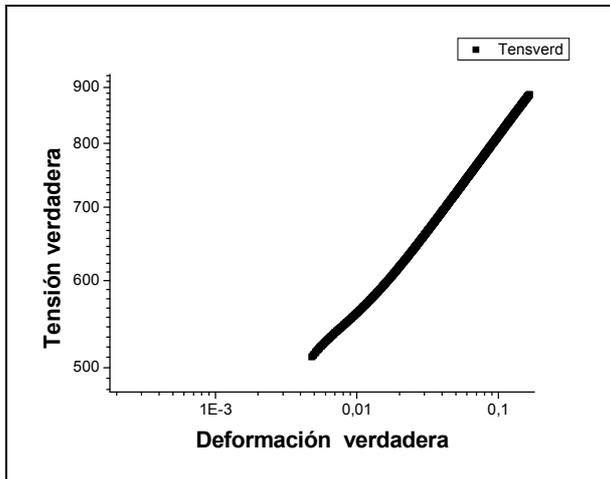
Obteniendo:

Fig 5.8- Gráfico tensión-deformación verdadera



b) Seguidamente se seleccionan los valores comprendidos entre el límite elástico y σ_{max} , puesto que el interés se centra en la zona plástica, y que a partir de la zona de estricción cambia el comportamiento del material.

Una vez obtenido el nuevo gráfica se le aplica escala logarítmica en los dos ejes como se muestra a continuación (Fig 5.9).



5.9- Gráfico tensión-deformación verdadera logarítmica.

c) En la gráfica resultante se calcula n y K mediante el pendiente(n) y K como la inversa del ln del valor A de la recta de regresión obtenida.(fig.5.10).

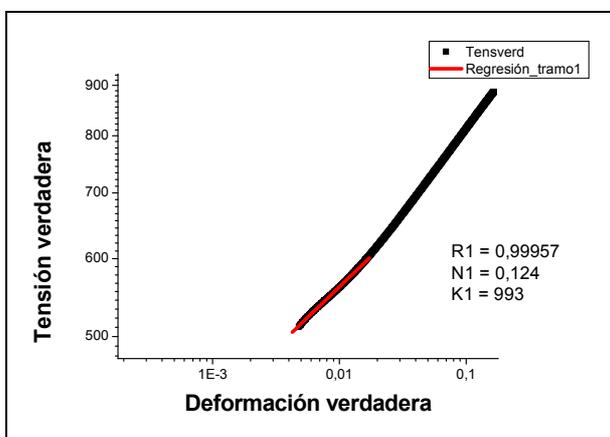


Fig 5.10- pendiente endurecimiento del material: Recta de regresión 1

Linear Fit for T45Hollomon_Tensverd on linearized scales.

$yscale(Y) = A + B * xscale(X)$ where $scale()$ is the current axis scale function.

Parameter	Value	Error
A	2,99693	4,86309E-4
B	0,12383	2,39854E-4

R	SD	N	P
0,99957	5,27136E-4	233	<0.0001

Fig 5.11-Tabla obtenida recta regresión primer tramo de la recta $B=n$.

y K como la inversa del \ln del valor A .

Los valores de k y n utilizados para determinar las ecuaciones constitutivas del acero en estudio fueron obtenidos a partir de regresiones con valor de $R=0,98$ en el tramo inicial, $R=0,99$ en el tramo final y $R=0,98$ en todo el rango de deformación plástica uniforme (global). Así, se observan dos pendientes en el endurecimiento del material, uno inicial muy pequeño y uno final que abarcaría prácticamente toda la deformación plástica.

d) Se realiza la misma operación para calcular la segunda pendiente de endurecimiento y se hace el mismo proceso para las dos pendientes conjuntas para obtener una ecuación global (Fig 5.11).

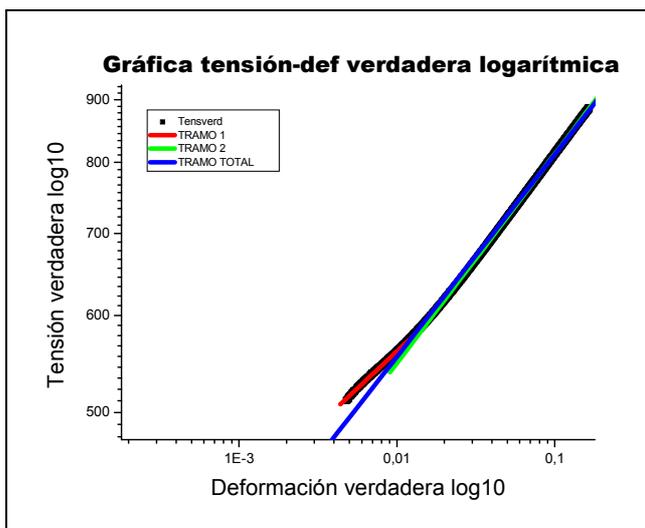


Fig.5.11- Las diferentes rectas de regresión, tramo 1,2 y total.

e)Una vez obtenidos los valores, se grafican las curvas encima el gráfico $\sigma - \epsilon$ verdadera para ver la aproximación real obtenida y comprobar si la ecuación constitutiva aplicada(5.2) es la correcta para definir el comportamiento del material.(Fig.5.12)

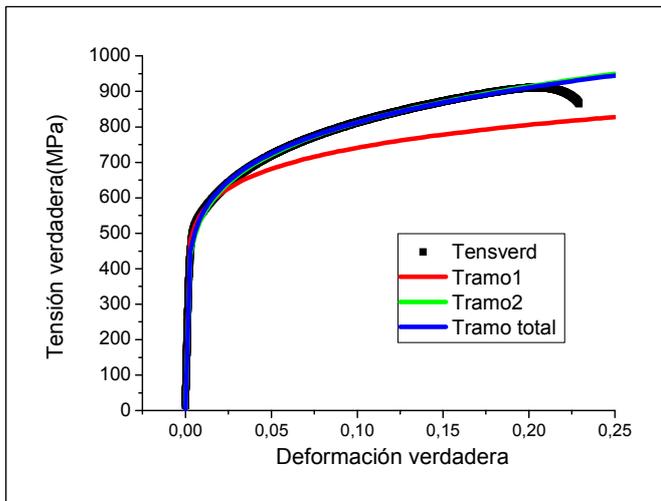


Fig.5.12- Gráfico comparativo ajuste de curvas teóricas vs. Curva $\sigma - \varepsilon$ verdadera.

5.3.2- Metodología empleada para el cálculo de la ecuación que rige el comportamiento plástico del material según el modelo de Voce-Kocks.

a) Obtener curva media de las tres muestras. A partir de ella, se procede a convertir la curva a $\sigma - \varepsilon$ verdadera, mediante la aplicación de las fórmulas (5.4) y (5.5), obteniendo fig.5.13.

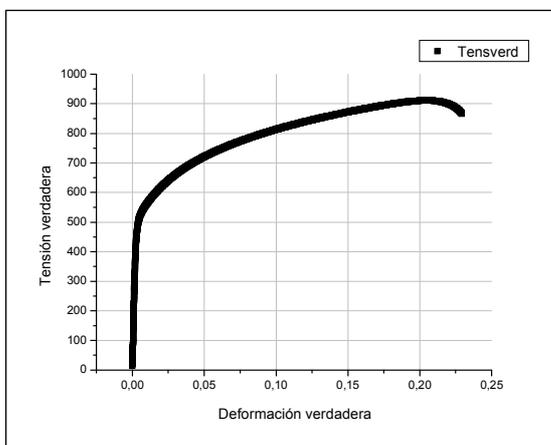


Fig 5.13- Gráfico tensión-deformación verdadera

b) Seguidamente se seleccionan los valores comprendidos entre el límite elástico y σ_{\max} , puesto que el interés se centra en la zona plástica (fig 5.14), y que a partir de la zona de estricción cambia el comportamiento del material.

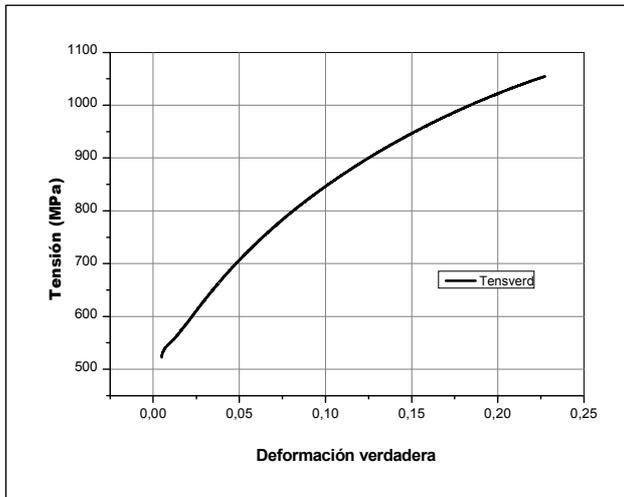


Fig 5.14- Gráfico tensión-deformación verdadera, tramo seleccionado.

c) Se deriva el gráfico obtenido $\sigma - \varepsilon$ verdadera (Fig.5.14), obteniendo $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ en el eje Y y ε verdadera en X.(fig.5.15).

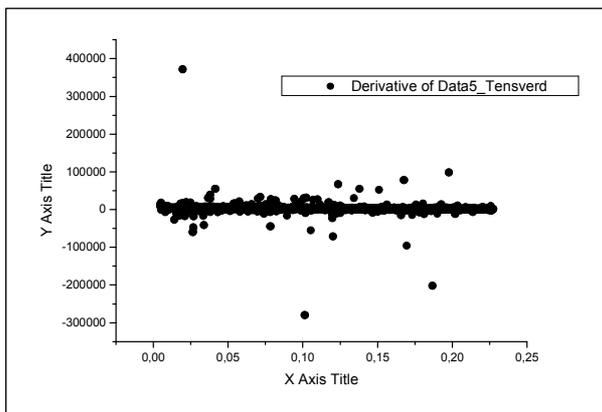


Fig.5.15-Derivada gráfica 5.14.

d) se grafica $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ (Y) en función de $\sigma_{verdadera}$ (X), como se muestra en la fig.5.16 y se hace la recta de regresión de los puntos obtenidos con el fin de obtener $\sigma_{saturada}$ y W que responde al pendiente de la recta.

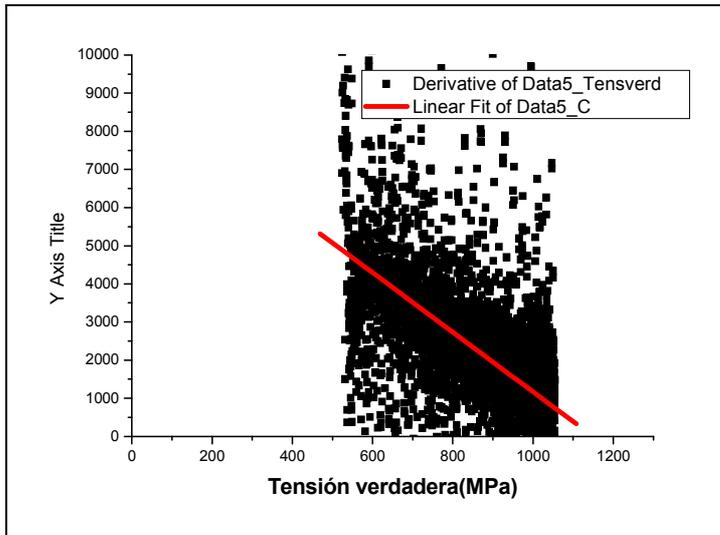


Fig.5.16-Gráfico $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} - \sigma_{verdadera}$, el punto de corte en X,,es la $\sigma_{saturada}$, que se calcula igualando la ecuación a 0.

e)Se aplica los valores a la ecuación(5.3) y se grafica sobre la curva a $\sigma - \varepsilon$ verdadera original para comparar hasta que punto ajusta(Fig.5.17).

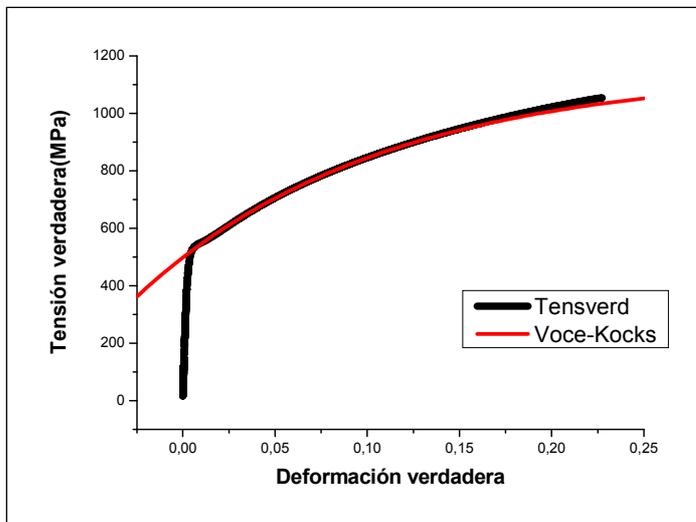


Fig.5.17-Curva experimental y ajuste del modelo Voce-Kocks.

5.4- Resultados y discusión de resultados

5.4.1-Resultados DP800.

5.4.1.1-Resultados del ensayo a tracción DP800 .

Para ver los resultados de una forma más detallada, consultar Anexo I A.1.1, A.1.2 y A.1.3.

Tabla 5.1- Propiedades mecánicas de DP800 extraídas de ensayos de tracción.

Orientación	Límite elástico, MPa	Resistencia máxima, MPa	Deformación plástica homogénea, %	Deformación a rotura, %
Longitudinal	516±1	759±1	17,5±0,3	25,4±0,5
Transversal	519±1	762±2	17,4±0,2	26,3±0,3
A 45°	509±5	751±1	18,2±0,2	26,5±0,4

Se observan unos valores de resistencia a la rotura que superan los 750 MPa en todas las orientaciones ensayadas, obteniéndose en las probetas orientadas transversalmente a la dirección de laminación los valores más altos de resistencia y de límite elástico. Los menores valores de $\sigma_{R0,2}, \sigma_{max}$, son para 45° pero esta orientación también tiene los mayores valores de $\epsilon_{homogenea}, \epsilon_{rotura}$.

Pese a las pequeñas diferencias, se observa un global bastante semejante para todas ellas, siendo una indicación de que probablemente sea un material bastante isotrópico, duda que se resolverá en la fase experimental III.

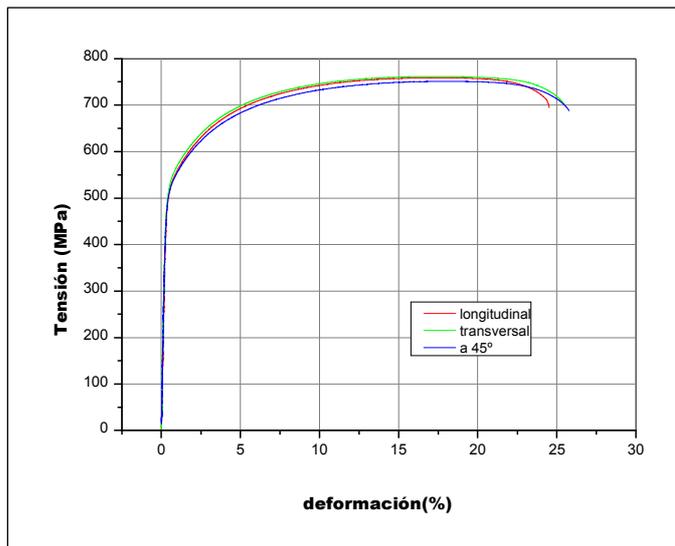


Fig.5.13- Curvas tensión vs. Deformación ingenieril según orientaciones ensayadas para Dp800

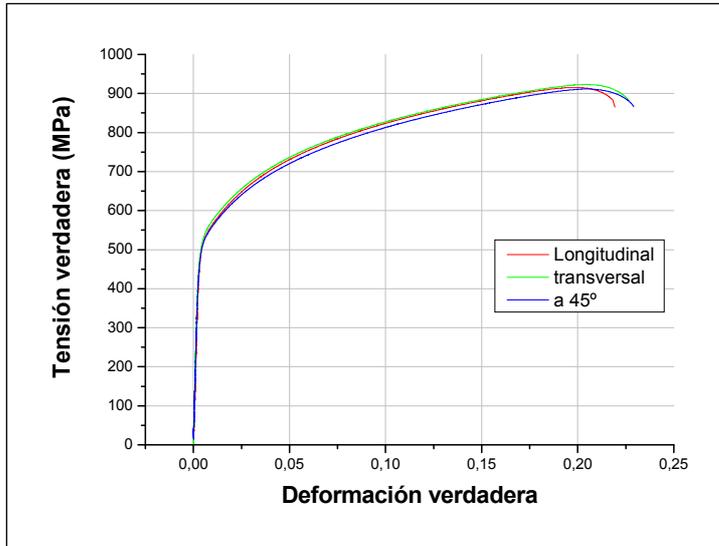


Fig.5.14- Curvas tensión vs. Deformación verdaderas según orientaciones ensayadas para Dp800

5.4.1.2- Resultados coeficiente n y ecuación de Hollomon para Dp800.

Para ver cálculos con más detalle consultar Anexo I apartado A.1.4, A.1.6, A.1.8.

Tramo	Longitudinal	Transversal	A 45°
Inicial	$\sigma = 1016 * \epsilon^{0.127}$	$\sigma = 1036 * \epsilon^{0.127}$	$\sigma = 979 * \epsilon^{0.121}$
Final	$\sigma = 1230 * \epsilon^{0.172}$	$\sigma = 1210 * \epsilon^{0.165}$	$\sigma = 1204 * \epsilon^{0.171}$
Global	$\sigma = 1206 * \epsilon^{0.166}$	$\sigma = 1196 * \epsilon^{0.161}$	$\sigma = 1188 * \epsilon^{0.165}$

Tabla 5,2- Resultados obtenidos para cada orientación de n y Ley de Hollomon

En la tabla 5.2 se muestran las diferentes ecuaciones que definen el comportamiento del material y los diferentes valores de n según el tramo escogido como se ha explicado en el apartado 5.3.1.

Se observa que para la orientación longitudinal tiene valores k y n más elevados respecto a las otras orientaciones, teniendo esta orientación un comportamiento de mayor endurecimiento en etapas de deformación.

Se distinguen dos tramos de endurecimiento:

-Un tramo **inicial**, con valores de **n** más pequeños en el rango de la deformación plástica que va del inicio hasta aproximadamente un 0,012 de deformación.

-El tramo **final**, desde una deformación de 0,012 hasta el final de la deformación plástica uniforme (0,16) o inicio de la estricción, donde el valor de **n** aumenta.

5.4.1.3-Resultados Cálculo Voce Kocks DP800.

Para cálculos detallados consultar anexo I, A.1.5, A.1.7 y A.1.9.

DP800	VOCE KOCKS
Longitudinal	$\sigma = 916,5 * [1 - \exp(-16,4 * \varepsilon)]$
Transversal	$\sigma = 934,4 * [1 - \exp(-13,37 * \varepsilon)]$
A 45°	$\sigma = 927,15 * [1 - \exp(-13,2 * \varepsilon)]$

Tabla 5.3-Resultados Voce Kocks para probetas DP800.

Se observa que para las orientaciones transversal y a 45° los valores tanto de σ_{sat} como W son muy parecidos, a diferencia de los resultados de la orientación longitudinal, en la cual σ_{sat} es menor, no obstante W es mayor.

Observando las curvas de ajuste de este modelo con respecto a la curva verdadera (Fig.1.8, 1.13 y 1.18 del anexo I), se extrae un comportamiento de ajuste muy parecido para las tres orientaciones, puesto que se consigue en todas ellas unos resultados bastante buenos de aproximación aunque tanto en la parte inicial como en la final la ecuación no acabe de ajustar del todo bien con respecto a la curva verdadera.

5.4.2- Resultados para Trip800.

5.4.2.1-Resultados tracción Trip800

Para resultados detallados consultar anexo A, apartado A.2.1, A.2.2 y A.2.3.

Tabla 5.4- Propiedades mecánicas de **TRIP800** extraídas de ensayos de tracción.

Orientación	Límite elástico, MPa	Resistencia máxima, MPa	Deformación plástica homogénea, %	Deformación a rotura, %
Longitudinal	522 ± 1	840 ± 4	25,4 ± 0,4	31,6 ± 0,5
Transversal	546 ± 2	844 ± 1	24,3 ± 0,7	30,3 ± 0,3
A 45°	557 ± 1	842 ± 3	26,0 ± 0,2	33,1 ± 1,0

Se observan unos valores de resistencia a la rotura que superan los 800 MPa en todas las orientaciones ensayadas, obteniéndose en las probetas orientadas transversalmente a la dirección de laminación los valores más altos de resistencia y más bajos de deformación.

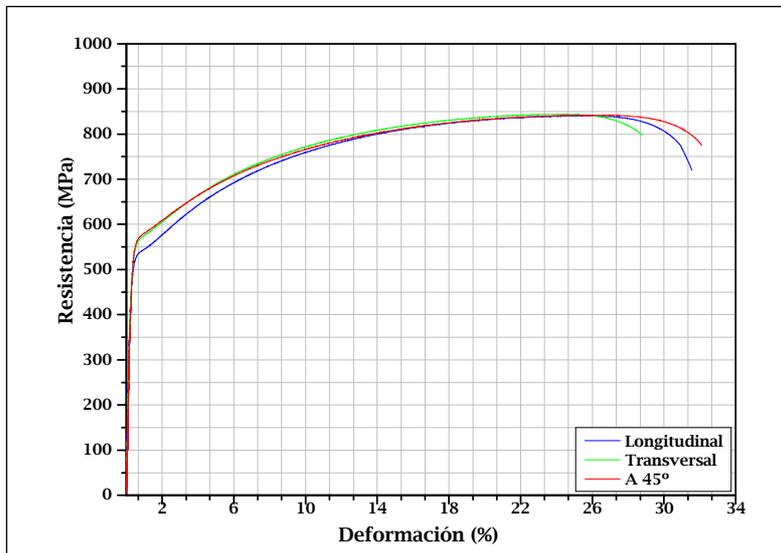


Fig.5.14- Curvas tensión vs. Deformación ingenieril según orientaciones ensayadas.

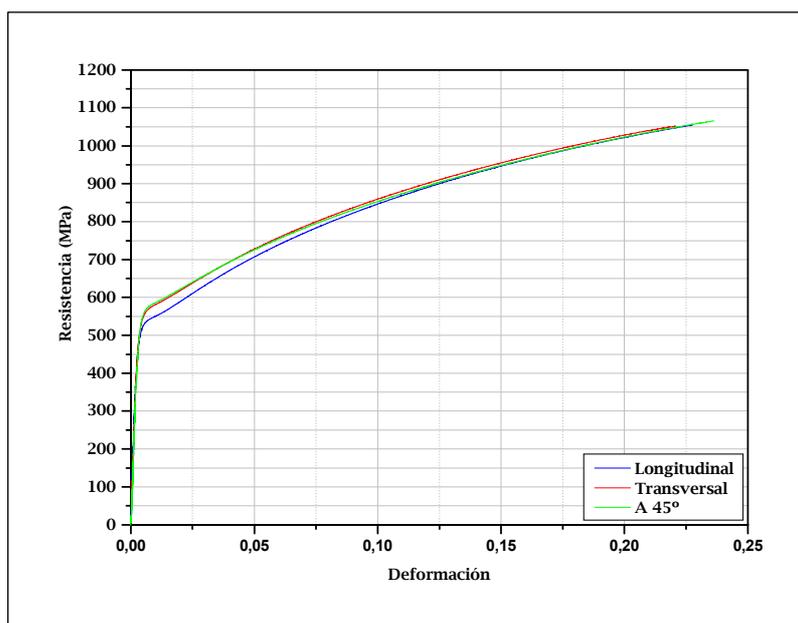


Figura 5.15- Curvas tensión vs. Deformación verdadera según orientaciones ensayadas.

5.4.2.2- Resultados Cálculo coeficiente n y ecuación de Hollomon para Trip800.

Se distinguen dos pendientes de endurecimiento:

Un tramo **inicial**, con valores de **n** más pequeños en el rango de la deformación plástica que va del inicio hasta aproximadamente un 0,03 de deformación.

El tramo **final**, desde una deformación de 0,03 hasta el final de la deformación plástica uniforme o inicio de la estricción, donde el valor de **n** aumenta.

Tramo	Longitudinal	Transversal	A 45°
Inicial	$\sigma = 847 \cdot \varepsilon^{0,093}$	$\sigma = 911 \cdot \varepsilon^{0,097}$	$\sigma = 900 \cdot \varepsilon^{0,093}$
Final	$\sigma = 1555 \cdot \varepsilon^{0,262}$	$\sigma = 1524 \cdot \varepsilon^{0,247}$	$\sigma = 1511 \cdot \varepsilon^{0,245}$
Global	$\sigma = 1515 \cdot \varepsilon^{0,250}$	$\sigma = 1405 \cdot \varepsilon^{0,208}$	$\sigma = 1399 \cdot \varepsilon^{0,208}$

Tabla 5,5- Resultados obtenidos para cada orientación de n y Ley de Hollomon

En el Trip, al igual que pasó con el DP, la ecuación constitutiva muestra mayores valores tanto de K como de n en la orientación longitudinal, teniendo en consecuencia un mayor endurecimiento por deformación esta orientación respecto las otras.

5.4.2.3- Resultados Cálculo Voce Kocks para TRIP800.

Para cálculos detallados consultar anexo I, A.2.7.

TRIP800	VOCE KOCKS
Longitudinal	$\sigma = 1256,12 * [1 - \exp(- 5,75 * \varepsilon)]$
Transversal	$\sigma = 1262,4 * [1 - \exp(- 5,7 * \varepsilon)]$
A 45°	$\sigma = 1226,81 * [1 - \exp(- 6,04 * \varepsilon)]$

Tabla 5.3-Resultados Voce Kocks para probetas TRIP800.

Se observa que para las orientaciones transversal y longitudinal los valores tanto de σ_{sat} como W son muy parecidos, a diferencia de los resultados de la orientación a 45° , en la cual σ_{sat} es menor, no obstante W es mayor.

Observando las curvas de ajuste de este modelo con respecto a la curva verdadera (Fig.2.14, 2.16 y 2.18 del anexo I apartado 2.7), se extrae un comportamiento de ajuste muy bueno para las tres orientaciones respecto la curva verdadera, exceptuando un pequeño tramo inicial de la longitudinal en el que la aproximación no es tan exacta.

6.-Fase experimental II: Determinación del Modulo Elástico del material (E)

Para la obtención del módulo elástico, se hará un ensayo de tracción uní axial al mismo tiempo que con otro equipo se tomarán datos sobre la micro deformación que se produce en la muestra.

El cálculo del modulo se realiza mediante medidas de micro deformación debido a la necesidad de precisión en la deformación, puesto que la fiabilidad de los datos dependen de ello.

Al inicio se extrajo el modulo de la curva $\sigma - \varepsilon$ calculada en la fase experimental I y se comprobó que la fiabilidad de sus resultados es muy baja, puesto que los valores obtenidos fueron significativamente menores que los esperados.

Debido a que la intención del ensayo es calcular el módulo elástico, todo el ensayo se producirá dentro del régimen elástico del material para obtener la relación entre micro deformación producida respecto a la tensión en que se ve sometido el material.

Para asegurar que el ensayo se produce dentro del régimen elástico se coge el valor del límite elástico para cada material calculado en el apartado anterior y se elige un valor más bajo.

Para la determinación del módulo elástico (**E**), se han realizado ciclos de 0 a 300 Mpa para DP800 y ciclos de 0 a 400 para TRIP800, descartando las curvas de carga i descarga del ciclo inicial.

El ensayo se ha realizado según el procedimiento ATXX_5I_4P_221, inspirado en la norma EN 10 002-1, parte 1.

A continuación se procede a la descripción de la metodología empleada para llevar a cabo este ensayo, seguidamente de la descripción del método de cálculo y para finalizar este apartado los resultados finales para cada uno de los materiales.

6.1.-Metodología de ensayo

6.1.1- Equipo necesario para la realización del ensayo

Para realizar el cálculo del módulo elástico, se dispondrá de un equipo para la realización de ensayos a tracción (máquina universal Instron 5585H de 250 KN de carga máxima), un extensómetro para calcular que deformación se produce durante el ensayo, y un equipo para la toma de micro deformaciones, compuesto por una computadora para la toma de datos y un sensor de bandas (a través de un puente weatstone) para que mediante una galga extensométrica colocada en la muestra, poder obtener las micro deformaciones que se van produciendo durante la realización del ensayo. Este equipo se puede visualizar en la fig.1.

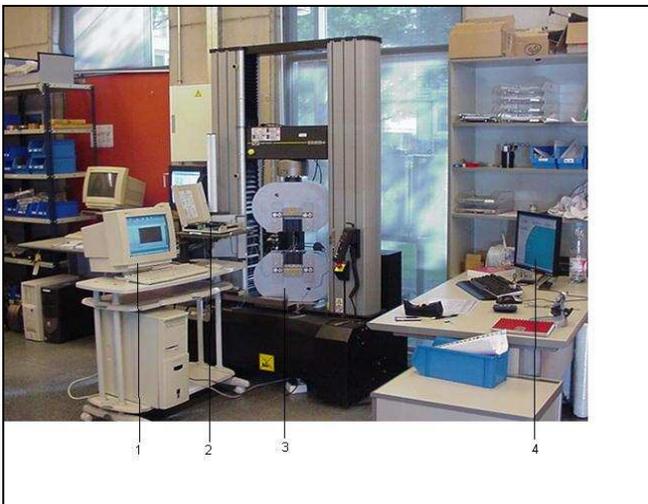


Fig.6.1-1)computadora para extracción de datos del sensor de bandas..2)sensor de bandas, puente de weatstone.3)máquina ensayos universal Instron.4)computadora para datos máquina Instron.

6.1.2-Descripción de las muestras

Previo a la realización del ensayo se mecanizaron un total de 5 probetas de tracción en la dirección longitudinal respecto a la dirección de laminación de la chapa para cada material a estudiar. Las dimensiones de las probetas normalizadas fueron de 12mm de anchura, 2 mm de espesor para TRIP800 y 1,8 para DP800 y 75 mm de longitud calibrada de probeta.

6.1.2- Preparación de la muestra

La probeta, por una de sus caras se prepara de la misma manera que cuando se trata de un ensayo de tracción uní axial, es decir, se escribe la nomenclatura de la probeta, se dibuja la línea que define el punto medio de la zona calibrada y a partir de esta se traza una línea a 25mm en cada dirección para así obtener la zona calibrada de 50mm.

Se toman 3 medidas de anchura y tres de espesor dentro de la zona calibrada mediante micrómetro.

En la otra cara, y debido a la necesidad de la colocación de una galga extensométrica, se debe preparar de una forma más cuidadosa.

Pasos:

6.1.2.1-Preparación de la superficie

Primeramente se debe pulir la zona donde se colocará la galga con el fin de eliminar deposiciones no deseadas, hacer una superficie uniforme y apta para el adecuado posicionamiento de la galga.

El pulido se realiza con papel abrasivo de 240, 400, 800 y 1200 respectivamente.

b)Una vez pulida la zona y comprobada la inexistencia de defectos en la zona de interés mediante una lupa óptica.

c)Se aplica acetona por encima la superficie para limpiarla.

d) se aplica un neutralizador líquido con el fin de eliminar las posibles tensiones superficiales generadas por este proceso.

e)La superficie ya está preparada, solo queda hacer una pequeñas marcas con un punzón para centrar el punto donde se quiere colocar la galga.

Fig. 6.3- Detalle montaje galga. 1) Cables de cobre levantados para evitar contacto con probeta. 2) celo por debajo de los cables para evitar contacto, celo por encima para fijar el cable que tiene plástico impermeable con la muestra. 3) La banda extensométrica, marca TML, modelo FLA-2-11-1L. 4) cable para conexión de galga con puente de weatstone.

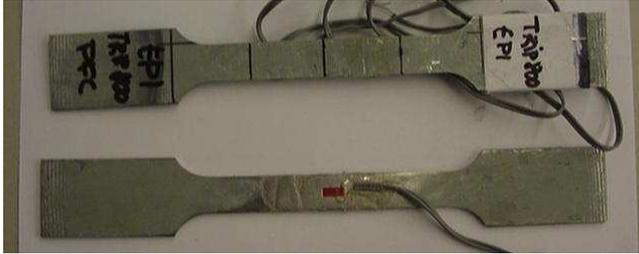


Fig. 6.4- Las dos caras de la muestra una vez preparadas para el ensayo.

6.1.6-Configuración del equipo y programa antes de realizar el ensayo

Una vez preparada la muestra, el siguiente paso es calibrar los diferentes elementos del equipo, por una parte los referentes a la máquina de tracción (célula de carga, extensómetro, ajuste sensibilidad mordazas), y por otra, la del equipo de toma de datos de la banda (calibración de micro deformaciones para que el programa empiece a 0).

Una vez realizada la calibración se procede a configurar el programa, por una parte, el Bluehill en la computadora que controla la máquina de tracción;

Parámetros claves:

- velocidad de bastidor: 1 mm/min
- toma de datos de deformación axial mediante el extensómetro en %
- toma de datos de carga aplicada
- introducción de medidas probeta
- se fija un límite de tensión por debajo del límite elástico
- se fijan 4 ciclos de carga y descarga que lleguen hasta este límite fijado.
- entrada de anchura y espesor medias de la muestra.
- Se fija un tiempo para captura de datos que coincida con el del programa del sensor de bandas.

Por otra parte, se configura el programa que controla y recoge los datos del sensor de bandas. Este programa está echo con Labview y lleva el nombre de micro deformaciones, en el simplemente se debe introducir el número de datos que se quieren por segundo.

6.1.5-Colocación de la muestra:

Una vez preparada la muestra, se procede a preparar el equipo para ensayar. Se coloca la probeta en la máquina de tracción, se cierran las dos mordazas.

Seguidamente se conectan los dos cables de la galga al puente de weatstone y también se conectan los dos cables de otra galga que tenemos dispuesta en otra muestra y que hace de banda complementaria (banda de referencia).



Fig.6.5- puente de weatstone.

Una vez conectados los 4 cables como se ve en el esquema de la fig.6, se conecta el puente de weatstone al sensor de galgas, como se ve en la figura 7.

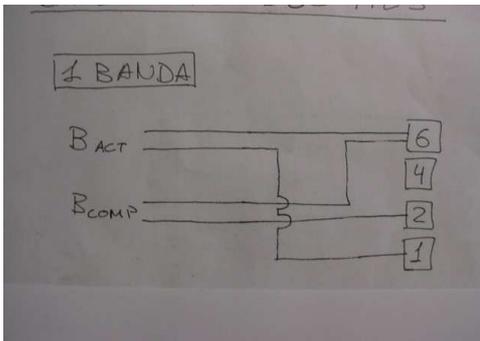


Fig.6.6- Esquema colocación cables banda activa-banda complementaria en puente de weatstone.

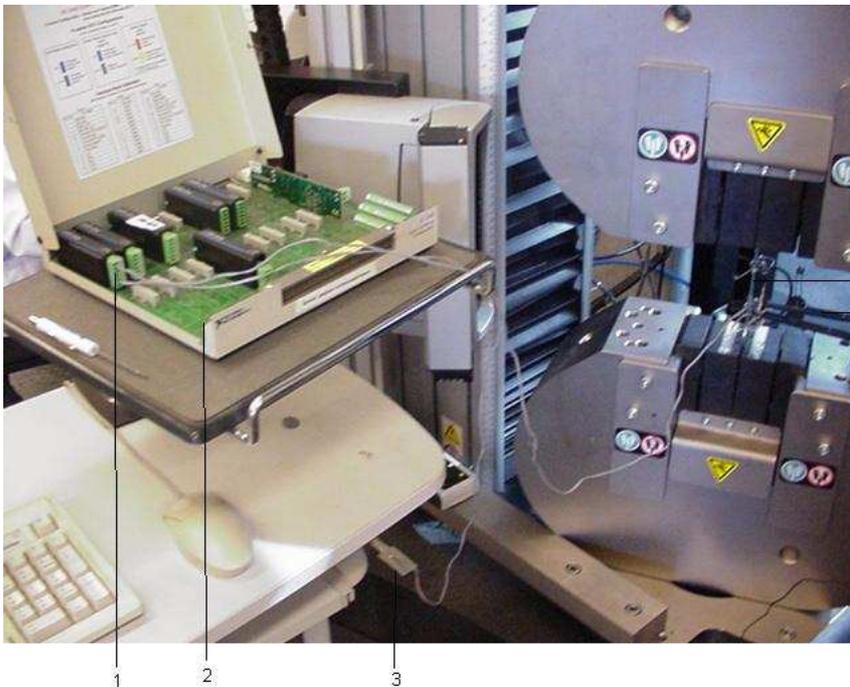


Fig.6.7- Detalle colocación muestra.
1) puente de weatstone.
2) sensor de galgas.
3) muestra con banda

complementaria. 4) muestra a ensayar. 5) extensómetro.



Fig.6.8- Detalle de colocación del extensómetro. Este, aunque no son necesarios los datos de deformación que mide, se coloca para así tener controlado el % de deformación que se produce en cada momento del ensayo y asegurar de este modo que no se sobrepasa el límite de deformación deseado.

6.1.7-Comienzo de ensayo

Una vez los dos programas están preparados, se enciende primero el programa de captación de micro deformaciones, y seguidamente se da comienzo al ensayo.

El ensayo hará cuatro cargas y cuatro descargas, siempre en la zona elástica del material.

6.1.8-Fin de ensayo

Al finalizar el ensayo, se obtienen dos gráficos diferentes, una del ensayo a tracción en el que se relaciona $\sigma - tiempo$ (Fig.6.9) y otro mediante el equipo de medida de micro deformaciones *microdef - tiempo* (Fig.6.10).

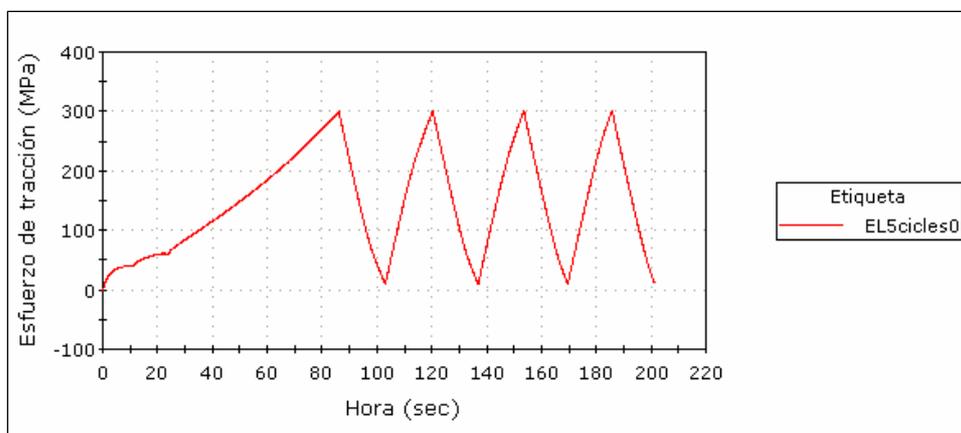


Fig.6.9-Gráfico $\sigma - tiempo$ para probeta DP800.

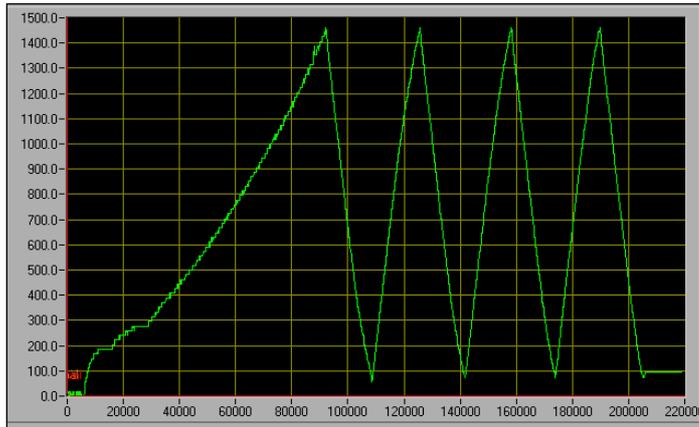


Fig.6.10- Gráfico *microdef* – tiempo (ms) para probeta DP800.

6.2- Metodología de cálculo

Durante el ensayo se han aplicado ciclos consecutivos de carga y descarga (dentro de la zona de comportamiento lineal del material), calculando posteriormente por interpolación lineal y con un coeficiente de regresión mínimo r de 0.999, las distintas pendientes obtenidas de la curva tensión – deformación para cada uno de estos ciclos, obteniendo como resultado 8 valores de módulo para cada muestra.

Posteriormente se ha calculado el promedio de los resultados.

Para consultar cálculos detallados ver Anexo II.

6.2.1- Cálculo modulo elástico

a) Primeramente se distinguen mediante Excel los tramos de carga y de descarga tanto para Tensión como para micro deformación.

Una vez separado cada tramo de carga y descarga, se obtienen $c1,d1,c2,d2,c3,d3,c4,d4$, que son las distintas cargas y descargas producidas durante el ensayo.

b) Se hace una hoja de Excel para cada tramo, con una columna de tensión y otra de micro deformación.

c) Seguidamente mediante Origin se gráfica obteniendo el gráfico $\sigma - \mu\epsilon$ (Fig.6.11).

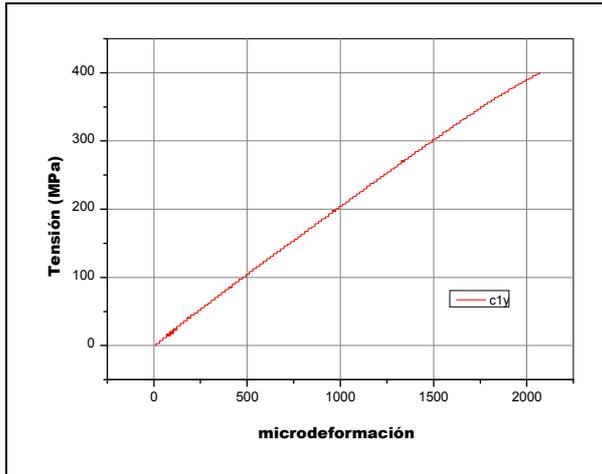


Fig.6.11-Gráfico $\sigma - \mu\varepsilon$ del ciclo de carga 1(c1).

d) Para finalizar se hace la recta de regresión como se indica en fig.6.12, obteniendo los parámetros

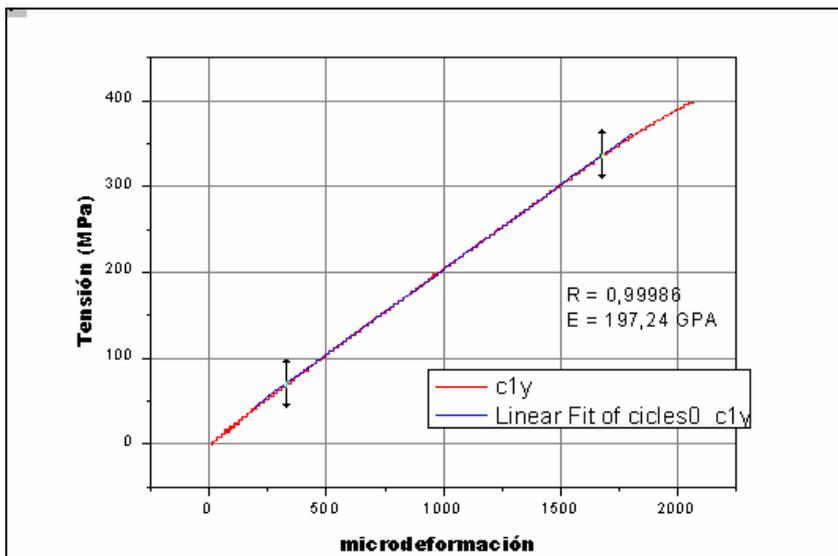


Fig.6.12-Recta de regresión gráfico $\sigma - \mu\varepsilon$.

Parameter	Value	Error
A	5,74336	0,17856
B	0,19724	1,71513E-4

R	SD	N	P
0,99986	1,30446	364	<0.0001

Fig.6.13-Parámetros de la recta de regresión obtenida.

6.3- Resultados y discusión.

Para determinar el módulo de elasticidad promedio de cada probeta ensayada, no se tuvo en cuenta el primer ciclo de tracción (**C1 + D1**), ciclo en el cual éstas sufren la adaptación a las mordazas del equipo, lo que provoca alteraciones en la pendiente de la recta tensión versus deformación a partir de la cual se calcula el valor de **E**.

6.3.1- Resultados obtenidos Dp800.

	Ciclos de tracción (C, carga – D, descarga) a 300MPa								Promedio
	C1	D1	C2	D2	C3	D3	C4	D4	
P1	199,38	207,42	209,04	208,33	208,29	208,58	207,72	208,25	208,4±0,4
P2	197,46	206,47	208,04	207,41	207,61	206,92	207,11	207,60	207,5±0,4
P3	190,86	201,55	202,53	202,58	203,09	202,83	202,70	202,49	202,7±0,2
P4	205,03	206,68	207,54	208,01	208,34	208,23	208,65	208,64	208,2±0,4
P5	192,75	206,63	204,85	205,08	205,88	205,25	204,83	204,93	205,1±0,4
Promedio									206,4±2,4

Tabla 4. Resultados del cálculo del Módulo elástico o de Young (GPa)

6.3.2-Resultados obtenidos Trip800

Tabla 6. Valores del módulo de elasticidad (E) extraídos de los ensayos.

	Ciclos de tracción (C, carga – D, descarga) a 400MPa								Promedio
	C1	D1	C2	D2	C3	D3	C4	D4	
P1	197,2	199,5	199,2	199,2	199,9	199,7	199,5	200,1	199,6±0,4
P2	139,4	199,2	199,0	199,5	199,3	199,8	199,7	199,5	199,4±0,3
P3	197,9	198,7	198,4	198,5	198,2	198,5	198,9	198,6	198,5±0,2
P4	194,0	196,8	196,2	198,2	198,5	198,4	198,5	198,5	198,0±0,9
P5	194,8	197,5	199,5	198,5	199,0	199,3	199,9	199,2	199,2±0,5
Promedio									198,9±0,7

7.- Fase experimental III

Para la obtención del coeficiente de anisotropía plástica r (consultar apartado 4), se han realizado ensayos con la máquina de tracción uní axial.

Todo este procedimiento para calcular el coeficiente de anisotropía plástica se efectuó según la norma **UNE36-404-88**.

A continuación se procede a la descripción de la metodología empleada para llevar a cabo este ensayo, seguidamente de la descripción del método de cálculo de las distintas variables y para finalizar este apartado los resultados finales para cada uno de estos materiales.

7.1- Metodología de ensayo

7.1.1- Descripción de las muestras

Previo a la realización del ensayo se mecanizaron un total de 15 probetas de tracción en las direcciones Longitudinal, Transversal y a 45° respecto a la dirección de laminación de la chapa para cada material. Las dimensiones de las probetas normalizadas fueron de 20mm de anchura, 2 mm de espesor y 120 mm de longitud calibrada de probeta, como se muestra en la siguiente figura.

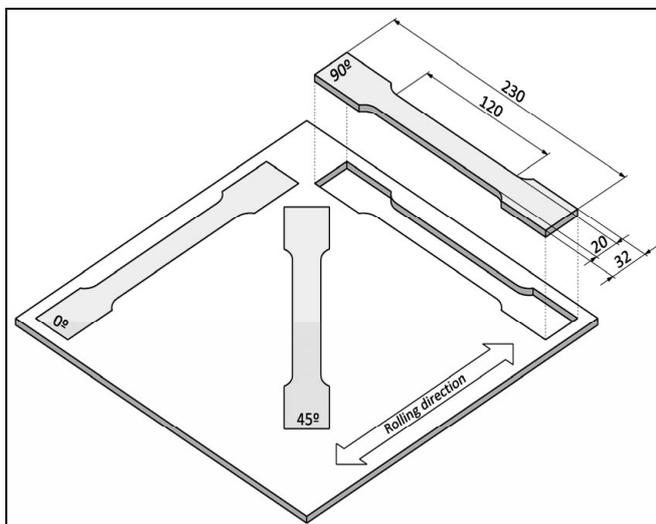


Fig.7.1- esquema sentido y dimensiones de probetas



Fig7.2-Total muestras extraídas ensayo cálculo coeficiente anisotropía plástica para DP800.

7.1.2- Preparación de la muestra

Se toman 11 medidas de anchura y 11 de espesor de la muestra, con el fin de tener una media lo más fiel posible puesto que es sumamente importante en el proceso de obtención del coeficiente de anisotropía plástica la exactitud de estas medidas.

Para la obtención de estas 11 medidas se emplea un micrómetro digital de Mitutoyo.

Seguidamente se procede a marcar la línea de centro de la zona calibrada, para a partir de esta marcar una línea a 25mm y una a 40mm en cada sentido, que posteriormente servirá para posicionar las marcas necesarias para tomar medidas de deformación con el videoextensómetro la de 50mm; la de 80mm será la que se tomará como longitud inicial de la zona calibrada, para una vez terminada el ensayo obtener la longitud final de modo manual para poder hacer los cálculos de modo manual y contrastarlos con los obtenidos del videoextensómetro.

En la fig.7.3 una probeta con las diferentes partes del proceso.

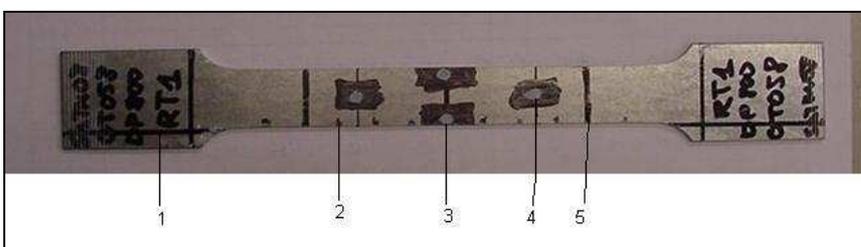


Fig7.3- Pasos preparación probeta: 1) Nomenclatura de la probeta 2) marcas para medición de dimensiones 3) Puntos para medición videoextensométrica transversal 4) marcas para medición en sentido axial.5) marca a 40mm del centro, distancia total 80mm (longitud inicial).

7.1.3- Configuración de equipo y programa antes de realizar el ensayo.

Una vez preparada la muestra el siguiente paso trata de preparar la máquina y el programa que controla el ensayo. La máquina de tracción en cuestión es una Instron 5585H con una carga máxima a tracción de 250kN, y el programa es Instron Bluehill.

Para la toma de datos de deformación se usa un equipo de videoextensimetría que permite tomar datos de deformación tanto en sentido axial como transversal al sentido de tracción simultáneamente.

El primer paso es el de calibración de los diferentes elementos del equipo (célula de carga, videoextensómetro).

Una vez realizada la calibración se procede a configurar el programa para conseguir el ensayo deseado.

Los parámetros básicos usados en este ensayo:

- velocidad de bastidor: 2,5 mm/min
- toma de datos de deformación axial en %
- toma de datos de deformación transversal en %
- toma de datos de carga aplicada
- entrada de anchura y espesor medias de la muestra

El ensayo se realiza solo hasta el final de la zona de deformación homogénea, antes de empezar la estricción, por lo consiguiente se introduce el valor de deformación máxima a que se quiere llegar, para luego descargar evitando que queden tensiones en la probeta y poder calcular el coeficiente r de una forma correcta ya que sin esta descarga no se tendría en cuenta el efecto springback, que se define como la recuperación elástica del material una vez se deja de aplicar la carga.

El total de la deformación homogénea se obtiene de la curva $\sigma - \varepsilon$, del ensayo realizado previamente a tracción uní axial (Fase experimental I).

7.1.4- Colocación de la probeta

Una vez introducidos los parámetros de ensayo se procede a la colocación de la probeta como se observa en la fig.7.4.

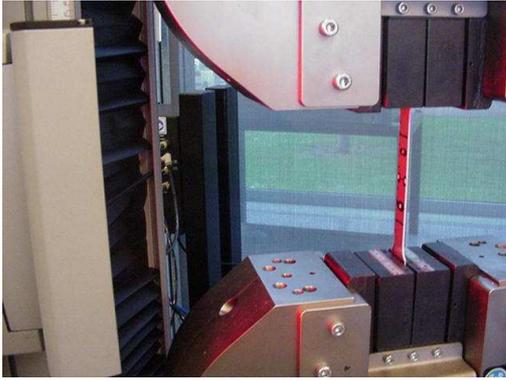


Fig.7.4- Colocación de la probeta

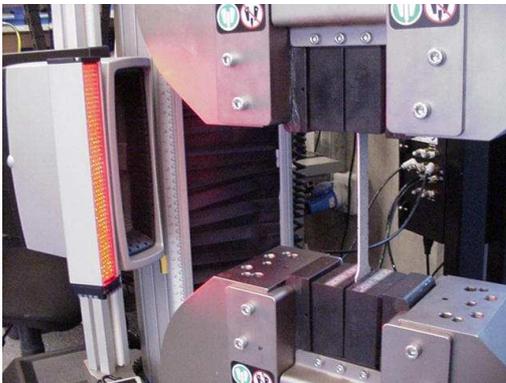


Fig.7.5- Detalle del equipo de videoextenseometría

7.1.5-Inicio de ensayo

Una vez realizados los pasos anteriores ya se puede proceder a ensayar. En la fig. 7.6 se muestra la pantalla del programa que controla el ensayo.

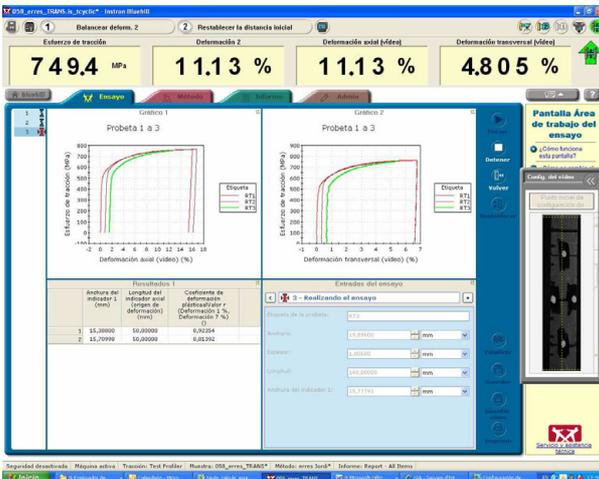


Fig.7.6- pantalla del programa de control, donde se observa gráfico $\sigma - \epsilon_{axial}$ a la zona superior izquierda, gráfico $\sigma - \epsilon_{transversal}$ a la superior derecha. En estos gráficos se aprecia la descarga en el último tramo cuando el ensayo llega al límite de deformación homogénea como se ha explicado anteriormente. También se observa a la zona derecha de la imagen la captación de puntos en la probeta por videoextenseometría.

7.1.6-in de ensayo

Una vez obtenidos los resultados del ensayo, se procede a medir la longitud final obtenida. Para ello se usa un pie de rey de Mitutoyo, en concreto el modelo Absolute digimatic.

Finalmente queda tomar las medidas de anchura y espesor de la probeta ensayada, para obtener así A_f i e_f , para poder calcular el coeficiente de anisotropía con el modo manual.

7.2- Procesado de datos

7.2.1- Cálculo del coeficiente de anisotropía plástica (r)

Para consultar cálculos detallados ver Anexo III.

Para el cálculo de r se utilizan las expresiones del apartado C.2.4 del anexo IV.

Una vez obtenidos los gráficos de deformación axial, deformación transversal y tensión, se introducen a una tabla Excel previamente diseñada (Tabla 7.1) para extraer los cálculos de r y ver la evolución de esta durante el ensayo.

El valor que se considerará válido será cuando termine el ciclo de descarga, cuando la tensión sea zero, subrayado en azul en la tabla 7.1.

En la tabla 7.1 se muestra un ejemplo de este cálculo y se especifica las características de cada variable.

También se realiza el cálculo de r mediante el método manual, es decir, se toman medidas de la probeta después de deformar tanto de Anchura como espesor, y de longitud total.

RLG3	A0	Af	Lf	Coef. R Anchura	Coef.R Espesor
	19,953	18,769	92,210	0,756	0,892
Ef	1,676				
Eo	1,795				

Tabla 7.2- Cálculo manual de coeficiente r para probeta RL3 de DP800.

Donde:

$$r_{anchura} = \left(\frac{\ln(A_f / A_0)}{\ln(A_f * L_f / (A_0 * L_0))} \right) \quad (7.1)$$

$$r_{espesor} = \left(\frac{\ln(A_f / A_0)}{\ln(e_f / e_0)} \right) \quad (7.2)$$

Tabla 7.1- Ejemplo de cálculo de coeficiente de anisotropía plástica para probeta RL3 de DP800, se ha cogido un intervalo representativo de valores en el gráfico puesto que la adquisición de datos del programa es de un dato por segundo.

<i>Anchura inicial (b0)</i>	19,875
<i>Longitud inicial (L0)</i>	49,1
<i>Modulo Young (E)</i>	208020
<i>Coef. Poisson</i>	0,3

DAtos MAQUINA

Def1(amplada)	Def2 (long)	Tensión (MPa)	Anchura(A)	Longitud(L)	Anchura final(Af)	Longitud final(Lf)	Coef. R
0,00685	0,0052	7,42642	19,9516	49,9226	19,9519	49,9207	1,349838872
0,01262	0,06399	102,00909	19,9505	49,9519	19,9535	49,9265	0,171428007
0,02244	0,11798	200,36958	19,9485	49,9789	19,9545	49,9289	-0,30033606
0,03433	0,25897	404,44919	19,9462	50,0493	19,9583	49,9482	0,318323021
0,1169	0,46609	501,75702	19,9297	50,1527	19,9447	50,0269	0,240818968
0,70298	1,80587	600,35095	19,8127	50,8215	19,8309	50,6671	0,704529356
1,25978	3,10377	650,12634	19,7016	51,4694	19,7214	51,2980	0,750539597
2,16636	5,33214	700,07013	19,5207	52,5818	19,5423	52,3894	0,75680776
4,28462	10,65024	750,01843	19,0981	55,2366	19,1218	55,0093	0,780324987
6,31853	16,00083	763,60901	18,6923	57,9076	18,7170	57,6534	0,798514149
6,27426	15,71485	381,77487	18,7011	57,7649	18,7135	57,6378	0,805511885
6,18455	15,34924	-0,01028	18,7190	57,5823	18,7190	57,5823	0,808584196

Donde:

$$\text{Anchura} \quad A = b_o * (1 - (\varepsilon_{trans} / 100)) \quad (7.3)$$

$$\text{Longitud} \quad L = (1 + (\varepsilon_{long} / 100)) * L_o \quad (7.4)$$

$$\text{Anchura final} \quad Af = A / (1 - ((\mu * Lf * \sigma) / (L_o * E))) \quad (7.5)$$

$$\text{Longitud final} \quad Lf = L_o * \left(-1 + \sqrt{(1 + 4 * (1 + \varepsilon_{long} / 100) * \sigma / E)} \right) \quad (7.6)$$

$$\text{Coeficiente r} \quad r = (Ln(b_o / Af)) / (Ln((Af * Lf) / (b_o * L_o))) \quad (7.7)$$

7.2.2- Cálculo de la anisotropía normal y planar (\bar{r} y Δr).

Una vez calculados las diferentes r para cada sentido del material (0°, 45° y 90°) se procede al cálculo de \bar{r} y Δr (Fig.7.7).

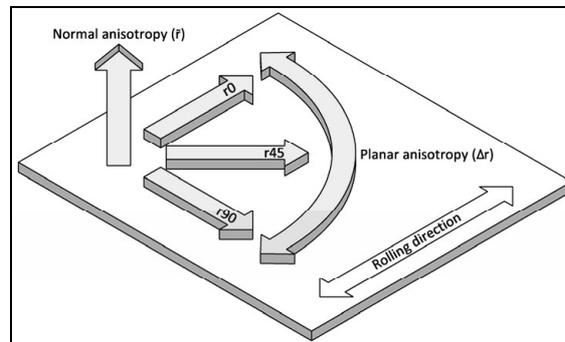


Fig.7.7- Anisotropía planar y normal

Para obtener los valores, se aplican las siguientes fórmulas:

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (7.8) \quad \text{Donde: } r_0, r_{45}, r_{90} \text{ son los coeficientes r de las diferentes direcciones de probeta obtenidos en el apartado anterior.}$$

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (7.9)$$

7.3- Resultados

7.3.1- Resultados para DP800

	<i>Probetas ensayadas hasta Deformación Homogénea (16%)</i>			<i>Valor r Promedio</i>	<i>Desviación</i>
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>		
<i>Longitudinales</i>	0.81	0.82	0.81	0.81	± 0.01
<i>Transversales</i>	0.92	0.91	0.90	0.91	± 0.01
<i>A 45°</i>	1.02	1.00	1.02	1.01	± 0.01
<i>Cálculo de la anisotropía normal</i>	$r = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} = \frac{0.81 + (2 * 1.01) + 0.91}{4}$			0.94	-
<i>Cálculo de la anisotropía plana</i>	$r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} = \frac{0.81 - (2 * 1.01) + 0.91}{2}$			-0.15	-

Tabla7.2- Cálculo del coeficiente de anisotropía plástica o r para DP800.

7.3.2-Resultados para TRIP800

	<i>Probetas ensayadas hasta Deformación Homogénea (23%)</i>			<i>Valor r Promedio</i>	<i>Desviación</i>
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>		
<i>Longitudinales</i>	0,95	0,95	0,94	0,95	± 0.06
<i>Transversales</i>	1,05	1,05	1,05	1,05	± 0.06
<i>A 45°</i>	0,98	1,00	0,99	0,99	± 0.04
<i>Cálculo de la anisotropía normal</i>	$r = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} = \frac{0.95 + (2 * 0.99) + 1.05}{4}$			0,994	-
<i>Cálculo de la anisotropía plana</i>	$r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} = \frac{0.95 - (2 * 0.99) + 1.05}{2}$			0,006	-

Tabla7.3- Cálculo del coeficiente de anisotropía plástica o r para TRIP800

8.- Comparativa resultados DP800 vs TRIP800.

8.1-Comparativa resultados método experimental I

8.1.1-Curva $\sigma - \varepsilon$, valores de $\sigma_{R0,2}$, σ_{max} , $\varepsilon_{homogenea}$, ε_{rotura} .

Comparando los resultados extraídos de los ensayos a tracción (Tablas 5.1 y 5.4 del apartado 5), se observa que el TRIP800 tiene valores más altos en todo.

La más elevada resistencia máxima (σ_{max}) se debe a la transformación de la fase austenita retenida a martensita, que provoca un mayor endurecimiento del material en procesos de deformación, esta transformación también le permite una mayor deformación aportando unas mejores propiedades en cuanto a alargamiento.

La mayor deformación homogénea también aportará más versatilidad en el momento de conformado, puesto que los límites alcanzables serán mayores para este material.

Su mayor límite elástico, es una arma de doble filo, pues para diseños de piezas llevados a cabo dentro de la zona elástica es una ventaja, pero por el contrario, si el material durante el conformado sufre deformación plástica este tendrá un mayor efecto springback que el DP800, además, al tener un endurecimiento más notorio que el del DP800, seguro que también esto repercutirá en la acentuación de este fenómeno en etapas de conformado.

8.1.2-Coeficiente de endurecimiento n

Los resultados de este coeficiente, una vez vistos los ensayos a tracción eran previsibles.

Se ve claramente el mayor endurecimiento del TRIP800, propiedad que le confiere mejores cualidades para usos como absorción de impacto.

En el tramo inicial, comparando resultados (tabla 5.2 y 5.5 apartado 5) el DP goza de más elevado endurecimiento inicial, sin embargo, y seguramente al inicio de la transformación austenita a martensita, la segunda pendiente acaba siendo mucho más importante para el TRIP.

Relacionado con conformabilidad (ver apartado C.2.3 Anexo IV), el mayor valor de n para TRIP implica una FLC más elevada (C.2.2), traduciéndose en mejor capacidad en límite de conformabilidad que el DP.

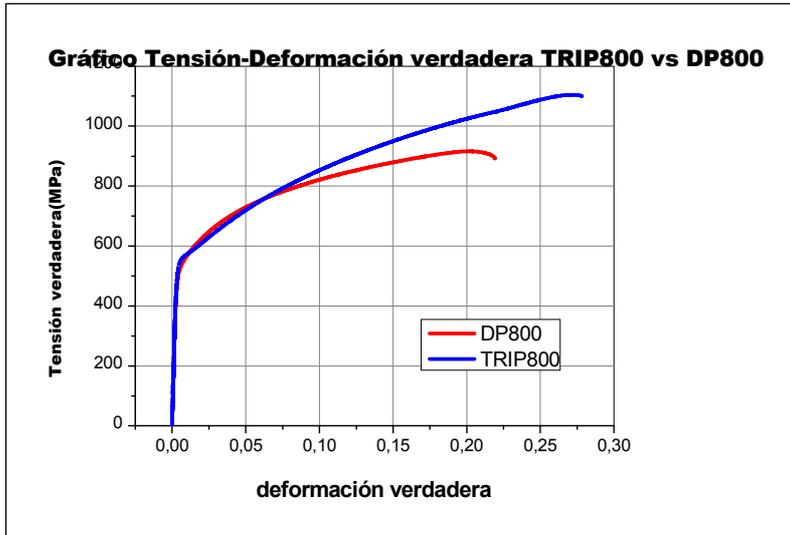


Fig.8.1-Gráfico tensión-deformación verdaderas con curvas medias para cada material para observar la diferente pendiente de endurecimiento que presenta cada material.

En el gráfico(Fig.8.1) se observa como la pendiente de endurecimiento del trip tiene durante todo el ensayo un comportamiento progresivo de subida, por el contrario el DP tiene un primer endurecimiento importante pero luego se va suavizando progresivamente, también se observa que mientras el DP empieza a aminorar(sobre los 0,175 de deformación) el pendiente el TRIP sigue endureciendo .

8.1.3- Comparativa ajuste curvas modelos Ludwick hollomon vs voce kocks

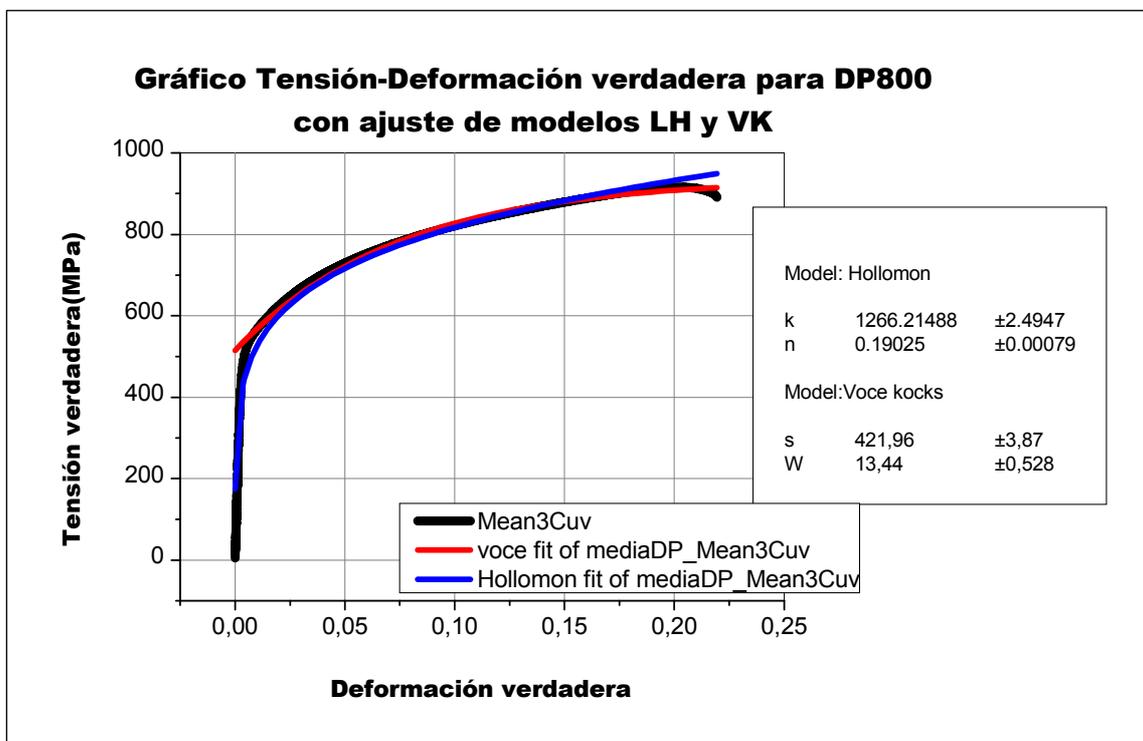


Fig.8.2-Ajuste modelos en estudio a la curva $\sigma - \epsilon$ verdaderas para DP800.

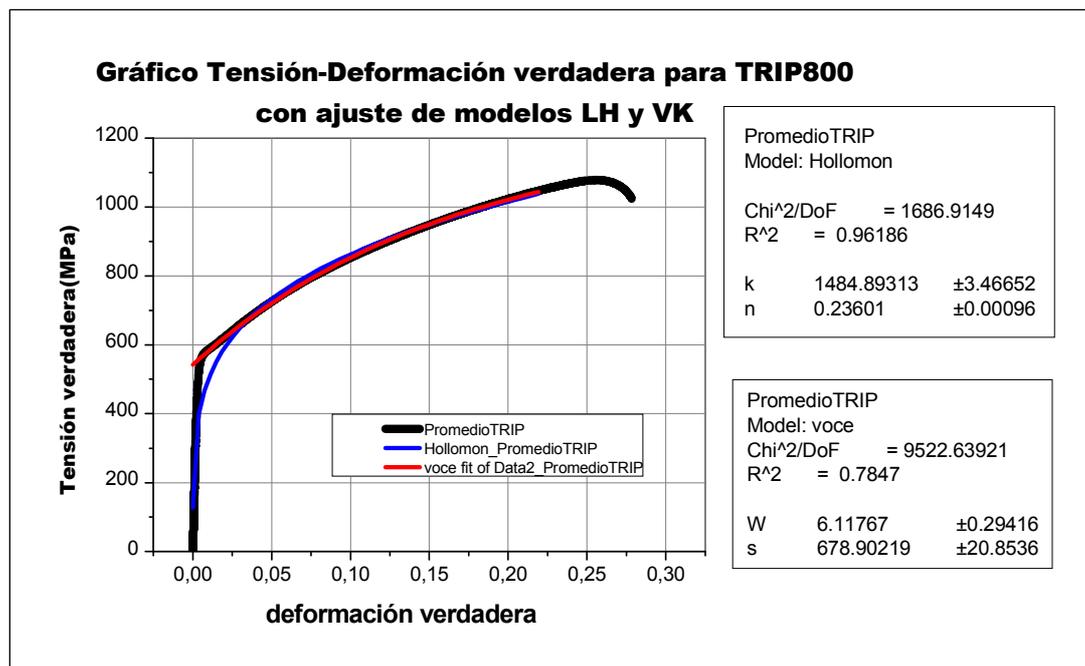


Fig.8.3-Ajuste modelos en estudio a la curva $\sigma - \varepsilon$ verdaderas para DP800.

En aceros, el ajuste más comúnmente usado para definir la comportamiento plástico del material es el de L.Hollomon. En el presente proyecto se pretende comparar el ajuste de este modelo con el de Voce Kocks, puesto que para este nuevo tipo de aceros el nivel de ajuste de Hollomon no es del todo satisfactorio.

En la Fig.,8.2, se representan el modelo LH y VK en DP800, el ajuste de las dos curvas es bastante bueno en los dos casos, sería difícil decir cual es más válido.

Aplicando Hollomon en dos tramos, probablemente para este material (DP800) tiene una mejor curva de ajuste Hollomon, aunque no en el tramo final donde empieza a producirse estricción puesto que este modelo no contempla este fenómeno.

Aun así, el ajuste general de los dos modelos es bueno para el material y consiguientemente serán los dos adecuados para su uso en simulación.

En la fig.8.3, se representa el ajuste del modelo LH y VK en TRIP800. Para este material, al ajuste VK es significativamente mejor que el de LH.

Así, se ha obtenido una mejora al aplicar este ajuste puesto que al ajustar de un modo más preciso, se obtendrán datos más fiables en simulación que con el método de aproximación LH.

8.1.4-Comparativa resultados módulo elástico

DP800	TRIP800
206,4±2,4	198,9±0,7

Tabla.8.1_resultados obtenidos cálculo módulo elástico

En la tabla 8.1 se observa que el modulo elástico o de rigidez del material en la zona elástica es más elevado en el DP respecto al TRIP.

Estos datos son útiles en simulación y se deben tener en cuenta en etapas de diseño, puesto que para definir la zona elástica del material este es un valor indispensable, de aquí su cálculo mediante micro deformación puesto que obtener el valor lo más preciso posible es necesario si se quieren obtener resultados fiables.

8.1.5-Comparativa resultados coeficiente r, anisotropía planar y normal.

Comparando resultados de los coeficientes r para cada material (Tabla 7.2 y 7.3, apartado 7), se extrae que el TRIP, en general, tiene valores más cercanos a 1, indicando que este material tiene un comportamiento muy isotrópico, más que el DP aunque este también tiene valores notablemente elevados.

En condiciones de conformado, (apartado C.2.4. del anexo IV), como más elevado valor de r mejor propiedades ante el conformado mediante embutición profunda, por consiguiente, el TRIP800 tendrá mejor respuesta a este tipo de operaciones a primera impresión.

Para ver realmente su comportamiento en etapas de conformado hay que recurrir a resultados de anisotropía normal y planar.

Valorando los resultados obtenidos de anisotropía normal, con el TRIP se podrá obtener una profundidad más elevada de embutición respecto el DP (Fig.1.12 del anexo IV).

En cuanto a la anisotropía planar, por el contrario, el valor de TRIP es cercano a cero, (Tabla 7.3), pero positivo, teniendo como consecuencia formación de orejas (fig.1.12-anexo IV) a 0° y 90° con respecto a la dirección de laminación.

Para el DP, al tener el valor de anisotropía planar $\Delta r < 0$, tendrá formación de orejas a 45° respecto la dirección de laminación.

La combinación de altos valores de anisotropía normal \bar{r} y valores cercanos a cero de anisotropía plana Δr obtenidos para estos dos materiales, en especial para el TRIP, ofrecen un embutido óptimo con profundidades mayores y menos formación de orejas.

Siendo, por consiguiente, dos materiales con muy buenas propiedades en conformabilidad en lo referente al conjunto de sus propiedades mecánicas.

9.- Aplicación de los resultados obtenidos

9.1.- Simulación mediante elementos finitos.

9.1.1- Definición general

Una de las principales aplicaciones de los resultados obtenidos en este proyecto, tiene lugar en el campo de la simulación por ordenador de sistemas mecánicos.

La simulación por ordenador busca modelar situaciones de la vida real por medio de un programa de computadora. Como ejemplo concreto podemos mencionar la simulación del conformado de chapa, mediante la cual se puede estimar la factibilidad de producir una determinada pieza, previendo roturas y posibles problemas durante el proceso de deformación del material.

Otro ejemplo es la simulación de impacto de un vehículo (Fig.9.1), con la cual se puede estimar la eficiencia de la estructura del chasis sin necesidad de realizar pruebas reales.

Especialmente extendida es la simulación basada en el método de los elementos finitos. Este último es un método numérico muy general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales.

El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio en una serie de subdominios denominados "elementos finitos". Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». El conjunto de nodos y elementos se llama malla.

Los cálculos se realizan sobre esta malla, lo que desemboca en un sistema de ecuaciones llamado matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos calcula el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables.

9.1.2- Simulación de elementos finitos para metales

Uno de los pilares fundamentales de la simulación mediante el método de los elementos finitos es modelar correctamente la mecánica de los materiales, resulta indispensable la definición de una la relación entre tensión y deformación. En el caso de los materiales metálicos se establecen dos comportamientos bien diferenciados, el elástico, relativamente sencillo de definir, gracias a la relación lineal entre la deformación y la tensión.

Así, en este primer tramo basta conocer el módulo elástico y el módulo de Poisson para establecer las ecuaciones constitutivas de Lamé-Hooke. Aquí radica la importancia de obtener experimentalmente en este proyecto el módulo de Young.

En un segundo estadio y superado el límite elástico aparece el fenómeno de la plasticidad, mucho más complejo de modelar. Ahora se hace presente la no linealidad de la tensión con la deformación, lo que obliga a la simulación a realizar un proceso iterativo para encontrar la solución del sistema.

Aquí es determinante definir matemáticamente el proceso de acritud del material. Basándose en la definición de tensión equivalente y utilizando el criterio de fluencia de Von Mises basta conocer la relación de entre tensión deformación resultante de un ensayo de tracción uniaxial para definir las ecuaciones constitutivas del campo plástico, y si se desea ir mas allá, es posible a partir de los coeficientes de anisotropía obtenidos mediante medición de las deformaciones o mediante ensayos de tracción en diferentes direcciones, ajustar las ecuaciones constitutivas mediante el modelo de Hill el cual incorpora el efecto de la anisotropía del material.

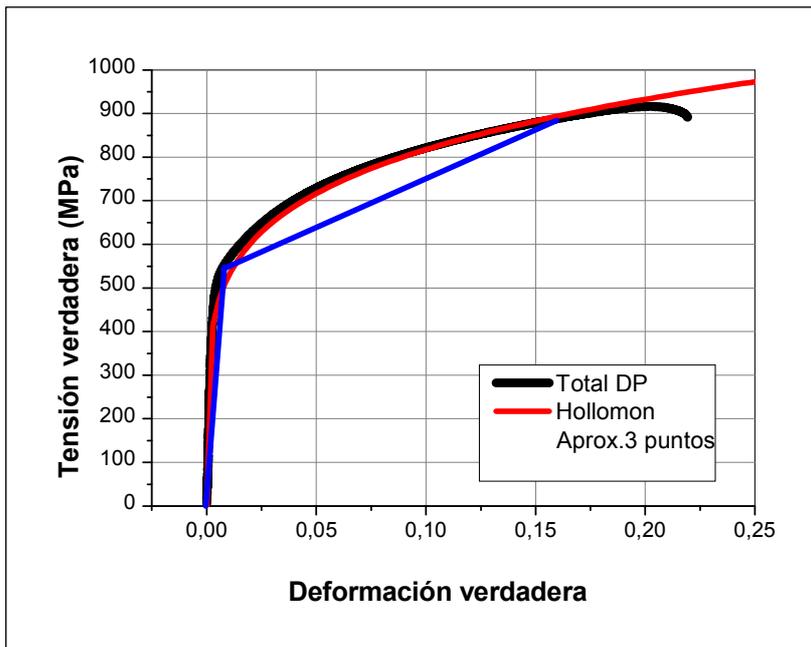
Los programas de simulación están preparados para deducir los coeficientes de estas ecuaciones, utilizando como principal entrada las curvas de tensión deformación de los materiales, debido a esto el proyecto busca obtener de la forma mas precisa posible dichas curvas.



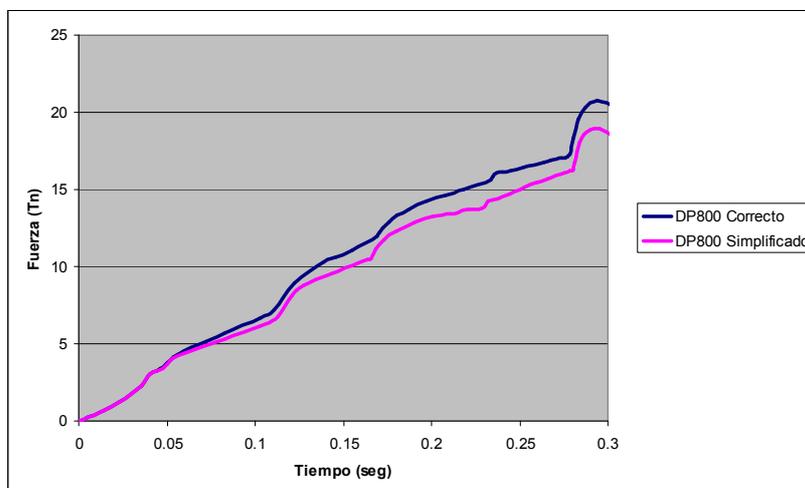
Fig.9.1-Ejemplo simulación de impacto de un vehículo, imagen superior simulación, imagen inferior prueba real, se observa el parecido del resultado final de la deformación entre ambas imágenes.

9.1.3-Ejemplo de aplicación mediante elementos finitos

Como ejemplo de la importancia de la correcta definición de los parámetros del material se realizó una simulación simplificada del embutido de una chapa circular de DP800(Fig.9.6,fig.9.7.y fig 9.8), para ello se trabajó con dos curvas de material, una simplificada y generada a partir de datos fácilmente obtenibles como son el límite elástico y la tensión-deformación máxima, y la otra a partir de una simplificación mucho mas precisa usando el modelo de Ludwick Hollomon (calculado en la fig.8.2 del apartado 8).



Un dato importante que es posible obtener a partir de la simulación es la fuerza de embutido, con la cual es factible dimensionar la maquinaria necesaria para conformar la pieza, en este caso con el modelo simplificado se obtiene una fuerza máxima inferior a 20 toneladas(Fig.9.3).



Según esos datos, una prensa de 20 toneladas es suficiente para realizar el conformado. Sin embargo, ajustando el modelo con las curvas reales observamos que es necesaria mayor fuerza, con lo cual se necesita una prensa de mas de 20 toneladas, esta metodología es extrapolable a casos mas complejos como por ejemplo el conformado de piezas de automoción (capó de un coche Fig.9.4), o la cabeza (extremo) de una barra puerta de refuerzo (Fig.9.5), en esta también se pueden observar los espesores y determinar zonas de posibles roturas.



Fig.9.4-ejemplos simulación chapa piezas de automoción.

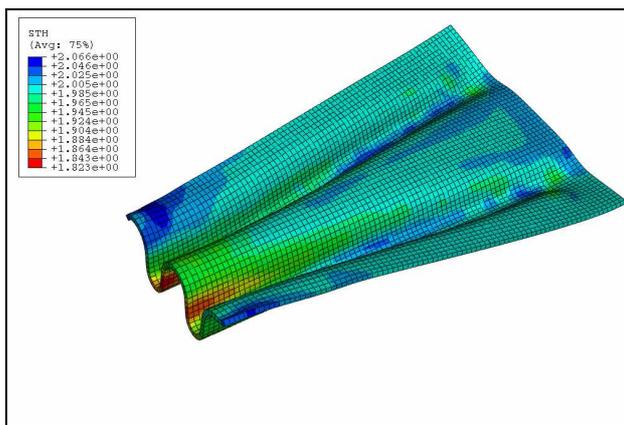


Fig.9.5-Simulación conformado chapa, extremo de la barra puerta de refuerzo.

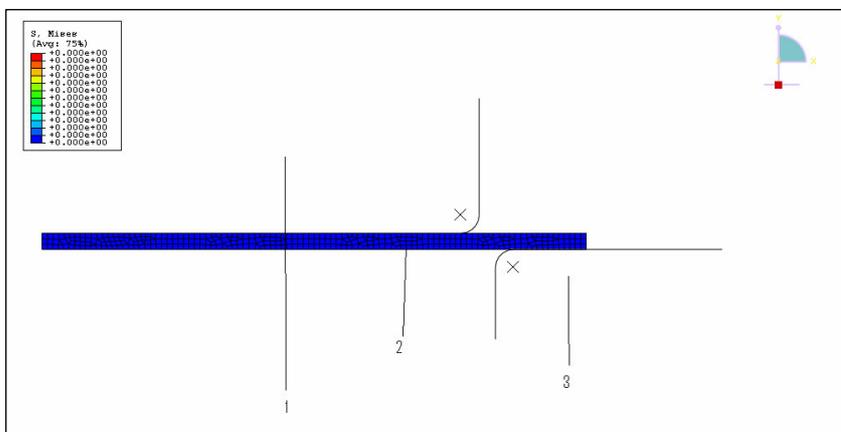


Fig.9.6-Simulación embutido de chapa realizada. En la imagen se observa una sección, donde 1 es el punzón, 2 la chapa inicial sin deformar y 3 la matriz.

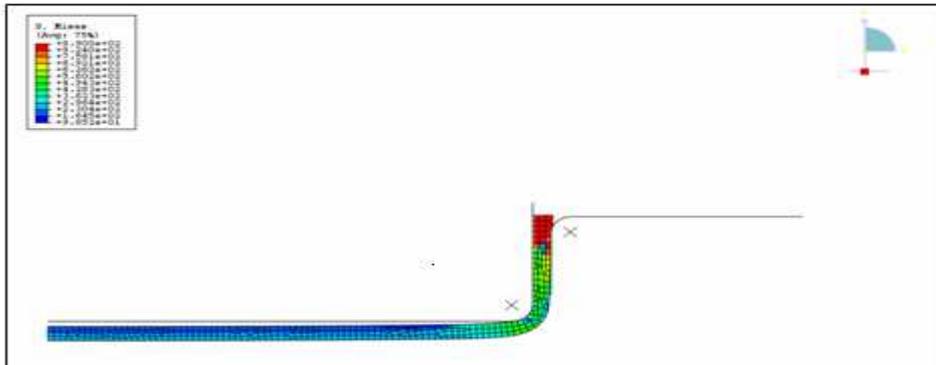


Fig.9.7-La chapa una vez el punzón a terminado su recorrido, antes de retirarse a su posición inicial. Se observa en la chapa el cambio de color. Este cambio es según el criterio de Von Misses, y va de azul a rojo, como más tiende al rojo más tensión sufre el material, en concreto, en este modelo, posiblemente fallaría el material en la zona roja pues está muy al límite de rotura.

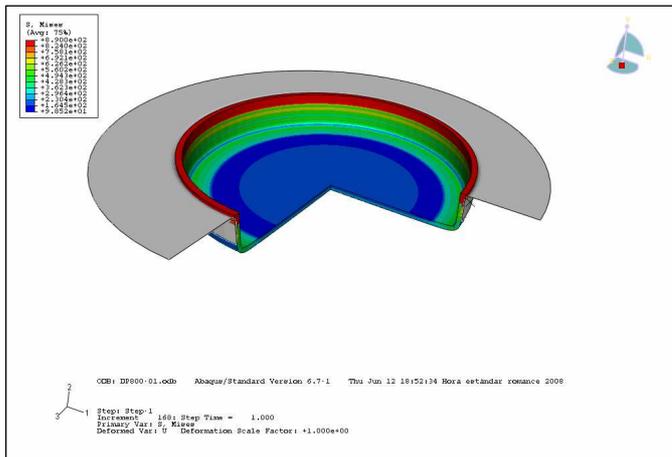
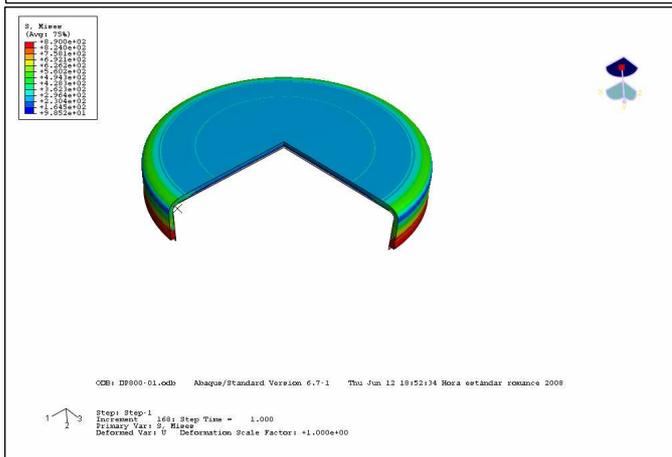


Fig.9.9-La chapa, la misma fig. que la 9.7 pero con volumen para una mejor comprensión.

En la imagen superior vista des arriba y la inferior por abajo, se aprecian los diferentes niveles de tensión que se producen al deformar la chapa.



10.-Futuras líneas de trabajo

En el presente trabajo se han caracterizado la mayoría de propiedades mecánicas de estos materiales para usarlas en simulación y técnicas de conformado, y así poder conocer mejor estos materiales con el fin de poder solucionar algún día los problemas que plantean en conformado, por eso las futuras líneas de investigación se plantean en esta dirección.

Para ampliar este trabajo, el siguiente paso sería profundizar más en operaciones de conformado, realizando ensayos de embutición erichsens, nakazimas, para obtención de curvas FLC y diagramas FLD., y el estudio de estas, puesto que se ve sin duda una manera de conocer más estos materiales y así poder hacer frente de mejor manera a los problemas de conformado que en la actualidad plantean.

Otra posible línea de trabajo sería profundizar en la aproximación de curvas teóricas de deformación, aplicando más modelos como por ejemplo el de BERGSTRÖM-ESTRIN-MECKING, o el modelo de SAH-RICHARDSON-SELLARS por ejemplo, con el fin de obtener el modelo que más ajuste para este nuevo tipo de aceros de alta resistencia.

Finalmente, el estudio del fenómeno “springback”, es una línea realmente interesante puesto es la fuente real de la mayoría de estos problemas de conformado, su predicción exacta sin duda sería un gran avance en el mundo del conformado de este tipo de metales.

11.- PRESUPUESTO

A continuación en la tabla 11.1, se presenta el presupuesto de realización del proyecto.

El presupuesto se ha dividido en cinco puntos principales: coste de los materiales, coste del proceso experimental, coste del material de oficina, el coste de desplazamiento y coste del proyectista (el peor remunerado por estar en prácticas).

En el apartado de coste de los materiales se incluyen tanto el material como el trabajo de mecanizado para la obtención de la probeta.

En el apartado de coste del proceso experimental, se incluyen los costes de los diversos ensayos realizados así como el cálculo de cada uno de ellos, es la tarifa que se aplica en el centro donde se ha desarrollado el proyecto.

En el apartado de costes de material de oficina se incluyen ordenador, hojas, tinta, etc...

En el apartado de desplazamientos se contempla kilómetros realizados por el autor para llegar al puesto de trabajo, (30 km por día a 1litro los 10 km durante 120 días laborables).

Tabla 11.1-Presupuesto proyecto

Cnocepto	Unidades	Coste unitario(€)	Coste total(€)
<u>Coste Materiales</u>			
DP800(probetas)	32	10	320
TRIP800(probetas)	32	10	320
<u>Coste experimental</u>			
Ensayo tracción	24	30	720
Ensayo modulo E	30	30	900
Ensayo Coef.r	30	30	900
Coste oficina	1	300	300
<u>Desplazamientos</u>			
Gasolina	360	1,3	468
Horas de personal	960	7	6720

Coste total del proyecto:	10648 €
---------------------------	---------

12. IMPACTO AMBIENTAL

12.1. Indicadores del impacto ambiental.

En este anexo se determinará el impacto ambiental asociado al proyecto. Para evaluar el impacto de una forma comparada se necesita una unidad de medida común, que permita cuantificar este impacto. La medida elegida es el consumo de energía asociada a las actividades estudiadas.

Se utiliza como indicador los *quilogramos de dióxido de carbono* emitidos a la atmósfera como consecuencia de las actividades estudiadas. Este indicador esta en la línea de la *huella ecológica* [12.1]. Es necesario recordar que la emisión de dióxido de carbono es una de las principales causas del efecto invernadero y del calentamiento global del planeta.

El consumo de energía y el transporte serán las variables estudiadas para determinar el impacto ambiental.

Actualmente es difícil considerar que existe un indicador ideal para medir los efectos ambientales, por eso se utiliza como indicador los *quilogramos de dióxido de carbono* emitidos a la atmósfera, ya que permiten mostrar los resultados de forma clara y comparable.

En el 1995, los urbanistas William Rees y Mathis Wackernagel, miembros del Grupo para Comunidades sanas y sostenibles de la Universidad de British Columbia, Vancouver (Canadá), introducen el concepto de huella ecológica. Este concepto se define como: *“la superficie de territorio ecológicamente productiva necesaria para generar los recursos utilizados y asimilar los residuos producidos por una población definida con un nivel de vida determinado”* [12.1].

Se trata de una herramienta de cuantificación ecológica que utiliza áreas de terreno como unidad de medida. Para expresar los resultados en unidades de terreno, existen diferentes métodos para aproximar el cálculo de las hectáreas asociadas a la producción de energía. En este proyecto se ha elegido la cantidad de tierra que se necesita para absorber el correspondiente dióxido de carbono emitido por el consumo de combustibles.

Para hacer la conversión, se sabe que el bosque de la Cataluña Central fija unos 125g de dióxido de carbono por metro cuadrado y año. Esto supone fijar 4,58Tn de dióxido de carbono por hectárea y año [12.1].

12.2 Impacto ambiental por consumos

En este apartado se estudian las necesidades energéticas de electricidad y de transporte durante el desarrollo del proyecto.

12.2.1 Consumo eléctrico.

En este apartado se considera el consumo eléctrico de las máquinas y de los equipamientos generales que representan un % considerable del consumo de electricidad durante el proyecto.

Para la electricidad el factor de conversión utilizado para determinar las emisiones de CO₂ en kilogramos de dióxido de carbono es:

0.264 kg CO₂ / kWh

Este valor se ha obtenido a partir de los datos de producción de energía eléctrica de Cataluña (este valor se ha extraído del estudio de huella ecológica de la EUPM).

En la tabla 8 se muestran los consumos eléctricos de máquinas en kWh i su conversión a kg de CO₂. Sabiendo que la cantidad de dióxido de carbono absorbida por hectárea y año es del orden de:

4,58 Tn de CO₂ / hectárea

Se puede pasar el kg de CO₂ a hectáreas de bosque necesarias para contrarrestar el impacto ambiental generado, siguiendo el modelo de huella ecológica [12.1].

Máquina/Aparato	Horas de uso	Potencia Kw	kWh	Kg CO ₂	Hectáreas
Máquina tracción	300	2,8	840	222	0,04841921
Ordenador(CTM)	960	0,2	192	51	0,01106725
Ordenador(personal)	500	0,2	100	26	0,00576419
Fluorescentes	500	0,5	250	66	0,01441048
Total consumo			1382	364,848	0,07966114

Tabla 12.1- Consumos estimados respecto al consumo eléctrico.

12.2.2. Movilidad

Uno de los impactos ambientales más importantes en la actualidad es el provocado por el transporte de personas.

Para la realización de este proyecto todos los desplazamientos se han hecho en automóvil.

Según estudios realizados por l'escola politècnica Universitària de Manresa(UEPM) se demuestra que la energía consumida por un automóvil de motor diesel es de unos 2.98MJ/Km. También es preciso saber que un motor diesel desprende energía a 35,8MJ/l i produce unos 0,88KgCO₂/litro.

Distancias recorridas:

Súria al centro tecnológico de Manresa(CTM) durante 6 meses.

El total de kilómetros asciende, después de multiplicar 30 km día por 120 días laborables de 6 meses a unos 3600 Km, que se traduce en :

$$3.600Km \cdot \frac{2,98MJ}{Km} \cdot \frac{11g\ asoil}{35,8MJ} \cdot \frac{0,88KgCO_2}{11g\ asoil} = 263,70KgCO_2$$

12.3-Resumen final

	Kg CO₂/ proyecto	Hectáreas
Consumo eléctrico	364,848	0,07966114
Consumo movilidad	263,7	0,11090306
Totales	628,548	0,19056419

Tabla 12.2- Resumen gasto total proyecto.

Como conclusión, al aplicar el modelo de cálculo de la huella ambiental, sabemos que se necesitan 0,1906 hectáreas de bosque para fijar el dióxido de carbono generado durante el desarrollo del proyecto.

Cabe destacar que el material (TRIP800 y DP800) no se incluye en el impacto ambiental puesto que estos dos materiales son 100% reciclables y por consiguiente no generan residuo.

13.- Conclusiones

Llegado a este punto, solo queda hacer una valoración final de todo el conjunto del trabajo realizado:

Se ha realizado un estudio de los materiales en cuestión, aprendiendo sus diversas propiedades y características, especialmente a nivel de propiedades mecánicas y conformado.

Se han aprendido las diferentes metodologías de ensayo para caracterizar las propiedades.

Se han realizado con éxito los ensayos obteniendo resultados muy detallados de cada propiedad del material.

Se ha probado un modelo de ajuste para la curva tensión deformación que no es el habitualmente usado y se han obtenido resultados satisfactorios.

Se ha llevado a cabo la comparación de los 2 aceros en estudio.

Se ha llevado a cabo un ejemplo de aplicación, permitiendo aprender a la vez técnicas de simulación mediante elementos finitos y sus conceptos básicos.

Se ha realizado un estudio del impacto ambiental del proyecto.

Se ha realizado un presupuesto del coste estimado que ha supuesto la realización.

Valorando todo el trabajo realizado, el resultado es muy satisfactorio puesto que se han cumplido todos los objetivos propuestos, e incluso se ha extendido el proyecto más de lo que inicialmente estaba previsto.

A nivel personal, la satisfacción adquirida también es notoria, ya que la realización de este proyecto me ha permitido aprender muchas cosas sobre este tipo de materiales y sobre técnicas de ensayo a nivel práctico.

También el echo de realizarlo en el Centro Tecnológico de Manresa, a sido un factor sin duda importante para el éxito de este proyecto, puesto que aparte de tener todo el instrumental necesario para realizar todo tipo de ensayos, también el contacto con la gente que se encuentra en el ha sido muy enriquecedor, permitiéndome aprender infinidad de cosas sobre materiales, sobre como funciona el mundo real de la ingeniería y sobre la aplicación práctica y la utilidad de todos esos conocimientos teóricos que durante tanto tiempo he estado estudiando.

14.-Bibliografía

- 1.1 -ULSAB-AVC Consortium: Technical Transfer Dispatch #6, (2001)
- 1.2- Ronald p. krupitzer, dr. Roger A. Heimbuch, Metalforming / Primavera 2006, <http://www.mexico.pma.org>.
- 2.1-International Iron and Steel Institute, UltraLight Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concepts (ULSAB– AVC) Overview Report (2002), www.worldautosteel.org.
- 2.2-E. Girault, P. Jacques, Ph. Harlet, K. Mols, J. Van Humbeeck, E. Aernoudt, and F. Delannay, MATERIALS CHARACTERIZATION 40:111–118 (1998).
- 3.1- jay baron y jody shaw, metalforming / otoño 2006, <http://www.mexico.pma.org>.
- 4.1-Voce E., J. Inst. Metals 74 (1948) 537
- 4.2- Kocks U.F., J. Eng. Mat. & Tech., Trans. AIME 98 (1976) 76.
- 4.3- Taylor G.I., Proc. Roy. Soc., A145 (1934) 362-404.
- 12.1- EUPVG. *Repercusión ambiental* . Vilanova i la Geltrú, UPC, 2000
- 12.2- http://www.ecologistasenaccion.org/article.php3?id_article=5580
Apuntes de Impacto Ambiental – José Antonio Ayllón (ETSE 2006)
- A.4.1- Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu, Mechanics of Sheet Metal Forming, 2002, pag. 2-60.
- A.4.2- C. Davis, D. Naylor, M. van Schaik, S. Anderson, In: Formability, <http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=18&pageid=2081271356>
- A.4.3- Ludwik P., Elemente der Techn. Mechanik, Julius Springer, Berlin, (1909)
- A.4.4- Hollomon J.H., Trans. AIME 162 (1945) 268.
- A.4.5- S.L. Semiatin (Ed.), Forming and Forging, vol. 14, American Society of Metals, Metals Park, OH, 1996, p. 1651?

A.4.6- H. Lundh, P-Å. Bustad, B. Carlsson, G. Engberg, L. Gustafsson, R. Lindaren, Sheet Steel Forming Handbook, SSAB Tunnpåt AB, (1998), Lygner Marknadskontakt AB, Göteborg, p.5:8.

A.4.7- William D. Callister, Jr. Ciencia e Ingeniería de los materiales,2005. Pag.113-146.

Agradecimientos

En primer lugar, para mis padres, mi familia y mis amigos, por el apoyo incondicional al largo de todo este tiempo y la paciencia demostrada.

En segundo lugar a todo el CTM y a quien representa, en especial:

A Daniel Casellas por haberme brindado la oportunidad de realizar este proyecto.

A Víctor García, por tutorizarme al largo de todo el desarrollo de este de una forma amigable y por su preocupación y pasión por realizar la faena.

A Marc Pla, por ayudarme en todo momento y ser mi compañero de fatigas.

Y a Ricardo, por su gran apoyo en temas de simulación.

En tercer lugar, a Dolors Baró(UAB), mi tutora del proyecto y a todos los compañeros de la ETSE.

Por último, a todos vosotros que leéis este estudio , por saber que mi esfuerzo servirá para alguien más.

GRACIAS

Atentamente, Jordi Sala

Proyecto final de carrera

Ingeniería de Materiales

**Caracterización y comparación de
las propiedades mecánicas de dos
chapas de acero avanzado de alta
resistencia (AHSS): TRIP800 Y
DP800**

ANEXO

Autor: Jordi Sala Serra

Directores: Maria Dolors Baró Mariné (UAB)
Dr. Victor García Fernández (CTM)

Convocatoria: Juny del 2008

A.- Anexo método experimental I.....	81
A.1- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para el acero DP800 $e=1,8\text{mm}$ y de las diversas propiedades mecánicas obtenidas a partir de su interpretación.....	81
A.1.1- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas para longitudinales.....	81
A.1.2- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas para transversales.....	82
A.1.3- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas para a 45°	83
A.1.4-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas longitudinales.	84
A.1.5-Cálculo del modelo de ecuación Voce-Kocks para probetas longitudinales DP800.....	86
A.1.6-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas transversales.	87
A.1.7-Cálculo del modelo de ecuación Voce-Kocks para probetas transversales DP800.....	89
A.1.8-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas a 45°	91
A.1.9-Cálculo del modelo de ecuación Voce-Kocks para probetas a 45° de DP800.....	93
A.2- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para el acero TRIP800 $e=2\text{mm}$ y de las diversas propiedades mecánicas obtenidas a partir de su interpretación.....	95
A.2.1- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas para longitudinales Trip800.....	95
A.2.2- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas transversales Trip800.....	96
A.2.3- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas a 45° Trip800.	97
A.2.4-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas longitudinales TRIP800.	98
A.2.5-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas transversales Trip800.....	100
A.2.6-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas a 45° Trip800.	102
A.2.7_cálculo Voce-Kock para trip800.....	104
B.- Anexo método experimental II.....	109
B.1- Cálculo del módulo elástico para las diferentes cargas y descargas DP800.....	109
B.1.1- P1 de DP800.....	109
B.1.2- P2 de DP800.....	110
B.1.3- P3 de DP800.....	111
B.1.4- P4 de DP800.....	113
B.1.5- P5 de DP800.....	114
B.2- Cálculo del módulo elástico para las diferentes cargas y descargas TRIP800.....	115
B.2.1- P1 de TRIP800	115
B.2.2- P2 de TRIP800	117
B.2.3- P3 de TRIP800	118
B.2.4- P4 de TRIP800	119
B.2.5- P5 de TRIP800	120
C.-Cálculos método experimental III.....	122
C.1- Cálculo del coeficiente de anisotropía r para DP800	122
C.1.1- Probetas longitudinales Dp800.....	122
C.1.2- Probetas transversales Dp800.....	124
C.1.3- Probetas a 45° Dp800.	126
C.1.4-Tabla resultados coeficiente r para Dp800.	128
C.2- Cálculo del coeficiente de anisotropía r para TRIP800.....	129
C.2.1- Probetas longitudinales. Trip800.....	129
C.2.2-Probetas transversales Trip800.....	132
C.2.3-Probetas a 45° Trip800.	134

<i>C-Anexo IV, fundamentos teóricos</i>	137
C.2.1- Evaluación de conformabilidad en chapas planas	139
C.2.2-Diagramas límite de formabilidad (FLD) [A.4.1]	141
C.2.3- Exponente de endurecimiento por deformación	144
C.2.4-Coeficiente de Anisotropía del material	146
C.3.1-conceptos de tensión y deformación.....	150
C.3.2-Deformación elástica y plástica.....	151
C.3.3-Ensayo de tensión y diagrama de tensión deformación.....	151
C.3.4-Tensión real – deformación real.....	154

A.- Anexo método experimental I

A.1- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para el acero DP800 $e=1,8mm$ y de las diversas propiedades mecánicas obtenidas a partir de su interpretación.

A.1.1- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas para longitudinales

Tabla 1.1- Medidas tomadas a la muestra antes de ensayar.

NOMBRE PROBETA	L_0	A_1	A_2	A_3	A_f	e_1	e_2	e_3	e_f
TL2	50,00	12,369	12,394	12,401	12,388	1,798	1,797	1,798	1,798
TL3	50,00	12,416	12,440	12,443	12,433	1,799	1,798	1,799	1,799
TL4	50,00	12,388	12,405	12,412	12,402	1,799	1,800	1,796	1,798

Tabla 1.2- Resultados obtenidos después del ensayo para probetas longitudinales.

NOMBRE PROBETA	L_0	L_f	$A_1\%$	A_f	e_f	$R_{0,2}$	R_{max}	$Def_{plastica}$	Def_{rot}
TL2	50,00	62,72	25,44	12,388	1,798	516	759	17,74	25,67
TL3	50,00	62,45	24,90	12,433	1,799	517	759	17,22	24,41
TL4	50,00	62,96	25,92	12,402	1,798	515	758	17,41	25,78
PROMEDIO			25,42			516	759	17,5	25,3
DESVEST			0,51			1	1	0,3	0,8

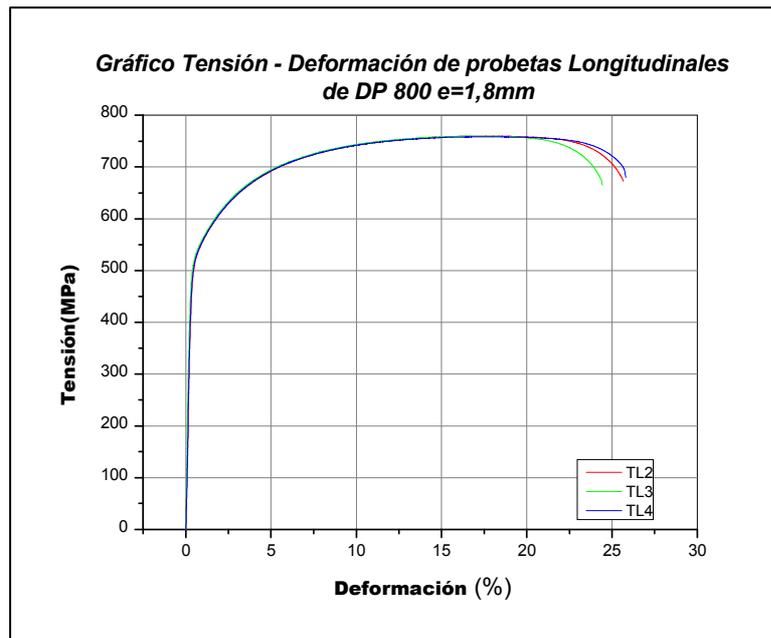


Fig. 1.1- ingenieril para probetas longitudinales DP800.

Gráfico $\sigma - \varepsilon$

A.1.2- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas para transversales

Tabla 1.3- Medidas tomadas a la muestra antes de ensayar.

	<i>L0</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>Af</i>	<i>e1</i>	<i>e2</i>	<i>e3</i>	<i>ef</i>
<i>TT1</i>	50,00	12,420	12,437	12,450	12,436	1,807	1,798	1,801	1,802
<i>TT2</i>	50,00	12,491	12,478	12,470	12,480	1,800	1,802	1,805	1,802
<i>TT3</i>	50,00	12,440	12,429	12,409	12,426	1,803	1,805	1,811	1,806

Tabla 1.4- Resultados obtenidos después del ensayo para probetas transversales.

	<i>Lo</i>	<i>Lf</i>	<i>AI%</i>	<i>Af</i>	<i>ef</i>	<i>R</i> <i>0,2</i>	<i>R</i> <i>max</i>	<i>Def</i> <i>plastica</i>	<i>Def</i> <i>rot</i>
<i>TT1</i>	50	63,27	26,54	12,436	1,802	520	762	17,48	25,46
<i>TT2</i>	50	63,23	26,46	12,480	1,802	520	764	17,14	26,65
<i>TT3</i>	50	62,96	25,92	12,426	1,806	518	760	17,45	25,94
<i>PROMEDIO</i>			26,31			519	762	17,4	26,0
<i>DESVEST</i>			0,34			1	2	0,2	0,6

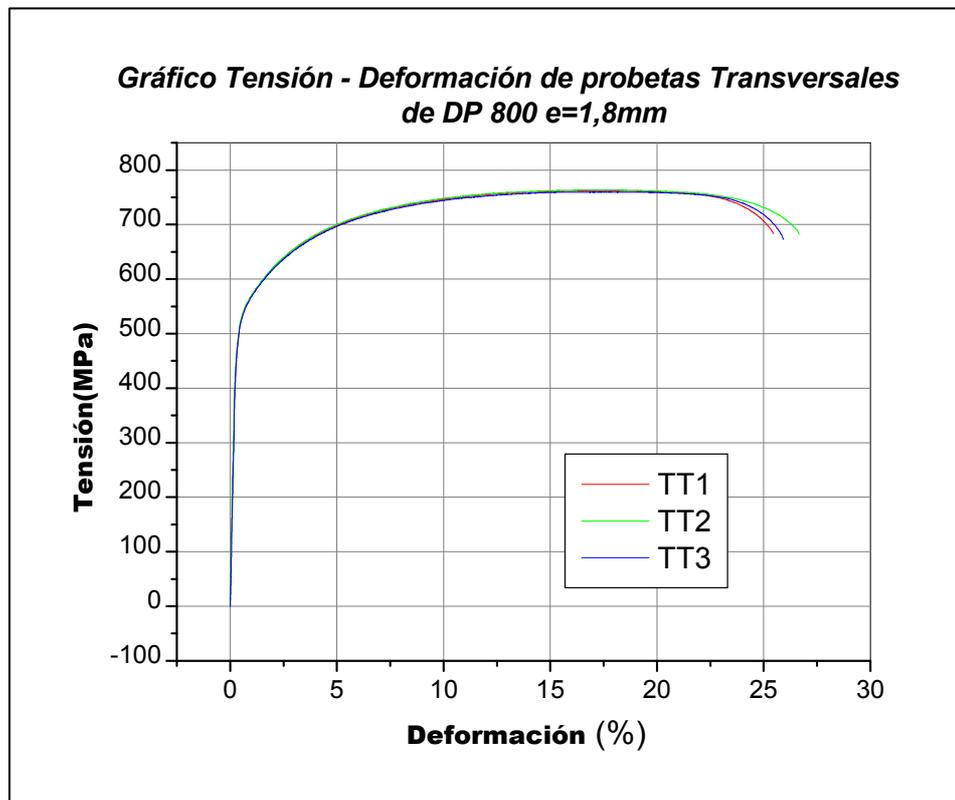


Fig.1.2-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ ingenieril para probetas transversales DP800.

A.1.3- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas para a 45°.

Tabla 1.5- Medidas tomadas a la muestra antes de ensayar.

	<i>L0</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>Af</i>	<i>e1</i>	<i>e2</i>	<i>e3</i>	<i>ef</i>
<i>T45_2</i>	50,00	12,450	12,435	12,418	12,434	1,812	1,810	1,811	1,811
<i>T45_3</i>	50,00	12,484	12,470	12,444	12,466	1,809	1,806	1,806	1,807
<i>T45_4</i>	50,00	12,462	12,460	12,426	12,449	1,805	1,801	1,808	1,805

Tabla 1.6- Resultados obtenidos después del ensayo para probetas a 45°.

	<i>L0</i>	<i>Lf</i>	<i>AI%</i>	<i>Af</i>	<i>ef</i>	<i>R</i> <i>0,2</i>	<i>R</i> <i>max</i>	<i>Def</i> <i>plast</i>	<i>Def</i> <i>rot</i>
<i>T45_2</i>	50,00	63,13	26,26	12,434	1,811	506	751	18,33	25,77
<i>T45_3</i>	50,00	63,46	26,92	12,466	1,807	514	751	18,01	26,49
<i>T45_4</i>	50,00	63,18	26,36	12,449	1,805	506	752	18,14	26,38
	PROMEDIO		26,51		PROMEDIO	509	751	18,2	26,2
	DESVEST		0,36		DESVEST	5	1	0,2	0,4

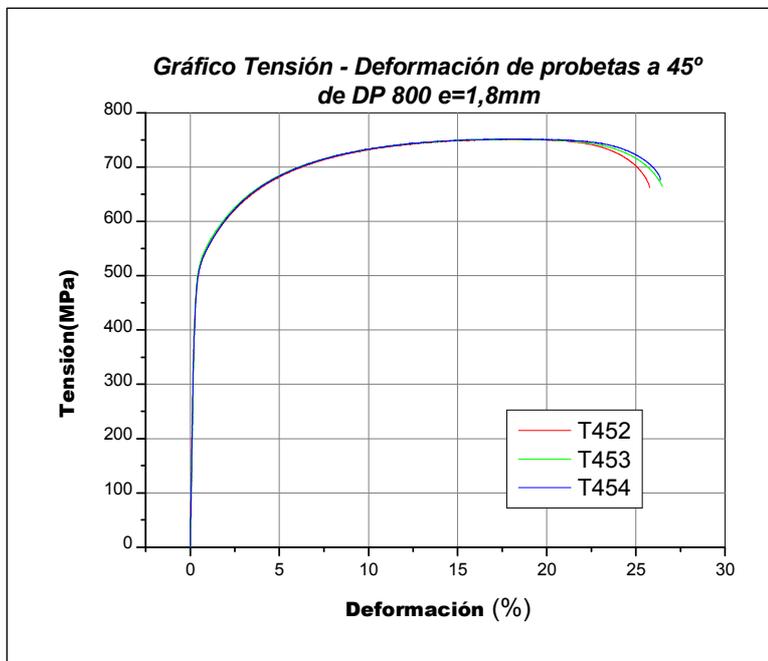


Fig.1.3-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ ingenieril para probetas a 45° DP800.

A.1.4-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas longitudinales.

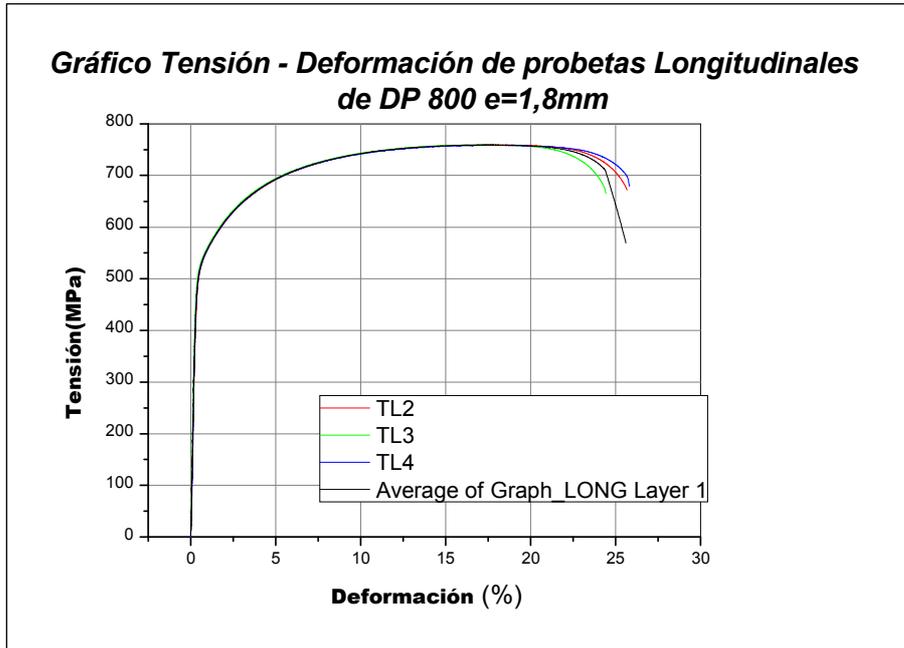


Fig.1.4-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ ingenieril para probetas longitudinales DP800 con curva promedio.

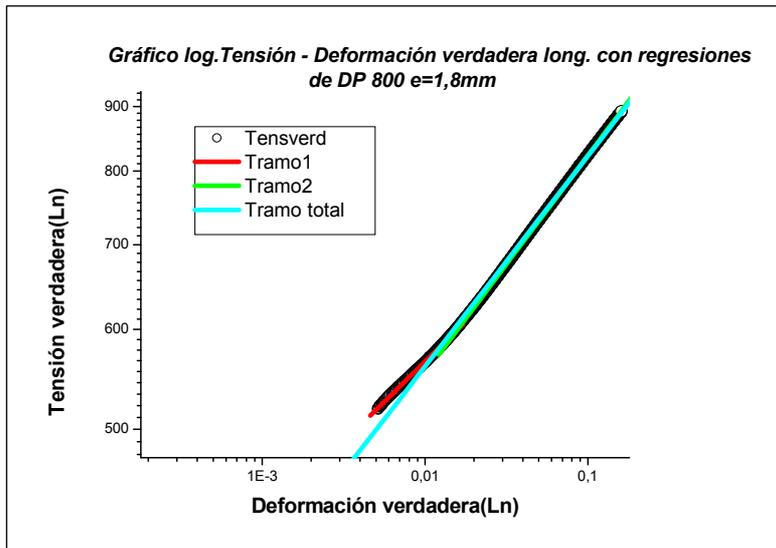


Fig.1.5-Gráfico logarítmico $\sigma - \varepsilon$ verdaderas para probetas longitudinales DP800.

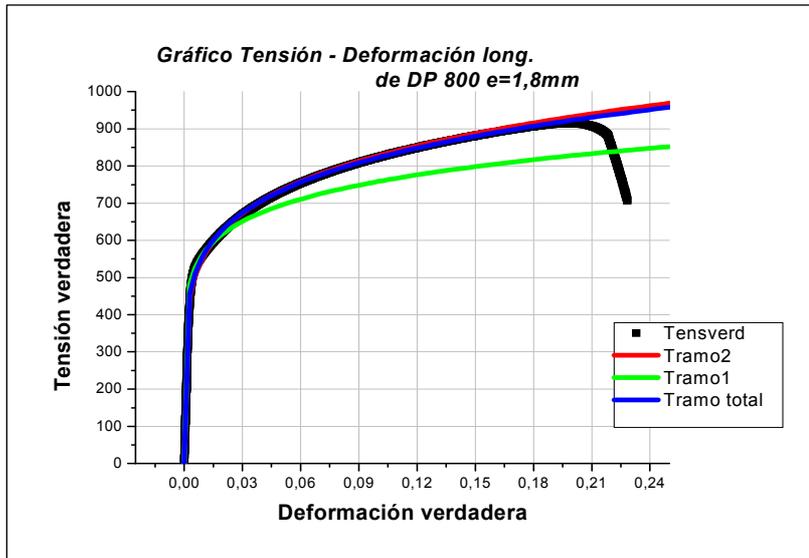


Fig.1.6-Gráfico $\sigma - \epsilon$ verdadera para de probetas longitudinales DP800 para contraste con ecuación obtenida.

PROBETAS LONGITUDINALES					
Deformación verdadera tramo 1		Deformación verdadera tramo 2		Deformación verdadera tramo General	
0,0052	0,0153	0,0153	0,1613	0,0052	0,1613
n1	0,127	n2	0,172	N	0,166
k1	1016	k2	1230	K	1206
r1	0,9996	r2	1,0000	R	0,9992
HOLLOMON		HOLLOMON		HOLLOMON	
$\sigma = 1016 * \epsilon^{0.127}$		$\sigma = 1230 * \epsilon^{0.172}$		$\sigma = 1206 * \epsilon^{0.166}$	

Tabla 1.7- Cálculo de exponente de endurecimiento y correspondiente Ley de Hollomon para probetas a longitudinales de DP800.

A.1.5-Cálculo del modelo de ecuación Voce-Kocks para probetas longitudinales DP800.

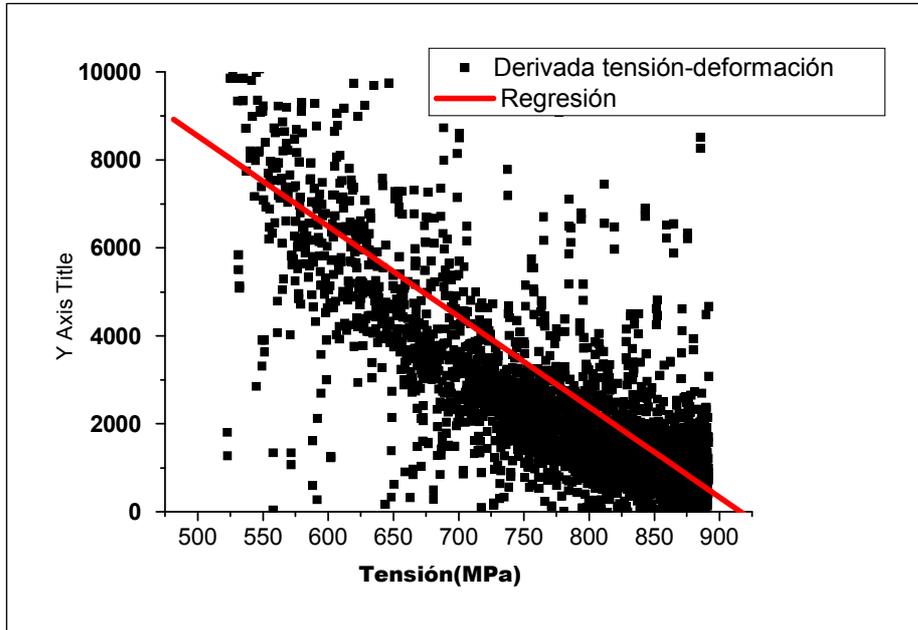


Fig.1.7-Gráfico $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} - \sigma_{verdadera}$ para cálculo de $\sigma_{saturada}$ y W(Pendiente de la recta).

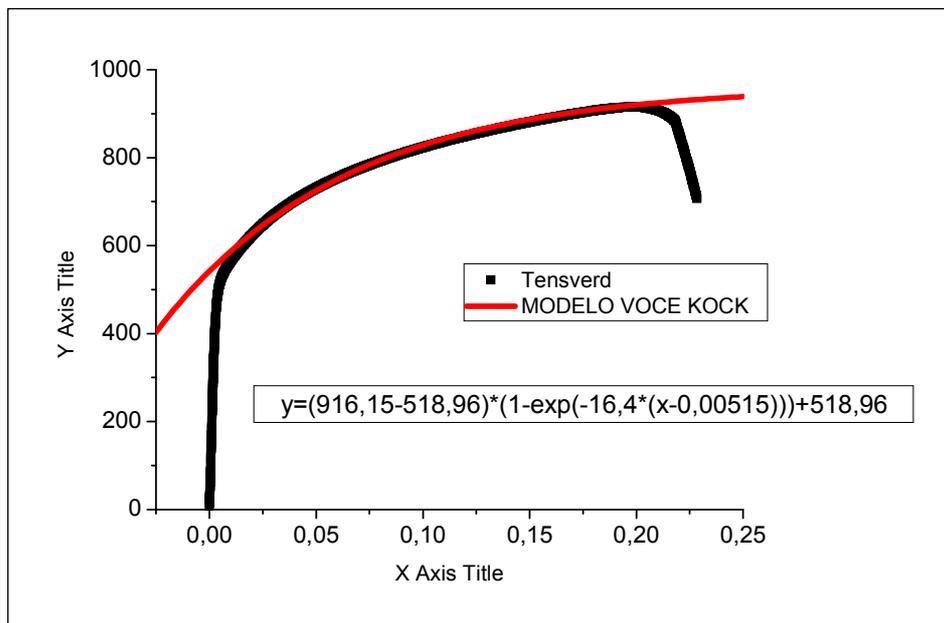


Fig.1.8- Curvas experimental y ajuste del modelo Voce Kocks

Orientación longitudinal DP800		
$\sigma = \sigma_{saturada} [1 - \exp(-W\varepsilon)]$		
W	16,4	MODELO VOCE KOCKS
$\sigma_{saturada}$	916,15	$\sigma = 916,5 * [1 - \exp(-16,4 * \varepsilon)]$

Tabla 1.8-Cálculo modelo Voce kocks para probetas longitudinales DP800.

A.1.6-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas transversales.

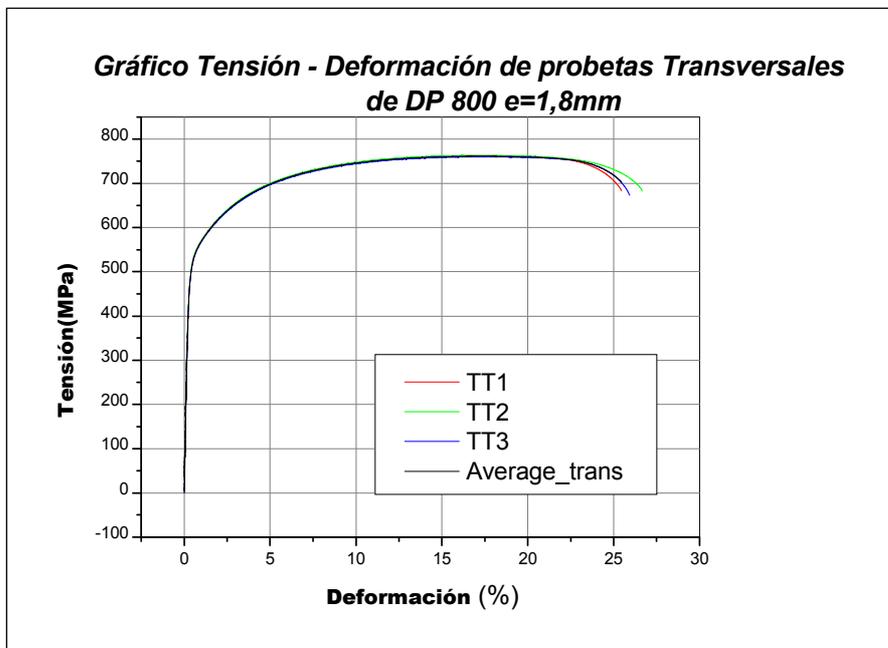


Fig.1.9-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ ingenieril para probetas transversales DP800 con curva promedio.

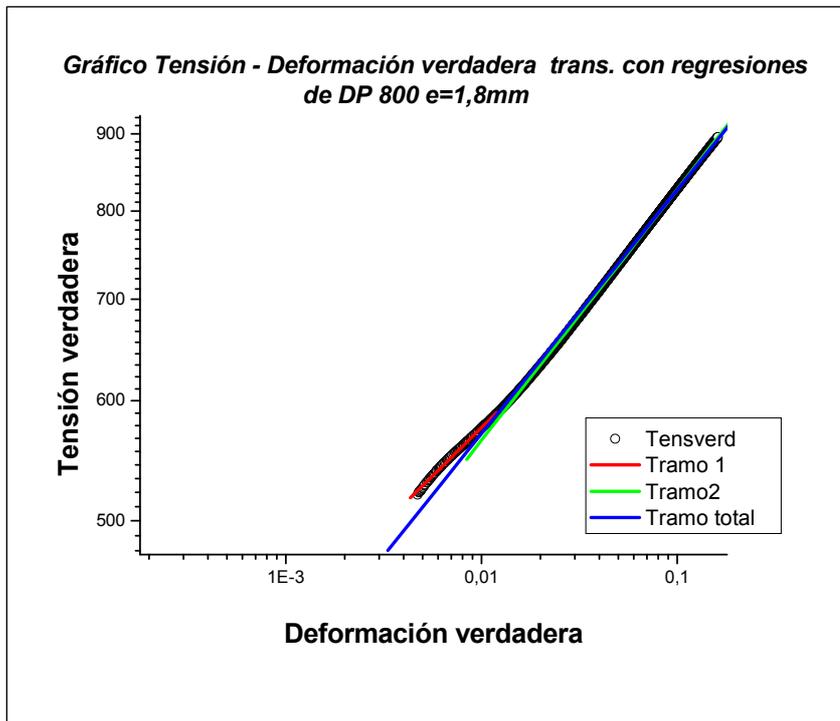


Fig.1.10-Gráfico logarítmico $\sigma - \epsilon$ verdaderas para probetas transversales DP800.

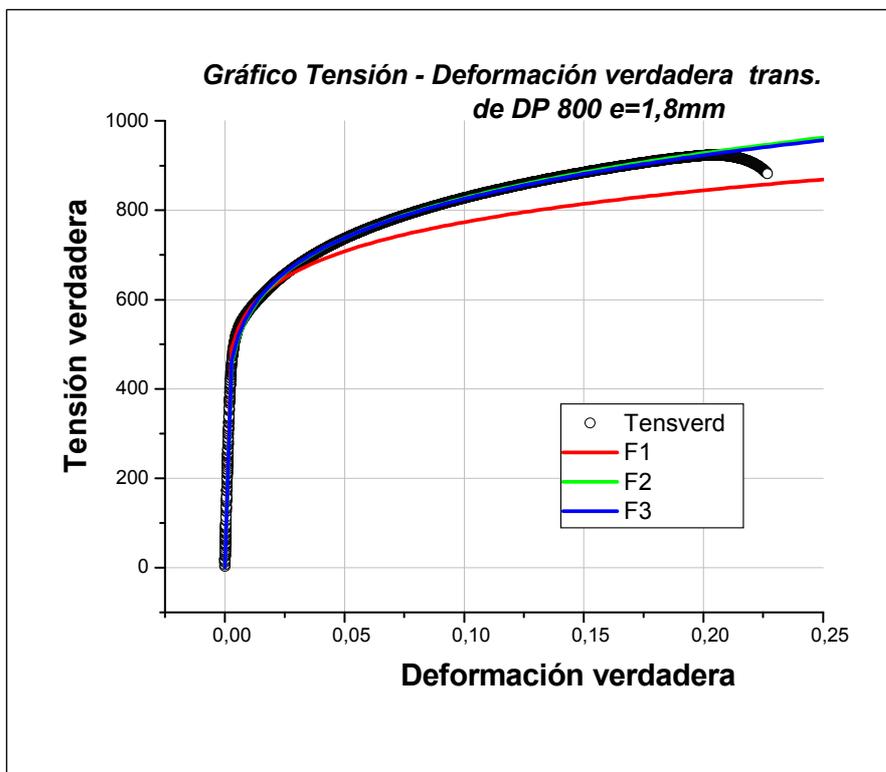


Fig.1.11-Gráfico $\sigma - \epsilon$ verdadera para de probetas transversales DP800 para contraste con ecuación obtenida.

PROBETAS TRANSVERSALES					
Deformación verdadera tramo 1		Deformación verdadera tramo 2		Deformación verdadera tramo General	
0,0047	0,0110	0,0110	0,1615	0,0047	0,1615
n1	0,127	n2	0,165	n	0,161
k1	1036	k2	1210	k	1196
r1	0,9984	r2	0,9999	r	0,9990
HOLLOMON		HOLLOMON		HOLLOMON	
$\sigma = 1036 * \varepsilon^{0.127}$		$\sigma = 1210 * \varepsilon^{0.165}$		$\sigma = 1196 * \varepsilon^{0.161}$	

Tabla 1.9- Cálculo de exponente de endurecimiento y correspondiente Ley de Hollomon para probetas transversales de DP800.

A.1.7-Cálculo del modelo de ecuación Voce-Kocks para probetas transversales DP800.

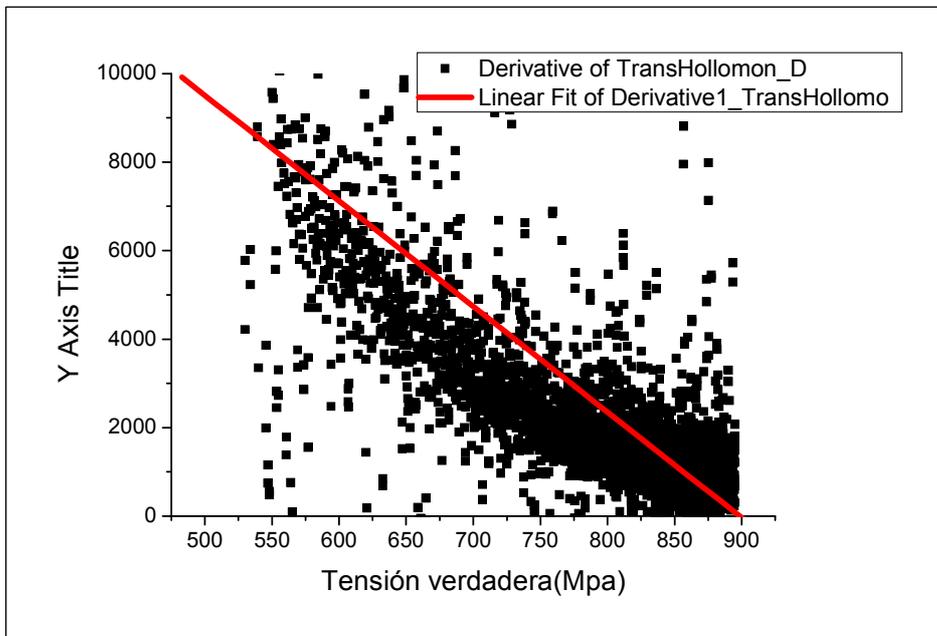


Fig.1.12-Gráfico $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} - \sigma_{verdadera}$ para cálculo de $\sigma_{saturada}$ y W(Pendiente de la recta).

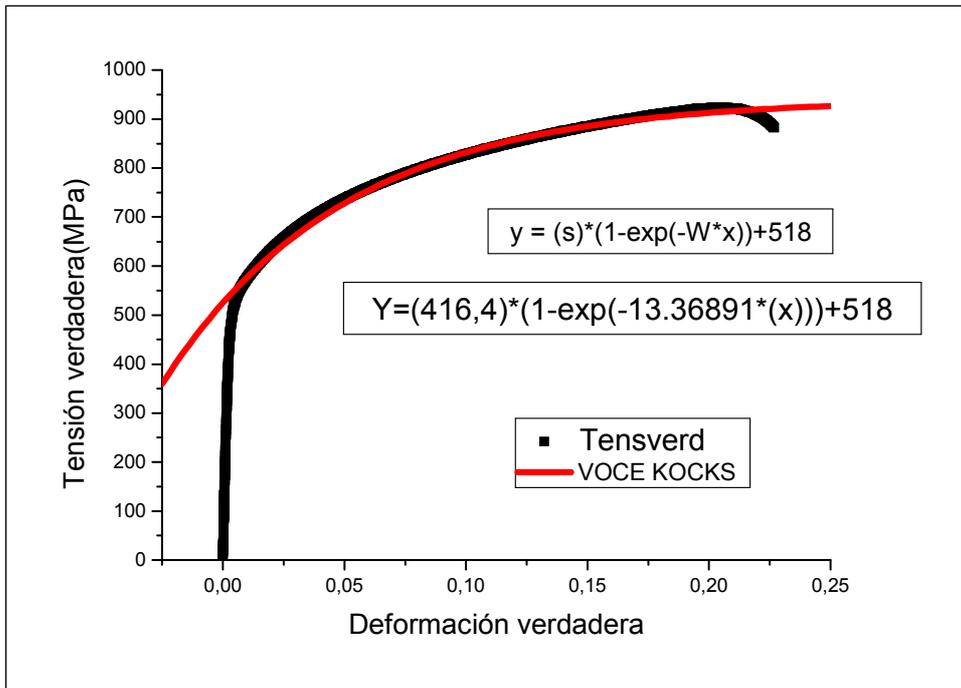


Fig.1.13- Curvas experimental y ajuste del modelo Voce Kocks

Orientación transversal DP800		
$\sigma = \sigma_{saturada} [1 - \exp(-W \varepsilon)]$		
W	13,37	MODELO VOCE KOCKS
$\sigma_{saturada}$	934,4	$\sigma = 934,4 * [1 - \exp(-13,37 * \varepsilon)]$

Tabla 1.10-Cálculo modelo Voce kocks para probetas transversales DP800.

A.1.8-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas a 45°.

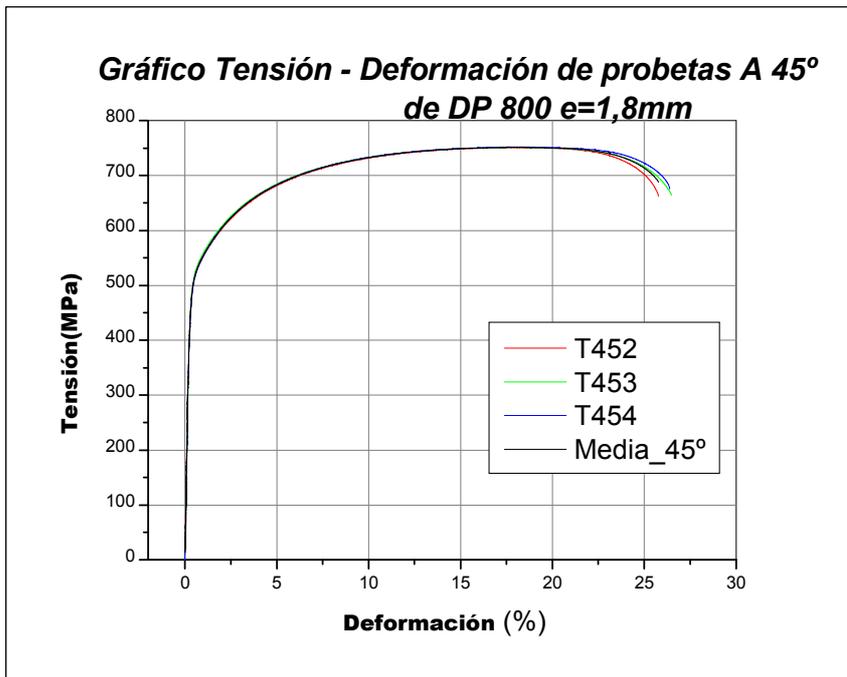


Fig.1.14-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ ingenieril para probetas a 45° DP800 con curva promedio.

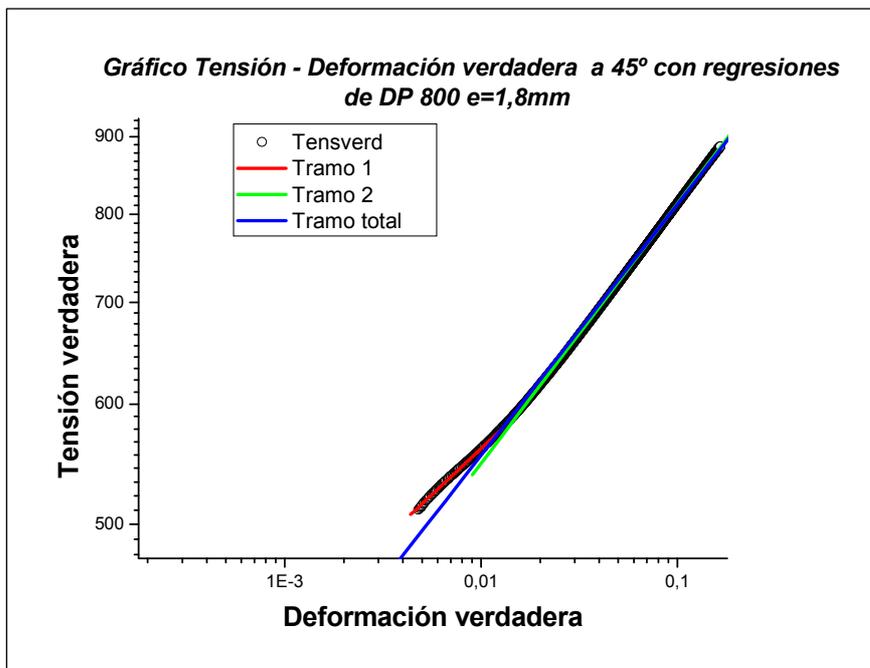


Fig.1.15-Gráfico logarítmico $\sigma - \varepsilon$ verdaderas para probetas a 45° de DP800.

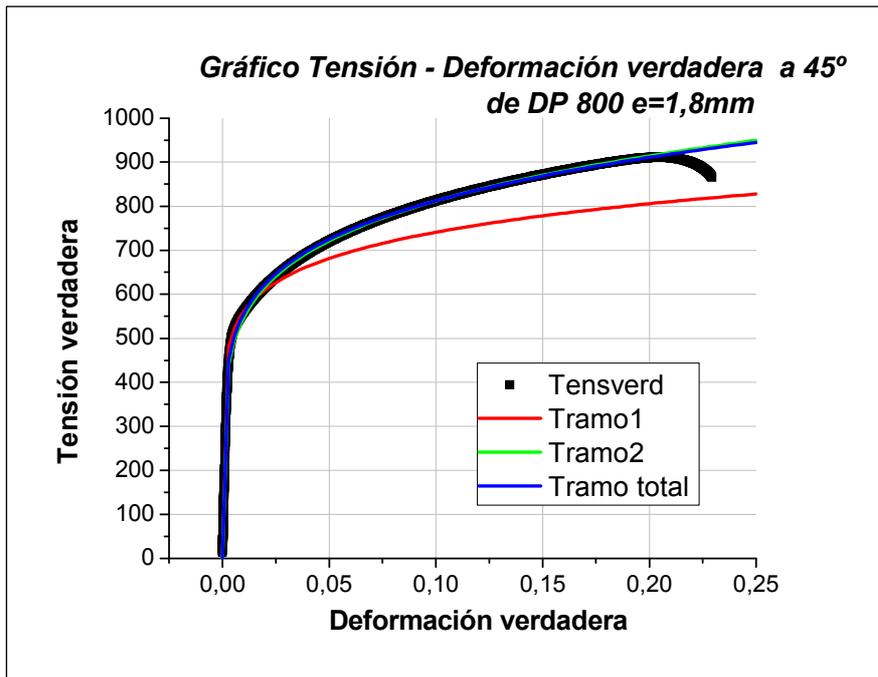


Fig.1.16-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ verdadera para de probetas a 45° de DP800 para contraste con ecuación obtenida.

PROBETAS 45°					
Deformación verdadera tramo 1		Deformación verdadera tramo 2		Deformación verdadera tramo General	
0,0048	0,0118	0,0118	0,1656	0,9998	0,9987
n1	0,121	n2	0,171	n	0,165
k1	979	k2	1204	k	1188
r1	0,9996	r2	0,9998	r	0,9987
HOLLOMON		HOLLOMON		HOLLOMON	
$\sigma = 979 * \varepsilon^{0.121}$		$\sigma = 1204 * \varepsilon^{0.171}$		$\sigma = 1188 * \varepsilon^{0.165}$	

Tabla 1.11- Cálculo de exponente de endurecimiento y correspondiente Ley de Hollomon para probetas a 45° de DP800.

A.1.9-Cálculo del modelo de ecuación Voce-Kocks para probetas a 45° de DP800.

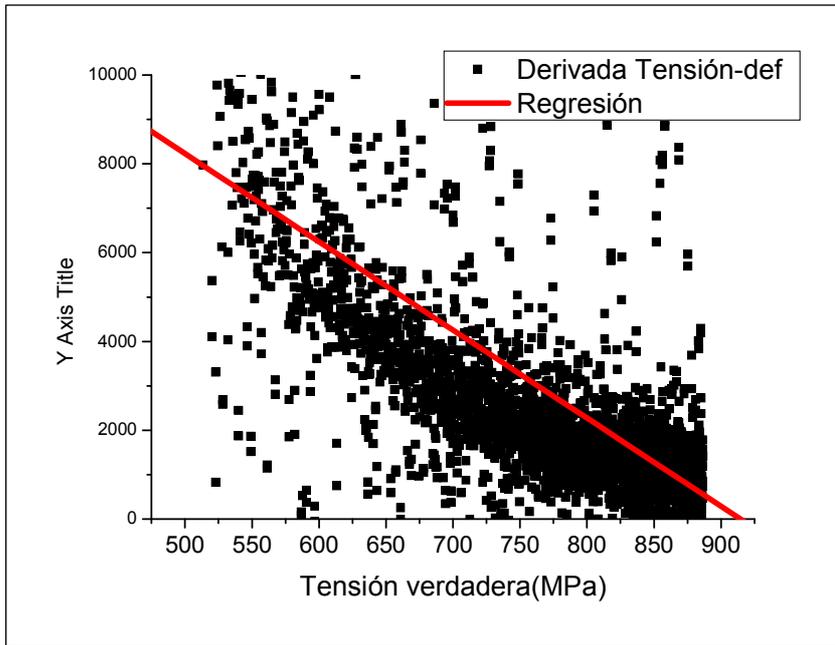


Fig.1.17-Gráfico $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} - \sigma_{verdadera}$ para cálculo de $\sigma_{saturada}$ y W(Pendiente de la recta).

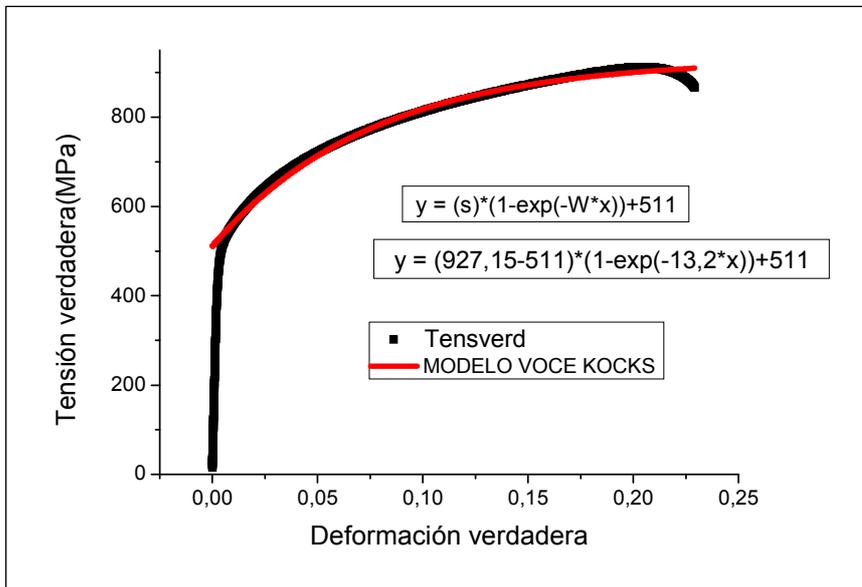


Fig.1.18- Curvas experimental y ajuste del modelo Voce Kocks

Orientación a 45° de DP800		
$\sigma = \sigma_{saturada} [1 - \exp(-W\varepsilon)]$		
W	13,2	MODELO VOCE KOCKS
$\sigma_{saturada}$	927,15	$\sigma = 927,15 * [1 - \exp(-13,2 * \varepsilon)]$

Tabla 1.12-Cálculo modelo Voce kocks para probetas a 45° de DP800.

A.2- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para el acero TRIP800 $e=2\text{mm}$ y de las diversas propiedades mecánicas obtenidas a partir de su interpretación.

A.2.1- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas para longitudinales Trip800

Tabla 2.1- Medidas tomadas a la muestra antes de ensayar.

NOMBRE PROBETA	L_0	A_1	A_2	A_3	A	e_1	e_2	e_3	e_f
L1	50,00	12,407	12,361	12,393	12,387	2,067	2,063	2,065	2,065
L2	50,00	12,409	12,365	12,445	12,406	2,073	2,069	2,065	2,069
L3	50,00	12,460	12,388	12,430	12,426	2,051	2,052	2,049	2,051

Tabla 2.2- Resultados obtenidos después del ensayo para probetas longitudinales.

NOMBRE PROBETA	L_0	L_f	$A_1\%$	A_f	e_f	$R_{0,2}$	R_{max}	$Def_{plastica}$	Def_{rot}
L1	50,00	66,03	32,06	12,387	2,065	522	843	25,3	31,6
L2	50,00	65,53	31,06	12,406	2,069	521	835	25,1	30,9
L3	50,00	65,88	31,76	12,426	2,051	523	842	25,8	31,7
PROMEDIO			31,63			522	840	25,4	31,4
DESVEST			0,51			1	4	0,4	0,4

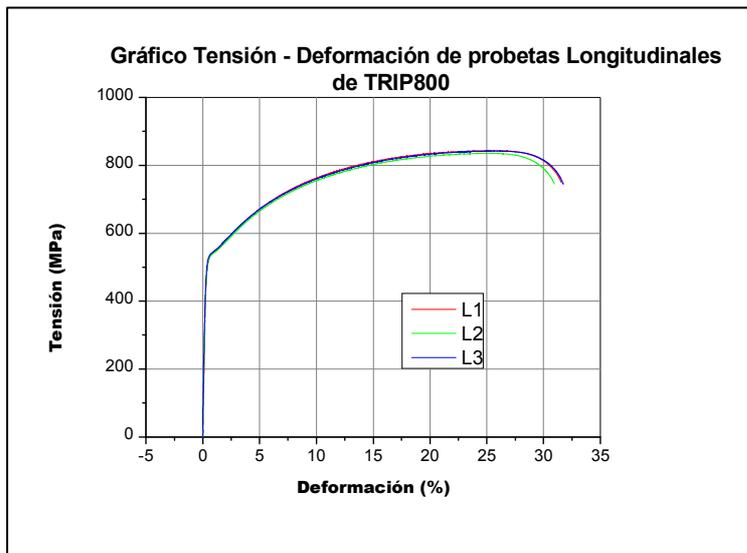


Fig.2.1-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ ingenieril para probetas longitudinales TRIP800.

A.2.2- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas transversales Trip800.

Tabla 2.3- Medidas tomadas a la muestra antes de ensayar.

NOMBRE PROBETA	L_0	A_1	A_2	A_3	A	e_1	e_2	e_3	ef
T1	50,00	12,454	12,402	12,461	12,439	2,046	2,041	2,047	2,045
T2	50,00	12,456	12,400	12,485	12,447	2,055	2,052	2,042	2,050
T3	50,00	12,500	12,427	12,455	12,461	2,053	2,052	2,047	2,051

Tabla 2.4- Resultados obtenidos después del ensayo para probetas transversales.

NOMBRE PROBETA	L_0	L_f	$A\%$	A_f	ef	$R_{0,2}$	R_{max}	Def_{plast}	Def_{rot}
T1	50,00	65,06	30,12	12,439	2,045	544	843	23,7	29,1
T2	50,00	65,27	30,54	12,447	2,050	548	845	25,0	30,5
T3	50,00	65,04	30,08	12,461	2,051	547	843	24,3	29,8
PROMEDIO			30,25			546	844	24,3	29,8
DESVEST			0,25			2	1	0,7	0,7

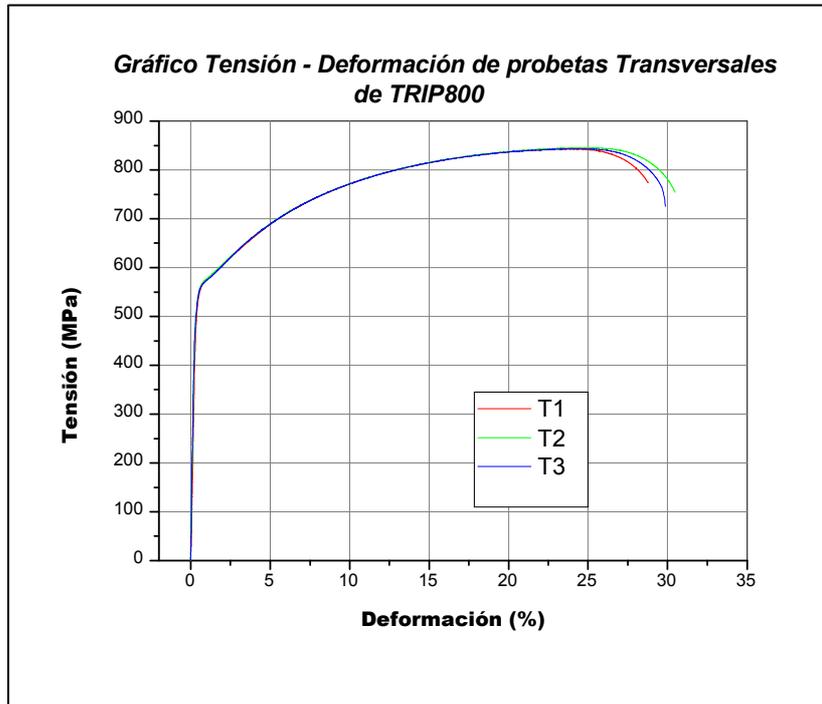


Fig.2.2-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ ingenieril para probetas transversales TRIP800.

A.2.3- Cálculo de los gráficos $\sigma - \varepsilon$ para probetas a 45° Trip800.

Tabla 2.5- Medidas tomadas a la muestra antes de ensayar.

NOMBRE PROBETA	L_0	A_1	A_2	A_3	A	e_1	e_2	e_3	ef
45_1	50,00	12,422	12,380	12,391	12,398	2,033	2,042	2,021	2,032
45_2	50,00	12,429	12,395	12,400	12,408	2,020	2,022	2,022	2,021
45_3	50,00	12,421	12,387	12,448	12,419	2,020	2,024	2,011	2,018

Tabla 2.6- Resultados obtenidos después del ensayo para probetas a 45°.

Nombre Probeta	L_0	L_f	$A\%$	A_f	ef	$R_{0,2}$	R_{max}	$Defplast$	$Def rot$
45_1	50,00	66,00	32,00	12,398	2,032	557	838	25,8	32,2
45_2	50,00	67,02	34,04	12,408	2,021	557	844	26,1	34,7
45_3	50,00	66,65	33,30	12,419	2,018	556	843	25,9	32,8
PROMEDIO			33,11			557	842	26,0	33,2
DESVEST			1,03			1	3	0,2	1,3

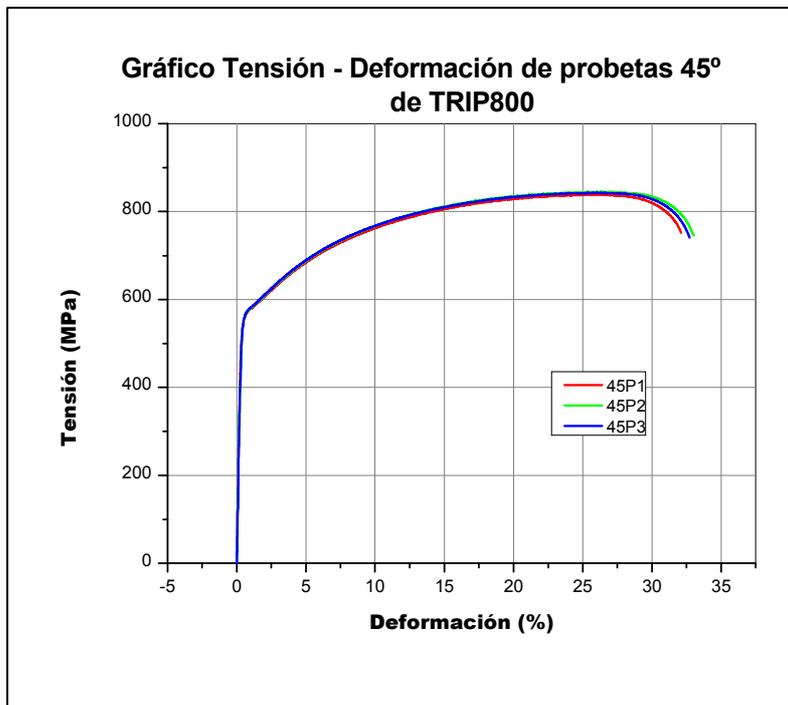


Fig.2.3-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ ingenieril para probetas a 45° de TRIP800.

A.2.4-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas longitudinales TRIP800.

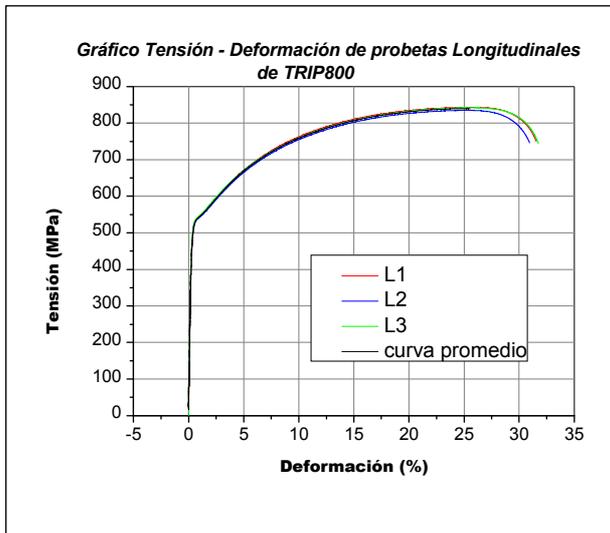


Fig.2.4-Gráfico $\sigma - \epsilon$ ingenieril para probetas longitudinales TRIP800 con curva promedio.

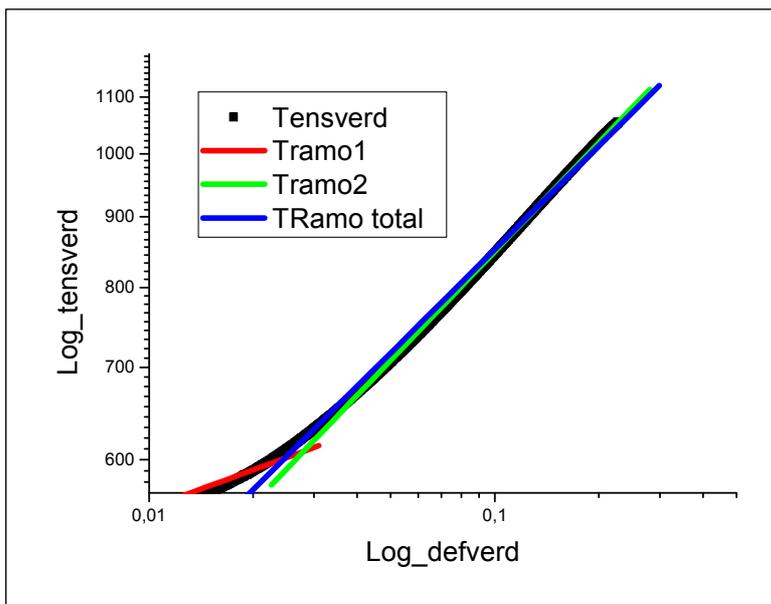


Fig.2.5-Gráfico logarítmico $\sigma - \epsilon$ verdaderas para probetas longitudinales de TRIP800.

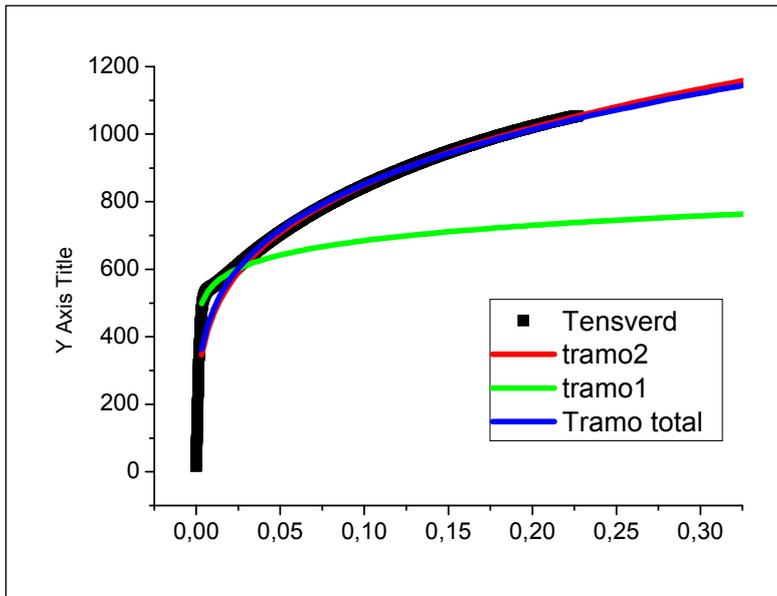


Fig.2.6-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ verdadera para probetas longitudinales TRIP800 para contraste con ecuación obtenida.

PROBETAS LONGITUDINALES					
Deformación verdadera tramo 1		Deformación verdadera tramo 2		Deformación verdadera tramo General	
0,0051	0,0309	0,0309	0,2274	0,0051	0,2274
n1	0,093	n2	0,262	n	0,250
k1	847	k2	1555	k	1515
r1	0,9782	r2	0,9994	r	0,2500
HOLLOMON		HOLLOMON		HOLLOMON	
$\sigma = 847 * \varepsilon^{0,093}$		$\sigma = 1555 * \varepsilon^{0,262}$		$\sigma = 1515 * \varepsilon^{0,250}$	

Tabla 2.7- Cálculo de exponente de endurecimiento y correspondiente Ley de Hollomon para probetas longitudinales de TRIP800.

A.2.5-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas transversales Trip800.

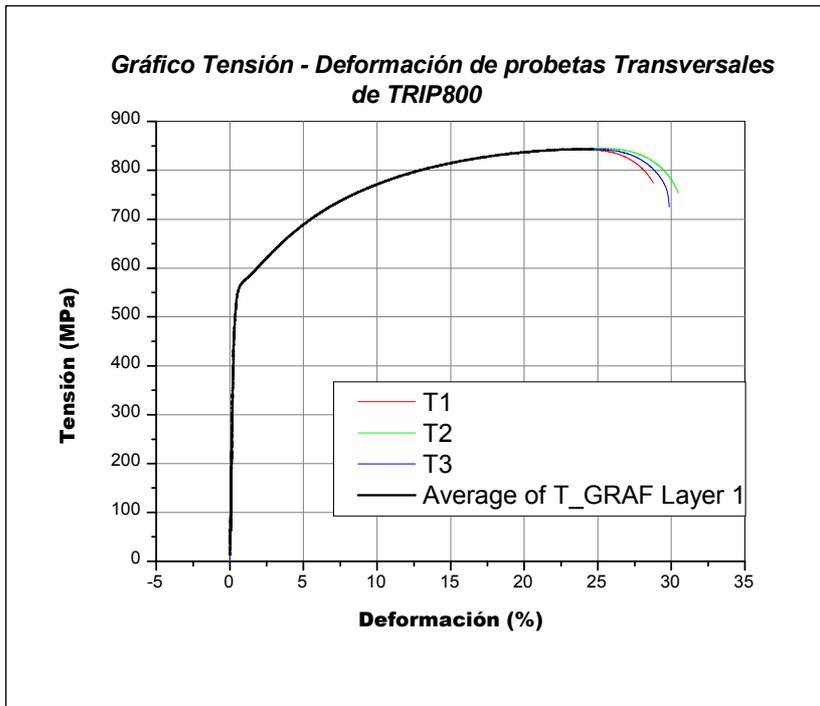


Fig.2.7-Gráfico $\sigma - \epsilon$ ingenieril para probetas transversales de TRIP800 con curva promedio.

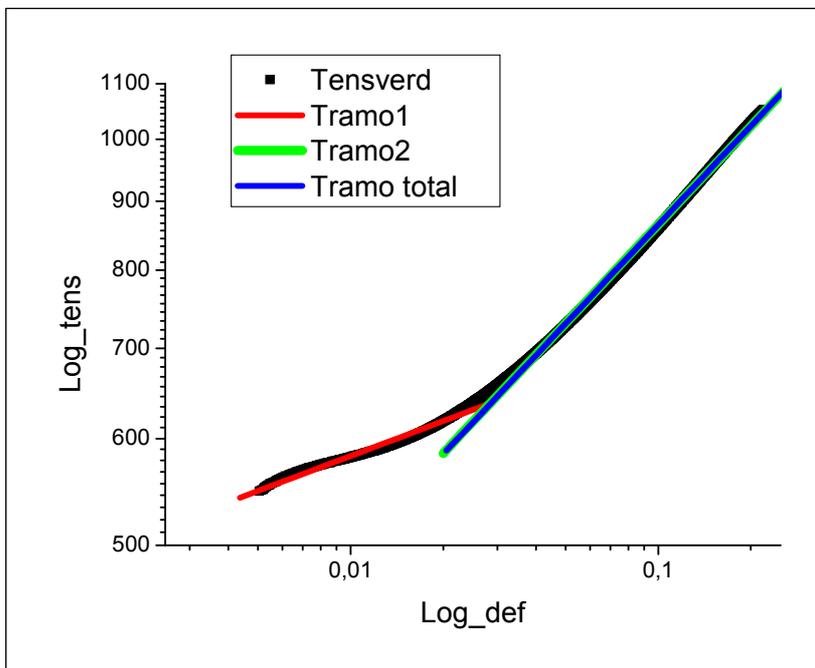


Fig.2.8-Gráfico logarítmico $\sigma - \epsilon$ verdaderas para probetas transversales de TRIP800.

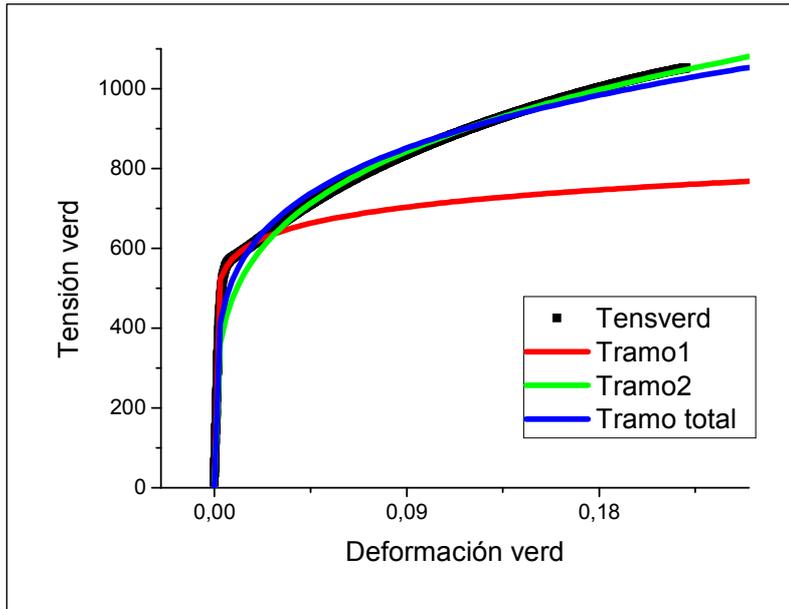


Fig.2.9-Gráfico $\sigma - \varepsilon$ verdadera para de probetas transversales TRIP800 para contraste con ecuación obtenida.

PROBETAS TRANSVERSALES					
Deformación verdadera tramo 1		Deformación verdadera tramo 2		Deformación verdadera tramo General	
0,0051	0,0308	0,0308	0,2208	0,0051	0,2208
n1	0,097	n2	0,247	n	0,208
k1	911	k2	1524	k	1405
r1	0,9835	r2	0,9993	r	0,9859
HOLLOMON		HOLLOMON		HOLLOMON	
$\sigma = 911 * \varepsilon^{0.097}$		$\sigma = 1524 * \varepsilon^{0.247}$		$\sigma = 1405 * \varepsilon^{0.208}$	

Tabla 2.8- Cálculo de exponente de endurecimiento y correspondiente Ley de Hollomon para probetas a transversales de TRIP800.

A.2.6-Cálculo coeficiente endurecimiento n y Ley de Hollomon para probetas a 45° Trip800.

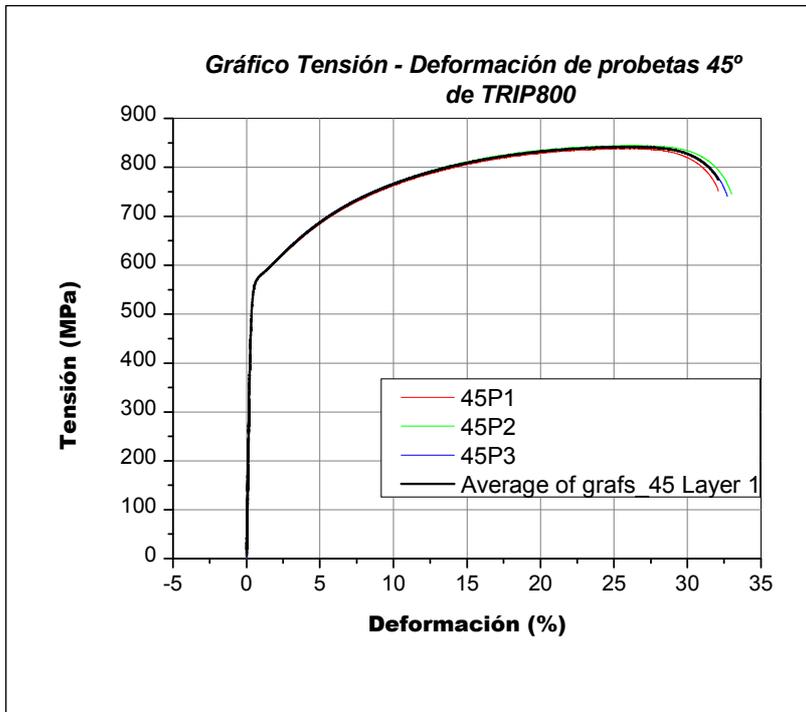


Fig.2.10-Gráfico $\sigma - \epsilon$ ingenieril para probetas a 45° TRIP800 con curva promedio

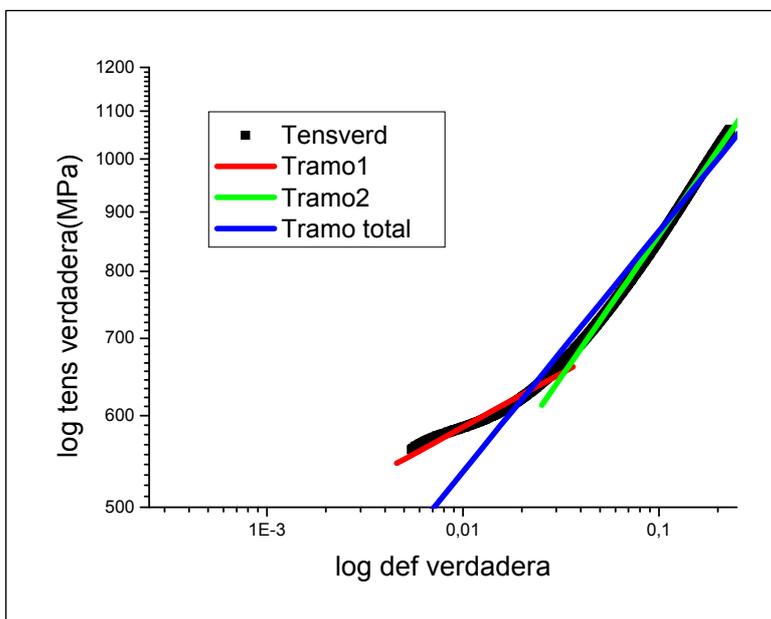


Fig.2.11-Gráfico logarítmico $\sigma - \epsilon$ verdaderas para probetas a 45° de TRIP800.

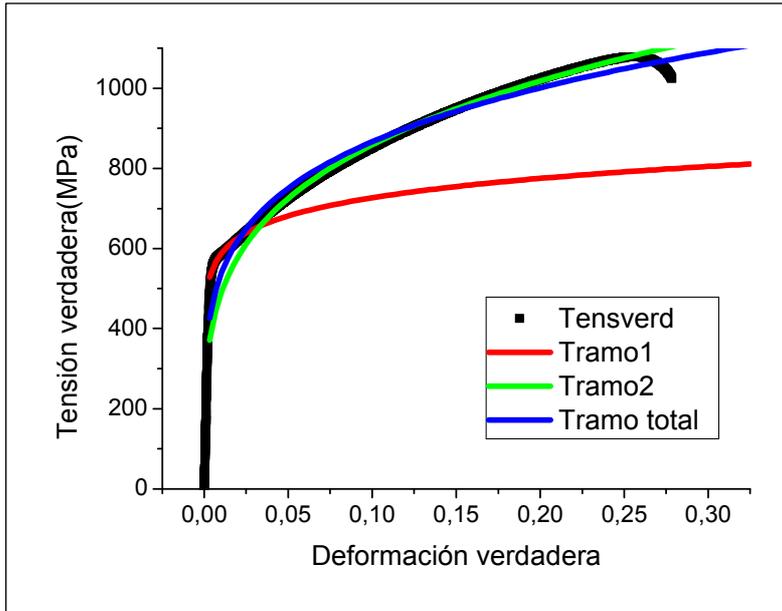


Fig.2.12-Gráfico $\sigma - \epsilon$ verdadera para de probetas a 45° de TRIP800 para contraste con ecuación obtenida.

<i>PROBETAS 45°</i>					
<i>Deformación verdadera tramo 1</i>		<i>Deformación verdadera tramo 2</i>		<i>Deformación verdadera tramo General</i>	
0,0054	0,0309	0,0309	0,2784	0,0054	0,2784
n1	0,093	n2	0,245	n	0,208
k1	900	k2	1511	k	1399
r1	0,9835	r2	0,9988	r	0,9853
<i>HOLLOMON</i>		<i>HOLLOMON</i>		<i>HOLLOMON</i>	
$\sigma = 900 * \epsilon^{0,093}$		$\sigma = 1511 * \epsilon^{0,245}$		$\sigma = 1399 * \epsilon^{0,208}$	

Tabla 2.9- Cálculo de exponente de endurecimiento y correspondiente Ley de Hollomon para probetas a 45° de TRIP800.

A.2.7_cálculo Voce-Kock para trip800

A2.7.1-Probetas longitudinales Trip 800.

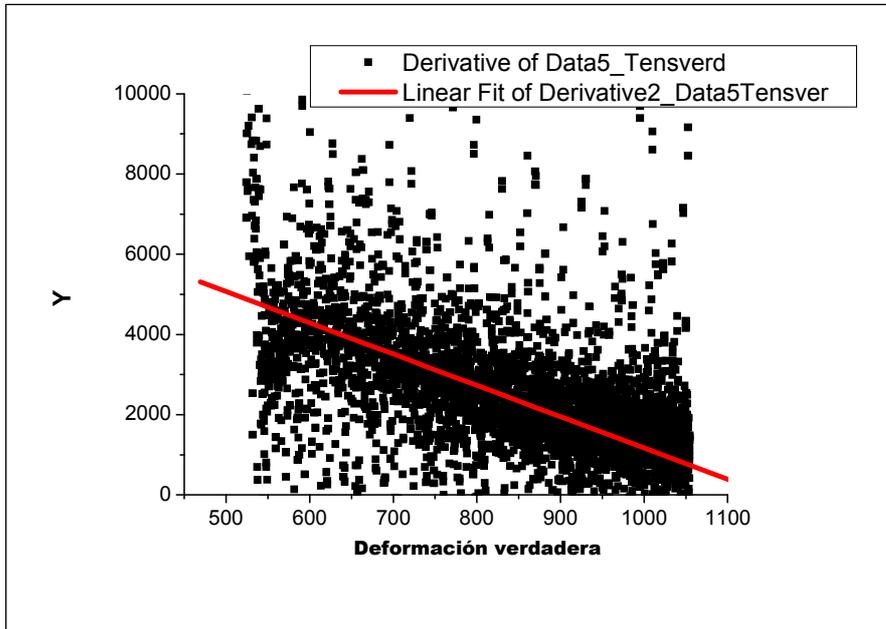


Fig.2.13-Gráfico $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} - \sigma_{verdadera}$ para cálculo de $\sigma_{saturada}$ y W(Pendiente de la recta).

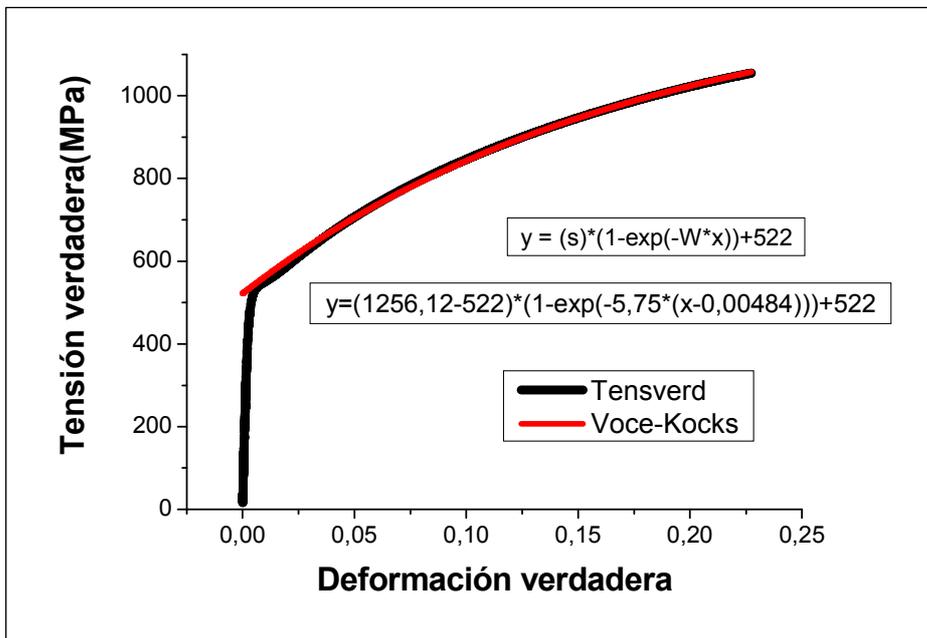


Fig.2.14- Curva experimental y ajuste del modelo VK para probetas longitudinales Trip800.

Orientación longitudinal TRIP800		
$\sigma = \sigma_{saturada} [1 - \exp(-W\varepsilon)]$		
W	5,75	MODELO VOCE KOCKS
$\sigma_{saturada}$	1256,12	$\sigma = 1256,12 * [1 - \exp(-5,75 * \varepsilon)]$

Tabla 2.10-Cálculo modelo Voce kocks para probetas longitudinales TRIP800.

A2.7.2-Probetas transversales Trip 800.

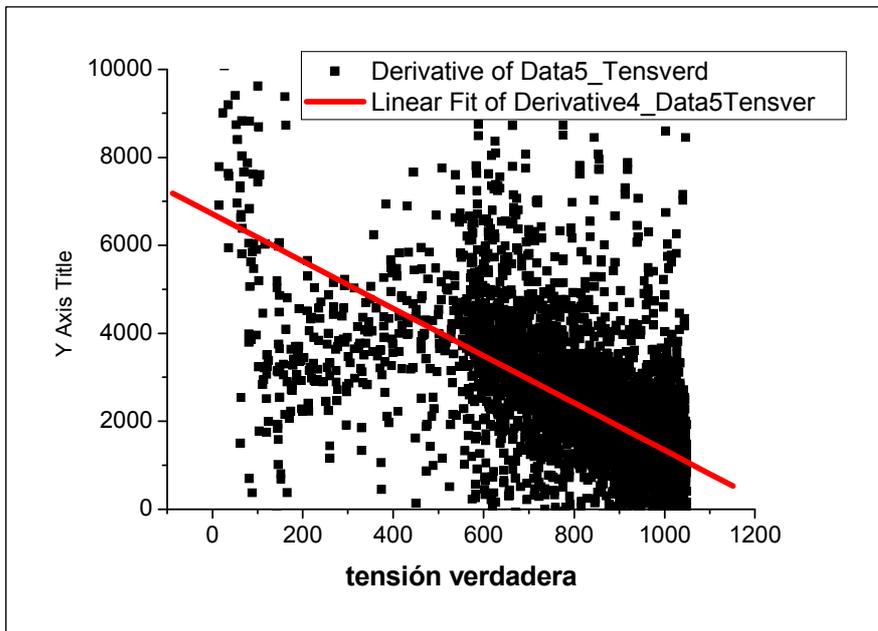


Fig.2.15-Gráfico $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} - \sigma_{verdadera}$ para cálculo de $\sigma_{saturada}$ y W(Pendiente de la recta).

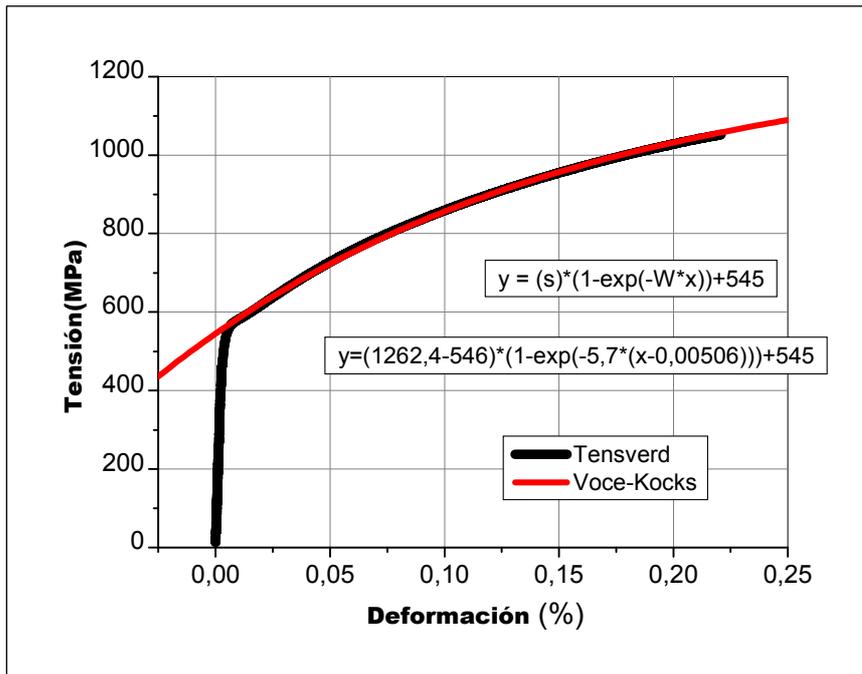


Fig.2.16_ Curva experimental y ajuste del modelo VK para probetas transversales Trip800.

Orientación transversal TRIP800		
$\sigma = \sigma_{saturada} [1 - \exp(-W \varepsilon)]$		
W	5,7	MODELO VOCE KOCKS
$\sigma_{saturada}$	1262,4	$\sigma = 1262,4 * [1 - \exp(-5,7 * \varepsilon)]$

Tabla 2.11-Cálculo modelo Voce kocks para probetas transversales TRIP800

A.2.7.3-Probetas a 45° Trip 800

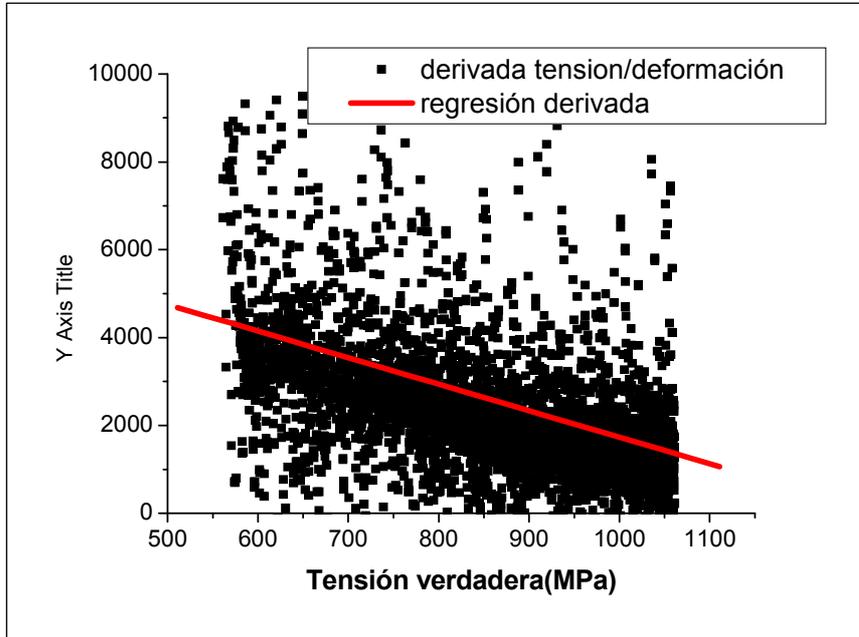


Fig.2.17-Gráfico $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} - \sigma_{verdadera}$ para cálculo de $\sigma_{saturada}$ y W(Pendiente de la recta).

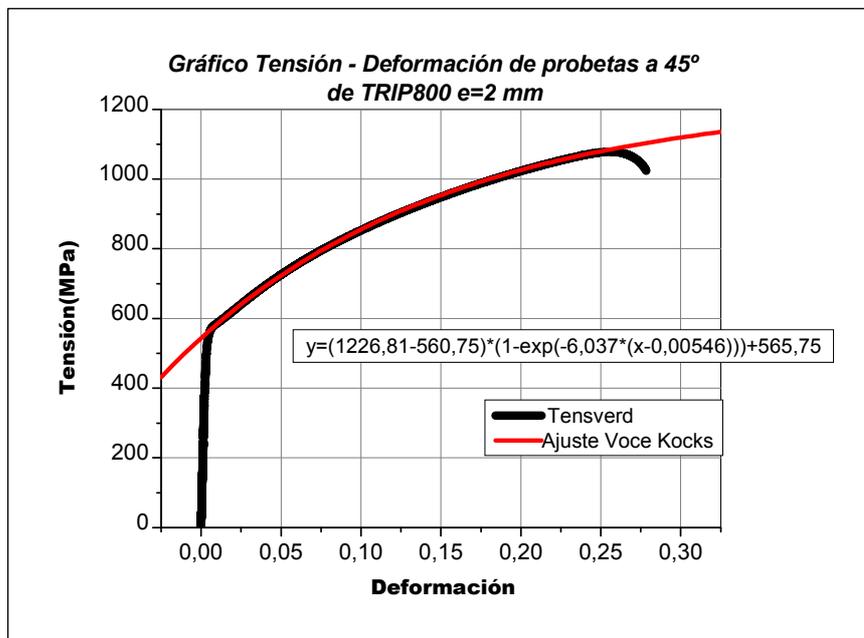


Fig.2.18-Curva experimental y ajuste del modelo VK para probetas a 45° Trip800.

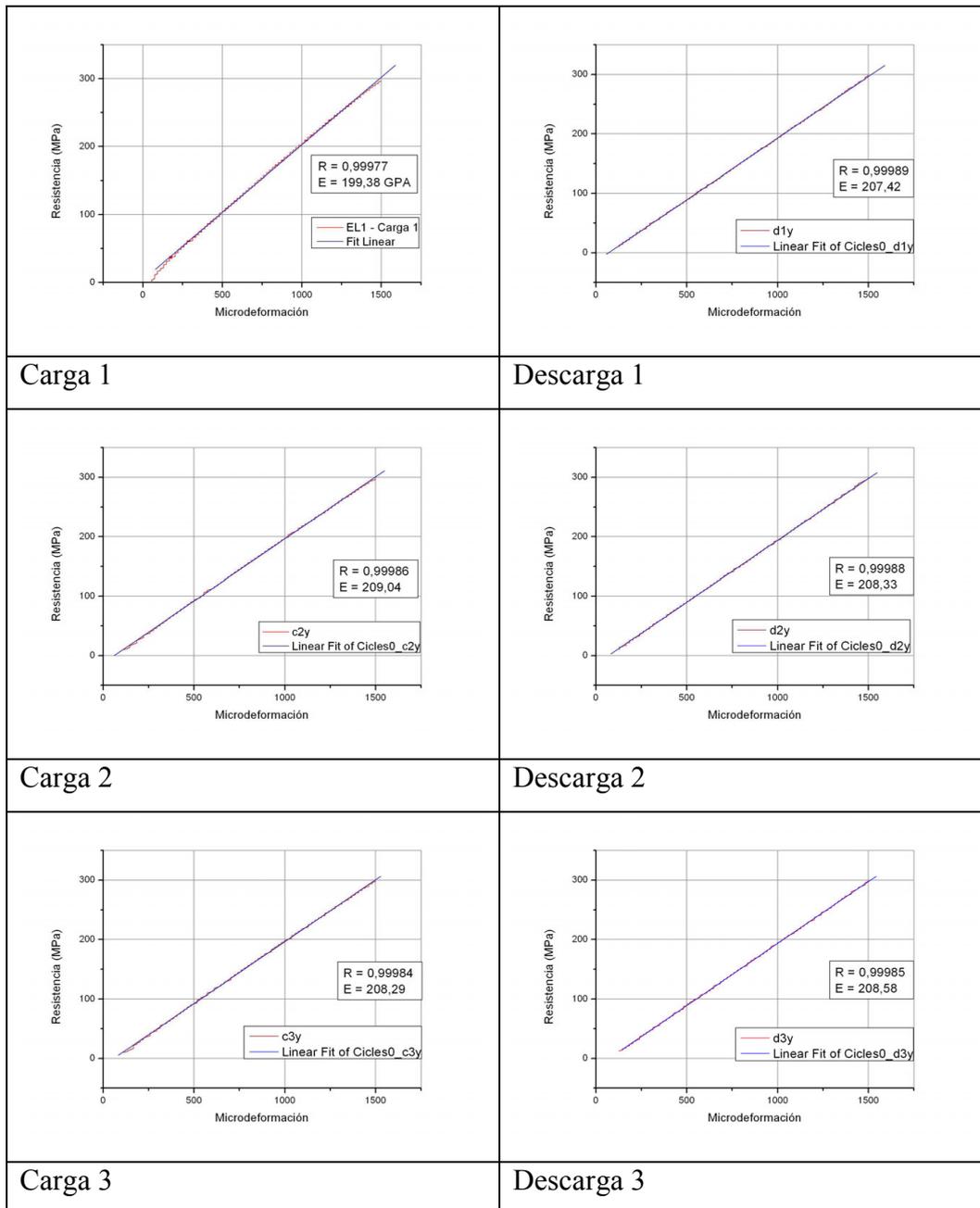
Orientación a 45° TRIP800		
$\sigma = \sigma_{saturada} [1 - \exp(-W\varepsilon)]$		
W	6,04	<u>MODELO VOCE KOCKS</u>
$\sigma_{saturada}$	1226,81	$\sigma = 1226,81 * [1 - \exp(-6,04 * \varepsilon)]$

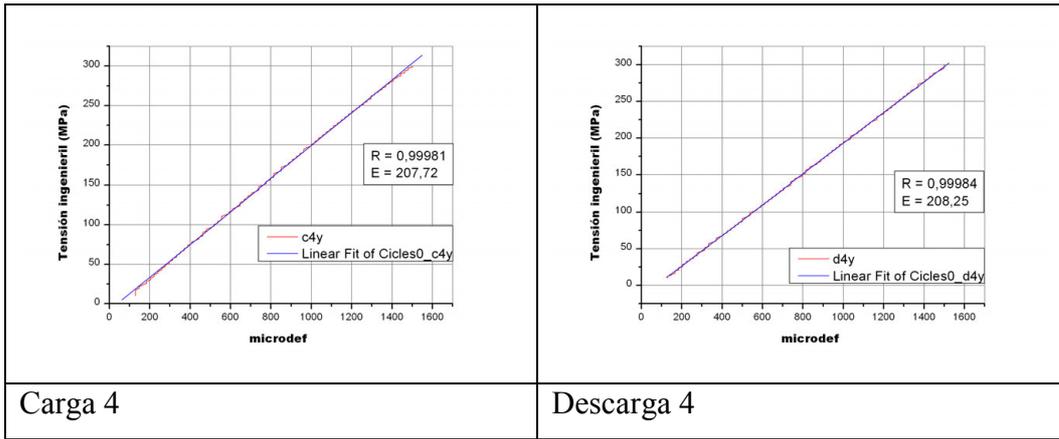
Tabla 2.12-Cálculo modelo Voce kocks para probetas a 45° de TRIP800.

B.- Anexo método experimental II

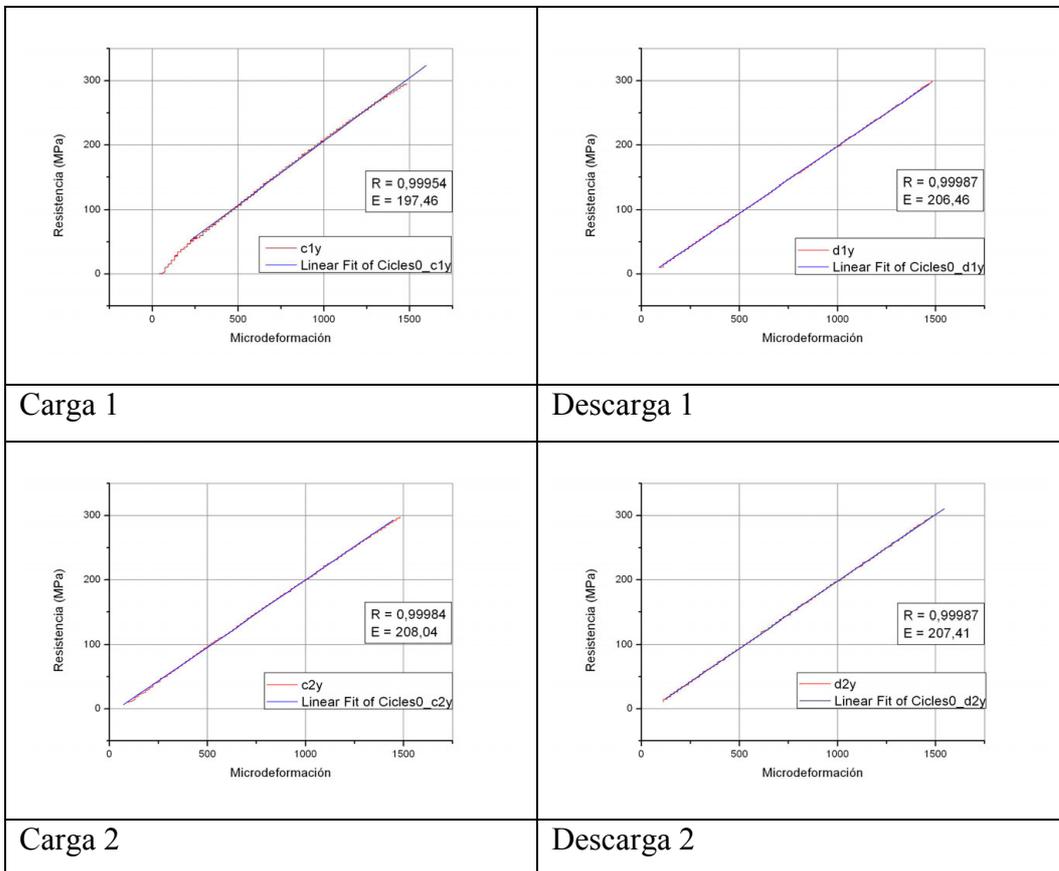
B.1- Cálculo del módulo elástico para las diferentes cargas y descargas DP800

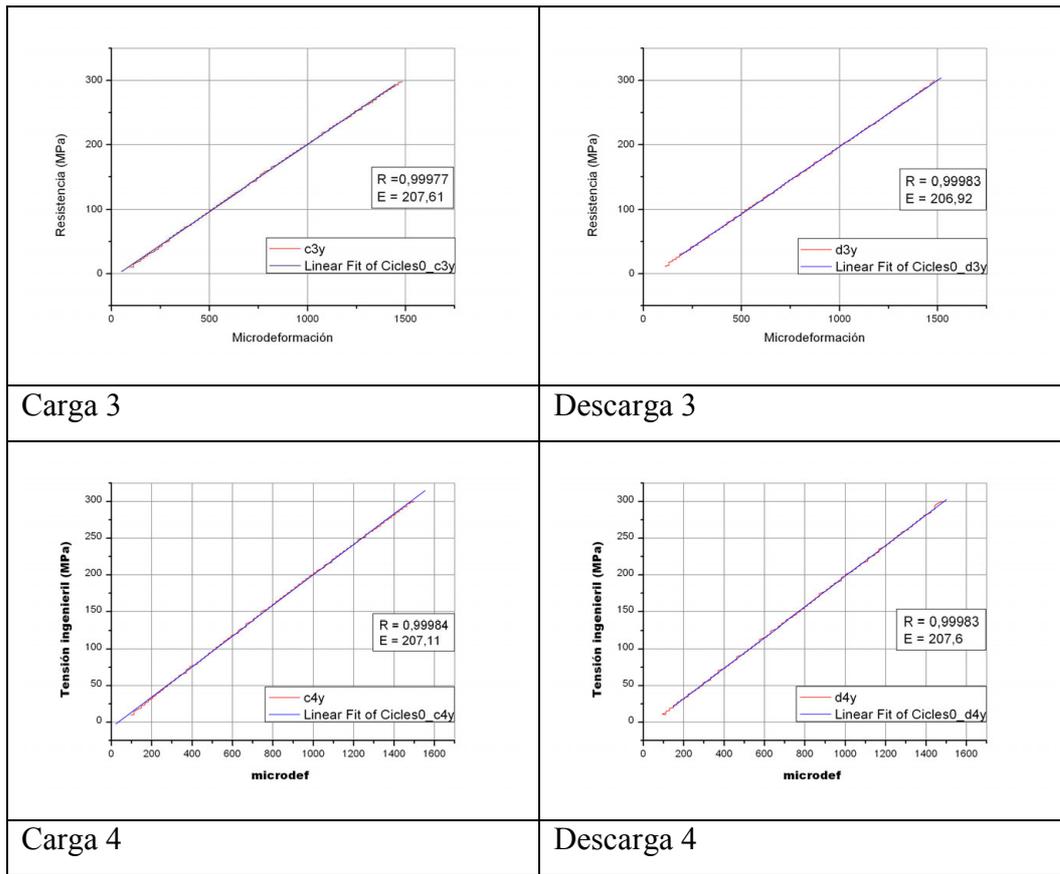
B.1.1- P1 de DP800



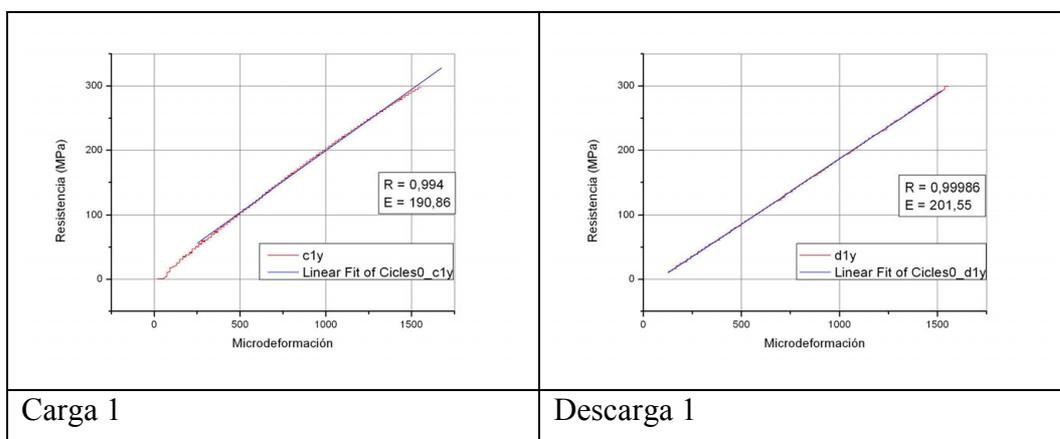


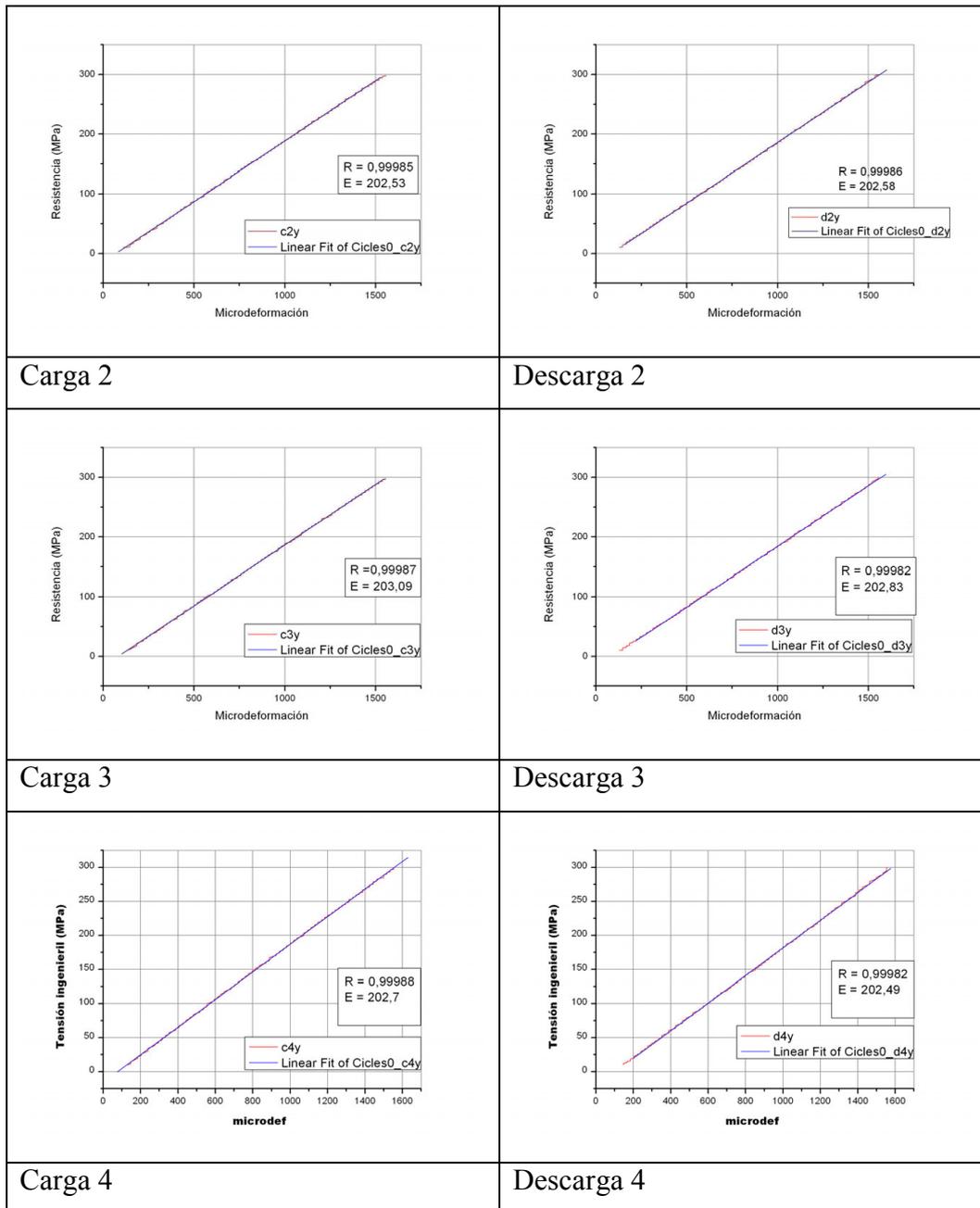
B.1.2- P2 de DP800



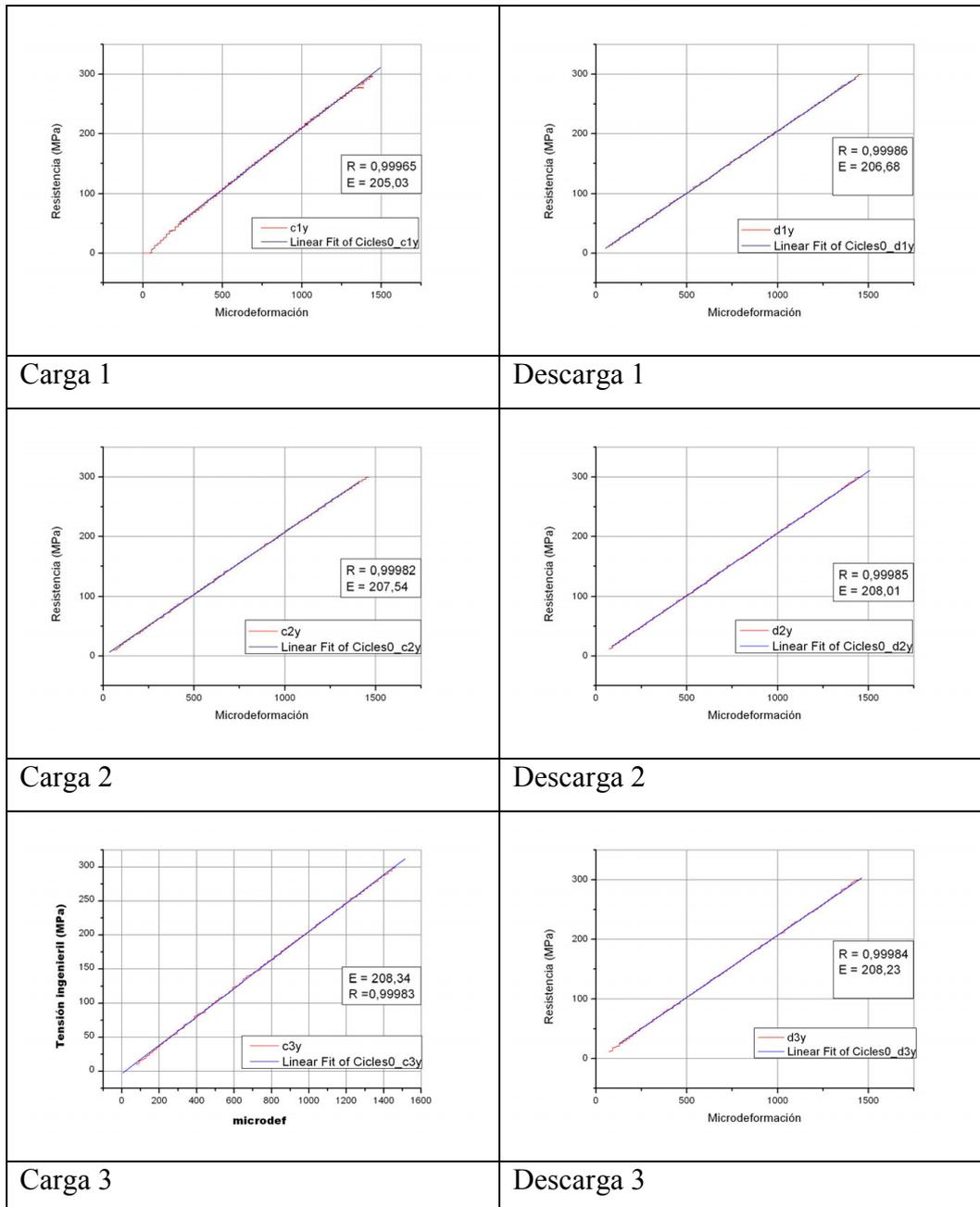


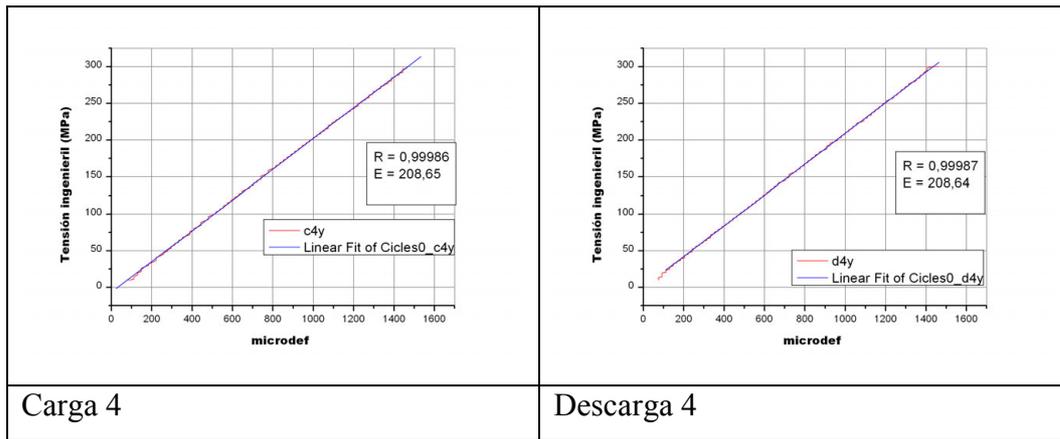
B.1.3- P3 de DP800



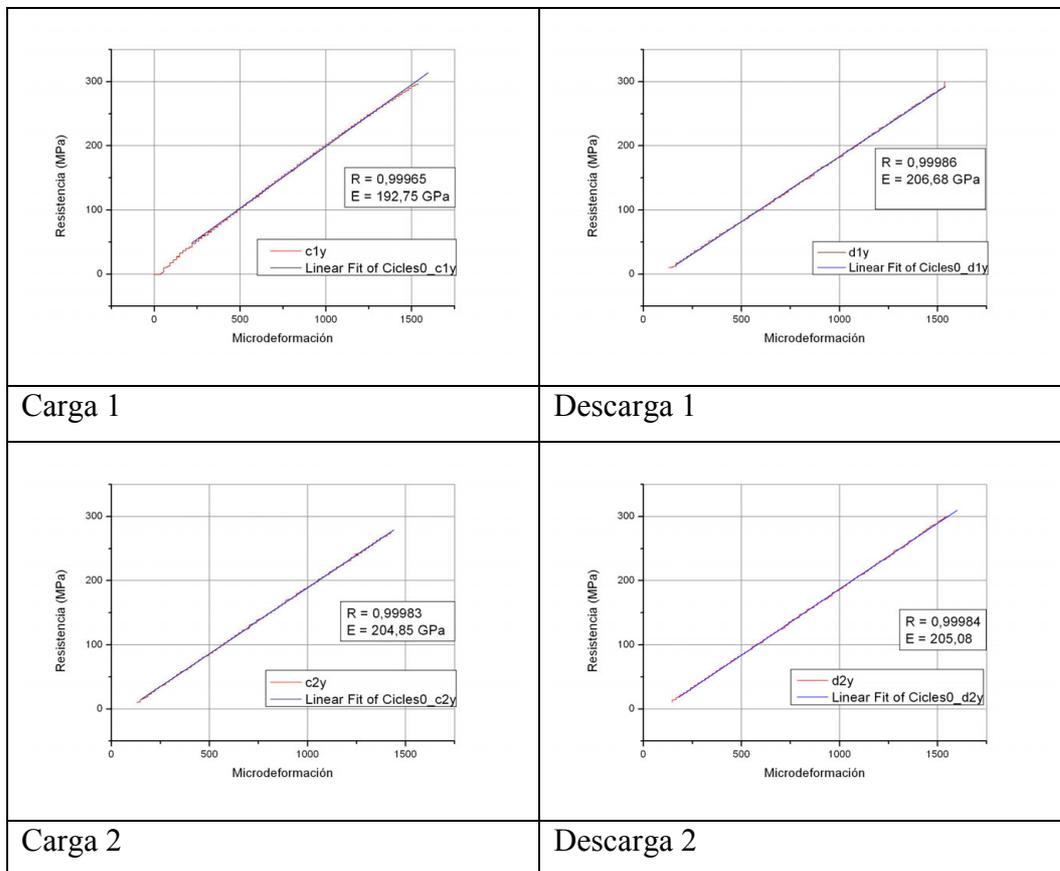


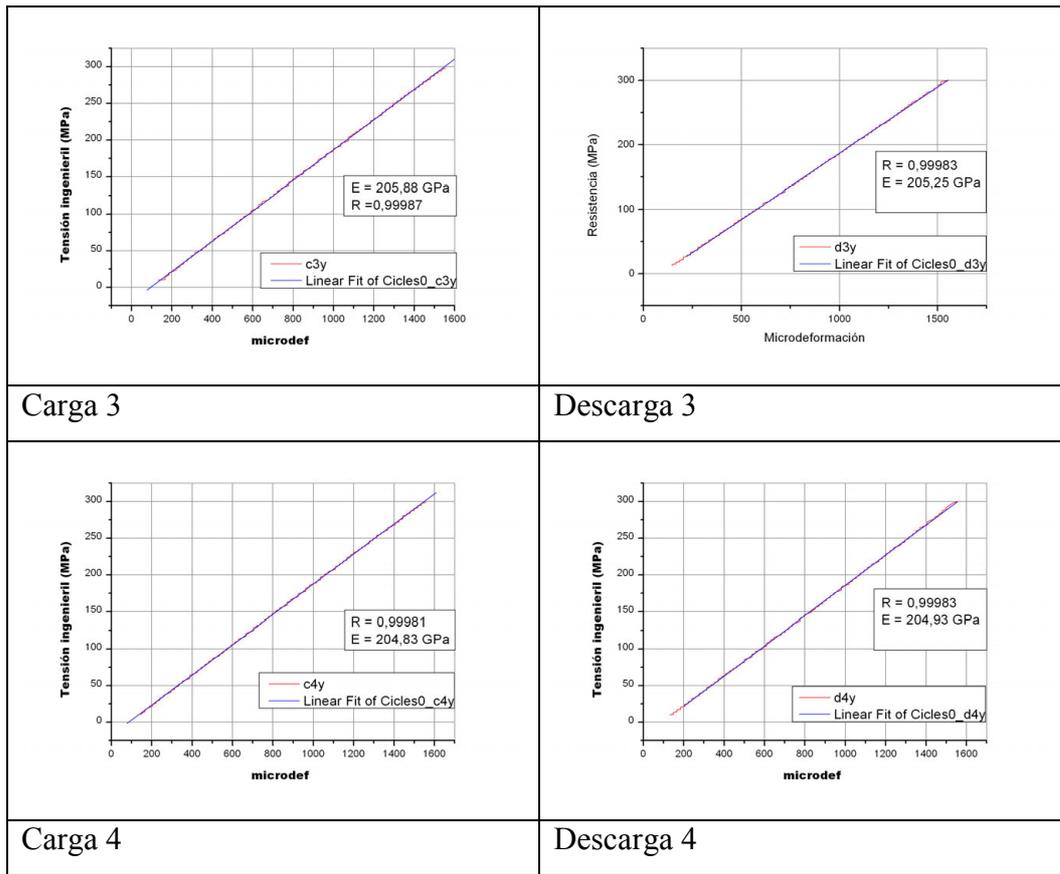
B.1.4- P4 de DP800





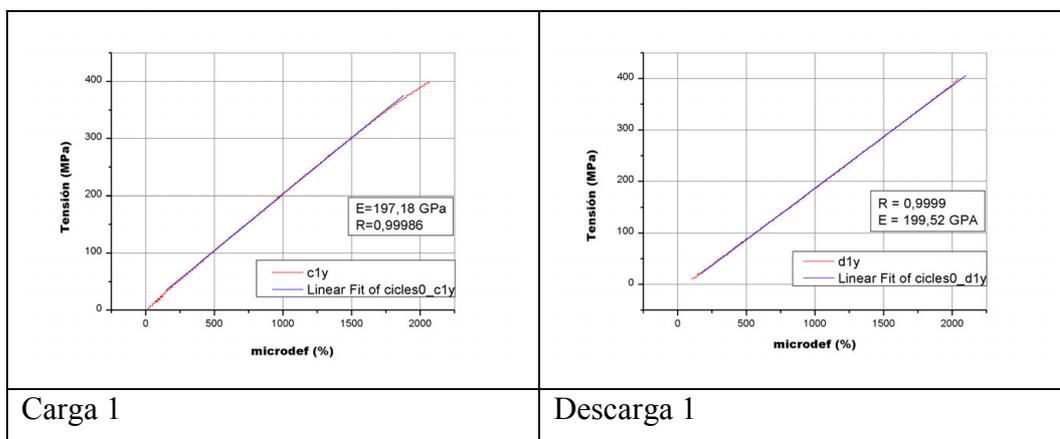
B.1.5- P5 de DP800

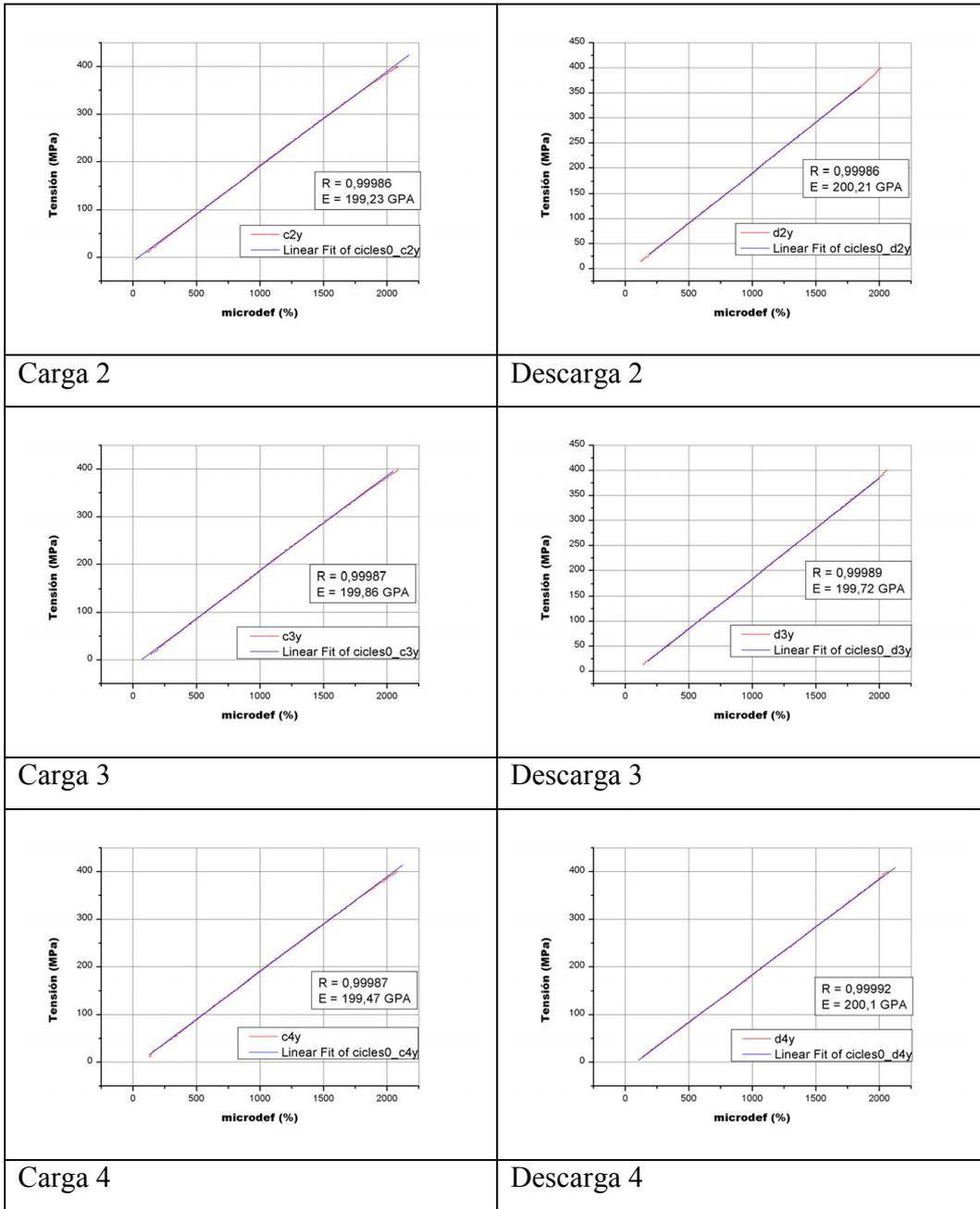




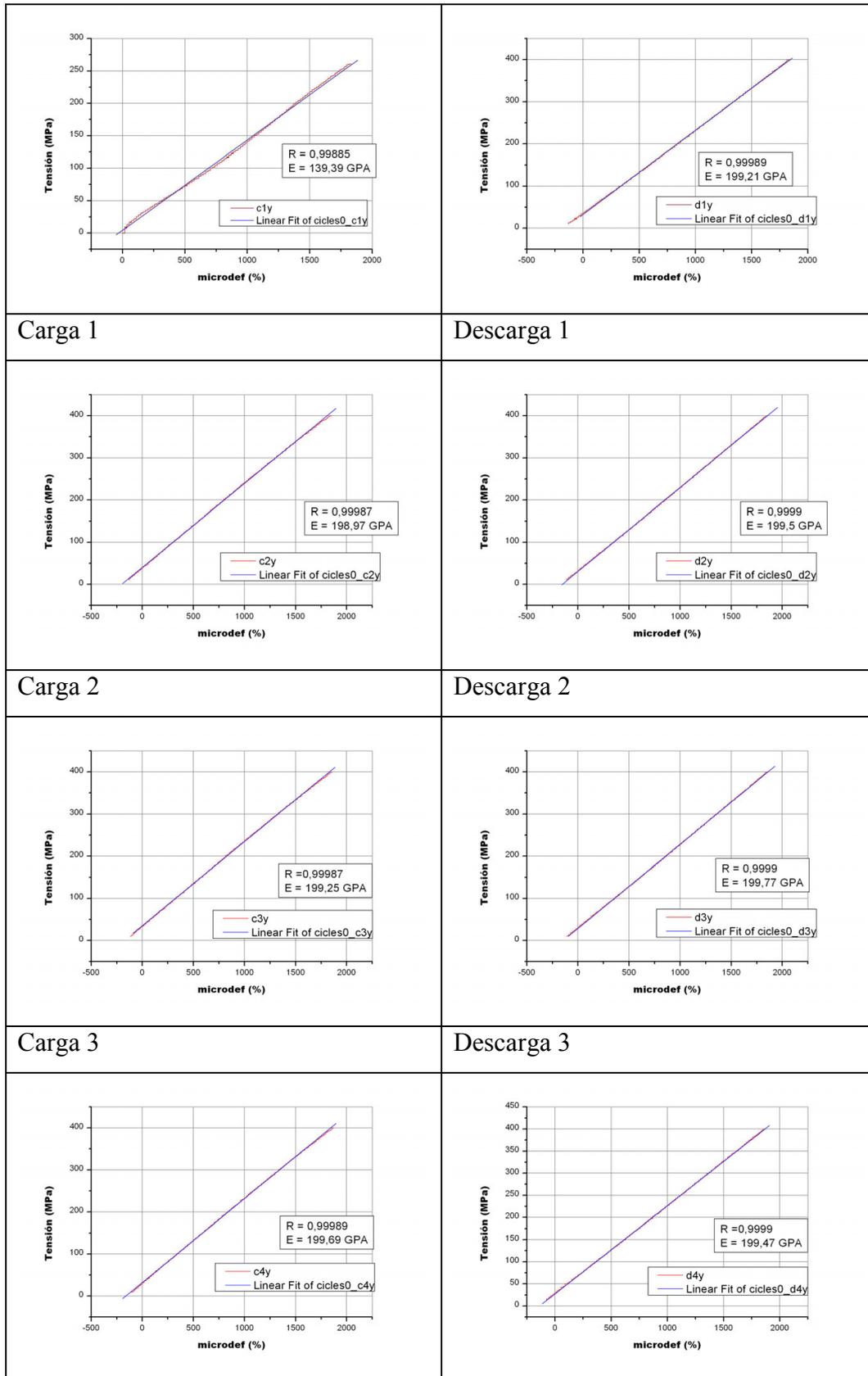
B.2- Cálculo del módulo elástico para las diferentes cargas y descargas TRIP800

B.2.1- P1 de TRIP800





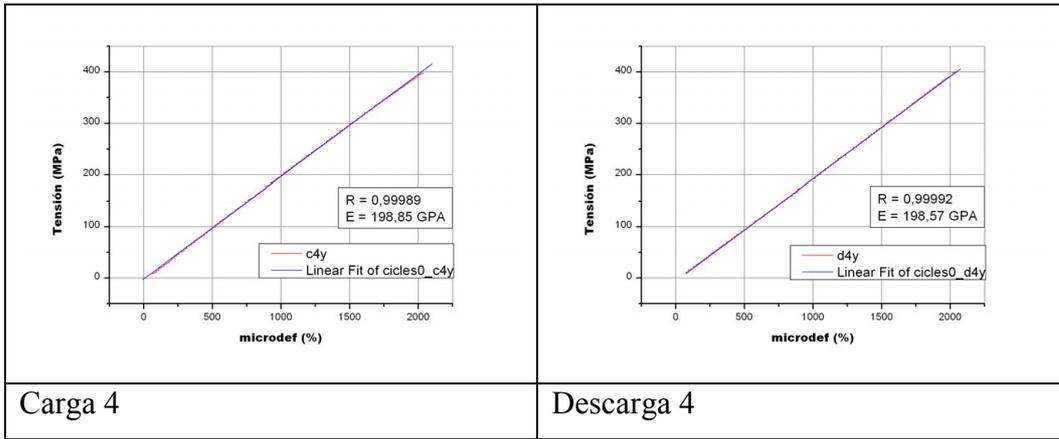
B.2.2- P2 de TRIP800



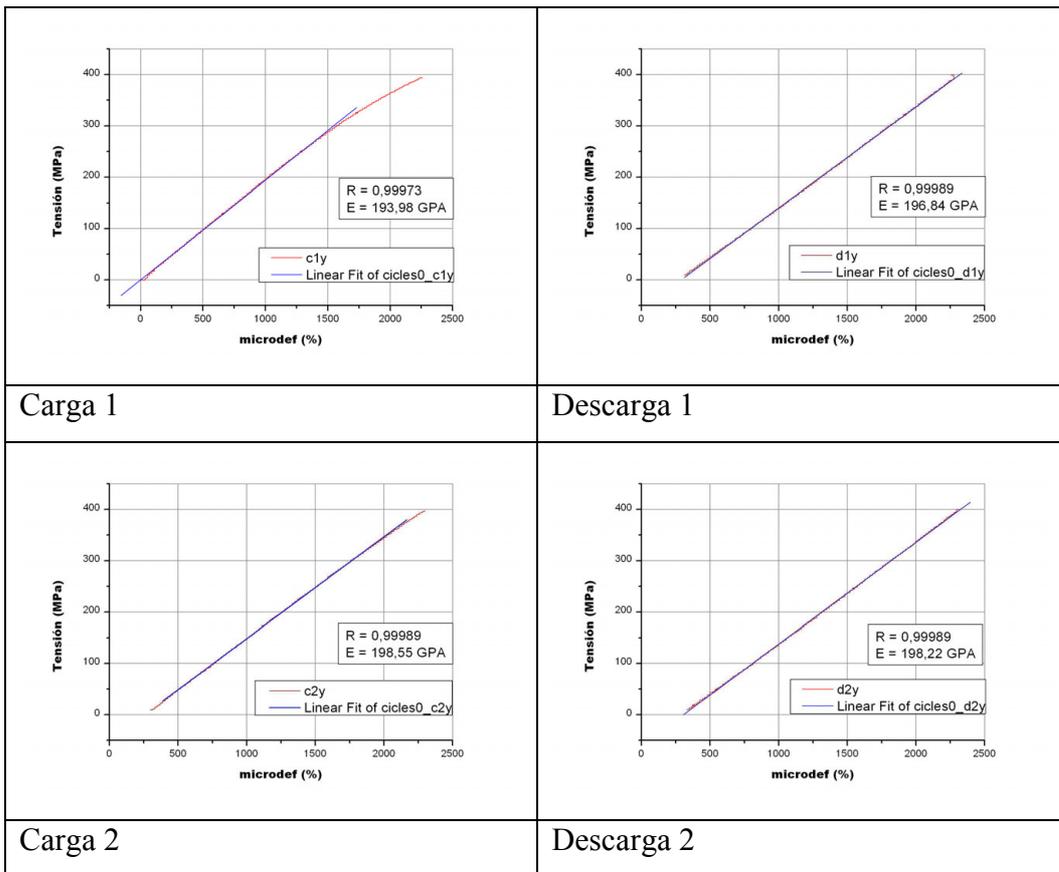
Carga 4	Descarga 4
---------	------------

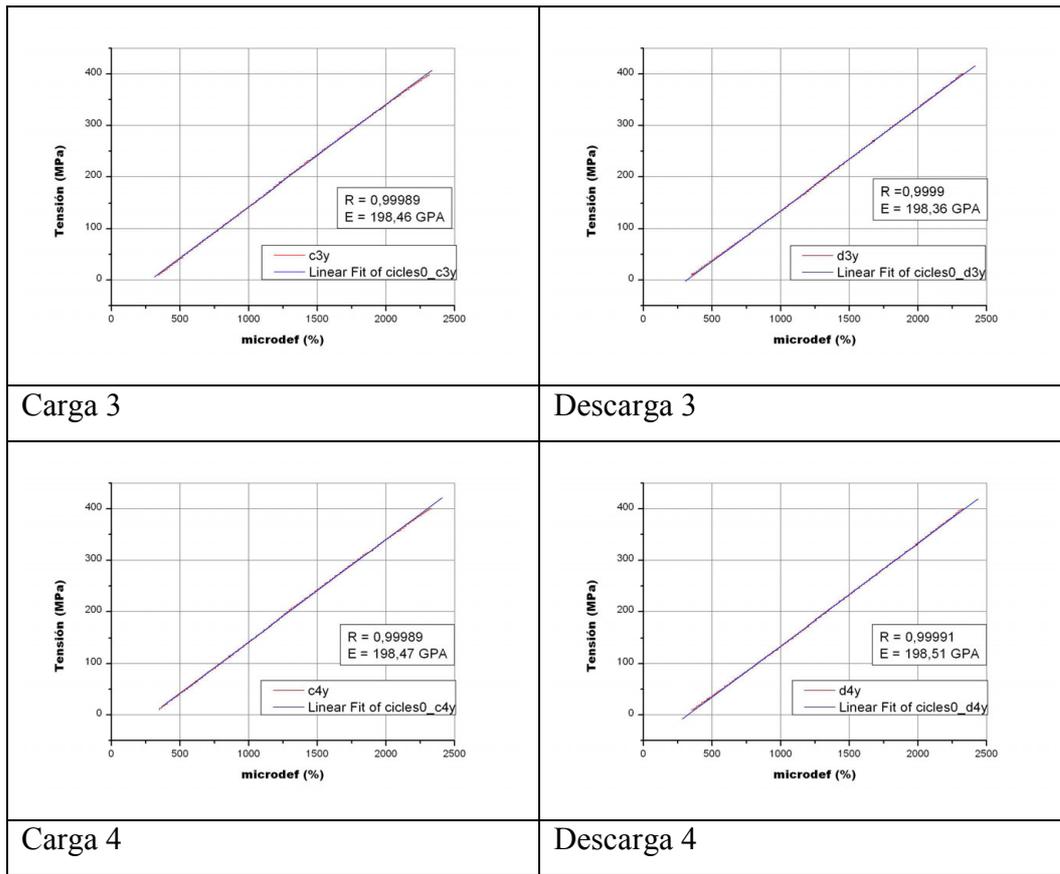
B.2.3- P3 de TRIP800

<p>Tensión (MPa)</p> <p>microdef (%)</p> <p>R = 0,99985 E = 197,93 GPA</p> <p>c1y Linear Fit of cycles0_c1y</p>	<p>Tensión (MPa)</p> <p>microdef (%)</p> <p>R = 0,99991 E = 198,72 GPA</p> <p>d1y Linear Fit of cycles0_d1y</p>
Carga 1	Descarga 1
<p>Tensión (MPa)</p> <p>microdef (%)</p> <p>R = 0,99986 E = 198,42 GPA</p> <p>c2y Linear Fit of cycles0_c2y</p>	<p>Tensión (MPa)</p> <p>microdef (%)</p> <p>R = 0,99991 E = 198,49 GPA</p> <p>d2y Linear Fit of cycles0_d2y</p>
Carga 2	Descarga 2
<p>Tensión (MPa)</p> <p>microdef (%)</p> <p>R = 0,99988 E = 198,2 GPA</p> <p>c3y Linear Fit of cycles0_c3y</p>	<p>Tensión (MPa)</p> <p>microdef (%)</p> <p>R = 0,99991 E = 198,47 GPA</p> <p>d3y Linear Fit of cycles0_d3y</p>
Carga 3	Descarga 3

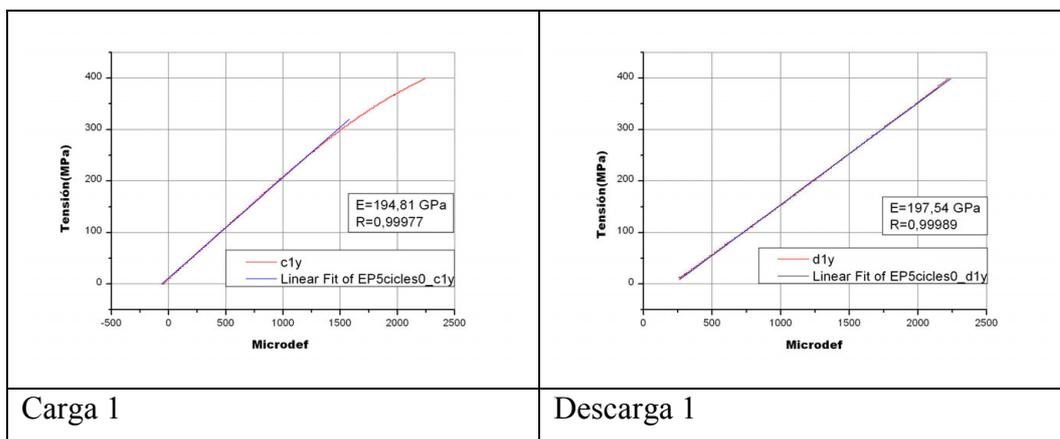


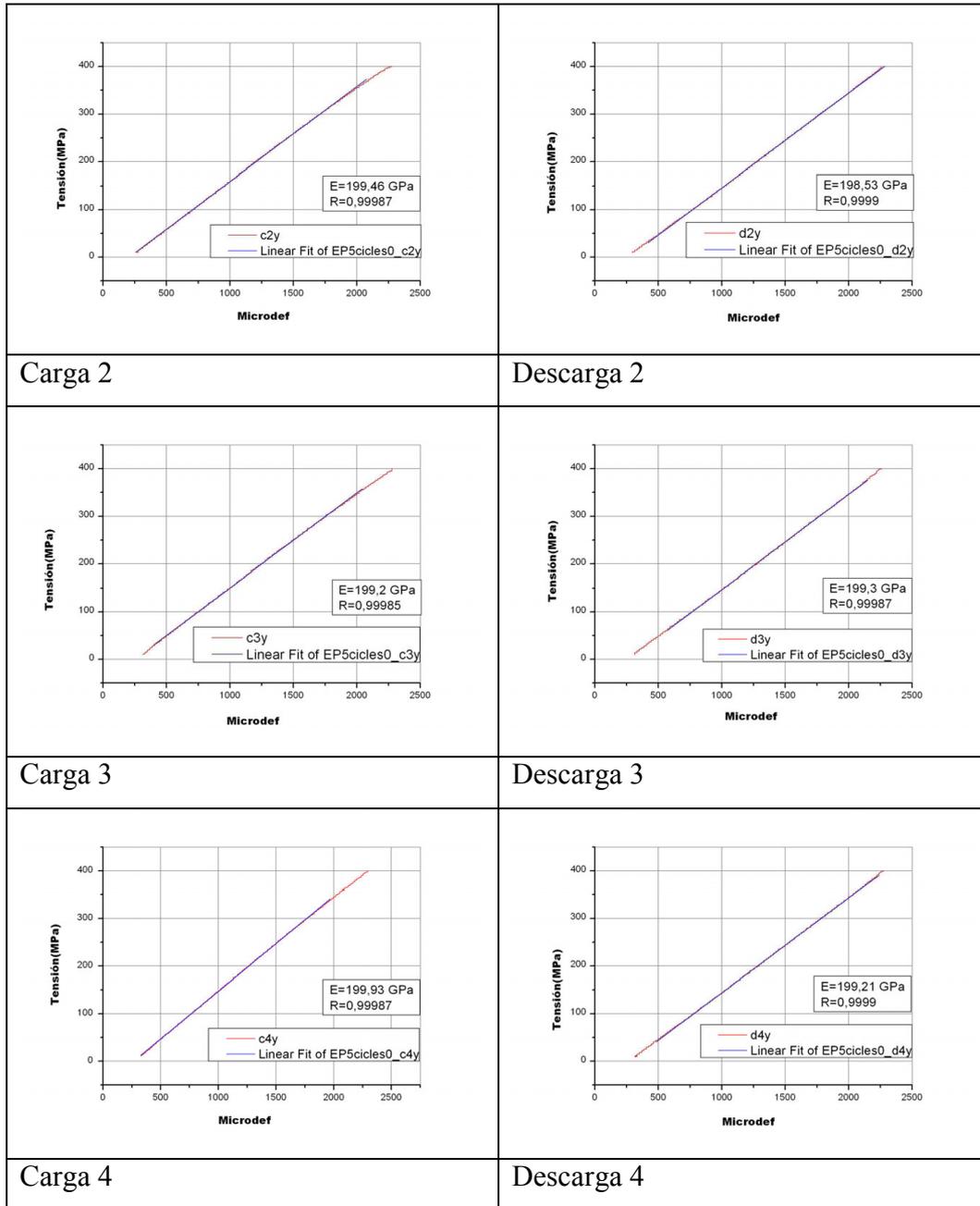
B.2.4- P4 de TRIP800





B.2.5- P5 de TRIP800





C.-Cálculos método experimental III

C.1- Cálculo del coeficiente de anisotropía r para DP800

C.1.1- Probetas longitudinales Dp800.

OT ERRES LONGITUDINALES DP800															
	<i>L0</i>	<i>LF</i>	<i>A%</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>Prom</i>
RL3	80,00														
<i>A0</i>	92,19	15,24		19,968	19,973	19,972	19,963	19,963	19,961	19,952	19,948	19,941	19,923	19,919	19,953
<i>e0</i>				1,797	1,796	1,795	1,795	1,798	1,800	1,794	1,794	1,793	1,791	1,791	1,795
<i>Af</i>				18,889	18,835	18,811	18,781	18,767	18,755	18,734	18,715	18,702	18,688	18,780	18,769
<i>ef</i>				1,681	1,679	1,684	1,680	1,676	1,676	1,675	1,670	1,668	1,671	1,673	1,676
RL4	80,00														
<i>A0</i>	92,28	15,35		19,937	19,936	19,949	19,957	19,963	19,966	19,971	19,973	19,976	19,960	19,978	19,961
<i>e0</i>				1,795	1,796	1,795	1,795	1,798	1,800	1,794	1,794	1,793	1,791	1,791	1,795
<i>Af</i>				18,756	18,673	18,694	18,711	18,730	18,753	18,770	18,785	18,807	18,823	18,915	18,765
<i>ef</i>				1,668	1,665	1,665	1,669	1,669	1,668	1,668	1,683	1,675	1,675	1,680	1,671
RL5	80,00														
<i>A0</i>	92,22	15,28		19,901	19,910	19,914	19,921	19,930	19,939	19,939	19,945	19,946	19,953	19,949	19,932
<i>e0</i>				1,792	1,794	1,793	1,795	1,796	1,805	1,798	1,796	1,796	1,793	1,793	1,796
<i>Af</i>				18,734	18,675	18,676	18,685	18,701	18,719	18,740	18,756	18,786	18,810	18,889	18,743
<i>ef</i>				1,670	1,667	1,671	1,671	1,671	1,673	1,672	1,675	1,677	1,676	1,679	1,673

Tabla C.1.-Medidas tomadas en probetas longitudinales dp800, tanto iniciales como finales.

RL3	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,953			18,769	92,210	0,756	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,953			18,769	1,676	0,892	ESPESOR	MANUAL
e0	1,795						ESPESOR	
RL4	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,961			18,765	92,280	0,763	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,961			18,765	1,671	0,863	ESPESOR	MANUAL
e0	1,795						ESPESOR	
RL5	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,932			18,743	92,220	0,763	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,932			18,743	1,673	0,867	ESPESOR	MANUAL
e0	1,796						ESPESOR	

Tabla C.2-Tabla para cálculo de r manual, tanto de anchura como de espesor, para probetas longitudinales

C.1.2- Probetas transversales Dp800.

Tabla C.3.-Medidas tomadas en probetas transversales, tanto iniciales como finales.

OT															
ERRES TRANSVERSALES DP800															
	<i>L0</i>	<i>LF</i>	<i>A%</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>Prom</i>
RT1															
<i>A0</i>	80,00	92,39	15,49	19,835	19,836	19,849	19,852	19,857	19,863	19,870	19,873	19,875	19,875	19,881	19,861
<i>e0</i>				1,800	1,808	1,804	1,806	1,805	1,803	1,803	1,800	1,799	1,801	1,798	1,802
<i>Af</i>				18,754	18,593	18,608	18,601	18,605	18,589	18,613	18,556	18,621	18,621	18,716	18,625
<i>ef</i>				1,690	1,680	1,682	1,684	1,677	1,679	1,676	1,670	1,676	1,676	1,679	1,679
RT2															
<i>A0</i>	80,00	92,57	15,71	19,871	19,873	19,868	19,868	19,861	19,858	19,842	19,840	19,832	19,829	19,826	19,852
<i>e0</i>				1,793	1,792	1,791	1,790	1,789	1,789	1,788	1,784	1,785	1,784	1,783	1,788
<i>Af</i>				18,703	18,547	18,570	18,566	18,604	18,613	18,600	18,552	18,590	18,622	18,730	18,609
<i>ef</i>				1,673	1,658	1,665	1,667	1,665	1,666	1,667	1,661	1,666	1,667	1,669	1,666
RT3															
<i>A0</i>	80,00	92,38	15,48	19,862	19,874	19,881	19,886	19,895	19,900	19,906	19,908	19,915	19,915	19,919	19,896
<i>e0</i>				1,806	1,806	1,808	1,808	1,805	1,803	1,802	1,805	1,806	1,808	1,805	1,806
<i>Af</i>				18,749	18,603	18,607	18,578	18,585	18,629	18,688	18,665	18,689	18,672	18,737	18,655
<i>ef</i>				1,692	1,680	1,681	1,680	1,678	1,677	1,684	1,681	1,683	1,677	1,683	1,681
RT4															
<i>A0</i>	80,00	92,36	15,45	19,917	19,900	19,902	19,899	19,889	19,887	19,870	19,870	19,866	19,864	19,852	19,883
<i>e0</i>				1,805	1,805	1,805	1,804	1,806	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804	1,803	1,804
<i>Af</i>				18,845	18,706	18,673	18,646	18,623	18,591	18,621	18,544	18,590	18,574	18,602	18,638
<i>ef</i>				1,695	1,668	1,687	1,685	1,683	1,679	1,680	1,680	1,680	1,683	1,678	1,682
RT5															
<i>A0</i>	80,00	92,38	15,48	19,819	19,819	19,828	19,836	19,844	19,847	19,850	19,858	19,859	19,861	19,864	19,844
<i>e0</i>				1,803	1,804	1,805	1,802	1,802	1,803	1,803	1,803	1,805	1,808	1,807	1,804
<i>Af</i>				18,545	18,466	18,480	18,463	18,575	18,586	18,624	18,648	18,677	18,677	18,820	18,596
<i>ef</i>				1,678	1,668	1,672	1,668	1,686	1,678	1,677	1,680	1,688	1,687	1,701	1,680

RTG1	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,861			18,625	92,390	0,805	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,861			18,625	1,679	0,905	ESPESOR	MANUAL
e0	1,802						ESPESOR	
RTG2	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,852			18,609	92,570	0,795	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,852			18,609	1,666	0,913	ESPESOR	MANUAL
e0	1,788						ESPESOR	
RTG3	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,896			18,655	92,380	0,811	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,896			18,655	1,681	0,904	ESPESOR	MANUAL
e0	1,806						ESPESOR	
RTG4	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,883			18,638	92,360	0,819	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,883			18,638	1,682	0,918	ESPESOR	MANUAL
e0	1,804						ESPESOR	
RTG5	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,844			18,596	92,380	0,823	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,844			18,596	1,680	0,913	ESPESOR	MANUAL
e0	1,804						ESPESOR	

Tabla C.4-Tabla para cálculo de r manual, tanto de anchura como de espesor, para probetas transversales.

C.1.3- Probetas a 45° Dp800.

OT		Muestra a 45° DP800													
	L0	LF	A%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Prom
R45 1															
A0	80,00	92,60	15,75	19,902	19,897	19,894	19,889	19,892	19,879	19,877	19,858	19,851	19,846	19,843	19,875
e0				1,797	1,792	1,791	1,791	1,791	1,794	1,794	1,794	1,797	1,798	1,798	1,794
Af				18,788	18,685	18,627	18,522	18,506	18,525	18,531	18,487	18,483	18,449	18,498	18,555
ef				1,685	1,688	1,685	1,677	1,677	1,679	1,679	1,678	1,678	1,674	1,673	1,679
R45 2															
A0	80,00	92,31	15,39	19,918	19,928	19,927	19,927	19,931	19,935	19,934	19,933	19,937	19,941	19,948	19,933
e0				1,797	1,796	1,797	1,798	1,800	1,800	1,800	1,801	1,803	1,803	1,799	1,799
Af				18,688	18,580	18,503	18,503	18,591	18,648	18,607	18,531	18,560	18,586	18,707	18,591
ef				1,686	1,683	1,674	1,675	1,686	1,688	1,684	1,680	1,684	1,683	1,680	1,682
R45 3															
A0	80,00	92,32	15,40	19,909	19,916	19,919	19,921	19,922	19,927	19,924	19,928	19,931	19,931	19,941	19,924
e0				1,793	1,792	1,791	1,794	1,793	1,790	1,789	1,790	1,785	1,788	1,790	1,790
Af				18,602	18,507	18,524	18,470	18,521	18,575	18,600	18,601	18,601	18,619	18,788	18,583
ef				1,673	1,673	1,679	1,673	1,674	1,690	1,680	1,683	1,678	1,674	1,673	1,677
R45 4															
A0	80,00	92,33	15,41	19,926	19,925	19,920	19,917	19,915	19,914	19,906	19,895	19,891	19,880	19,873	19,906
e0				1,802	1,806	1,803	1,803	1,801	1,799	1,799	1,799	1,797	1,798	1,797	1,800
Af				18,740	18,703	18,655	18,607	18,596	18,568	18,472	18,400	18,403	18,433	18,642	18,565
ef				1,700	1,705	1,699	1,693	1,691	1,689	1,680	1,673	1,673	1,677	1,680	1,687
R45 5															
A0	80,00	92,22	15,28	19,866	19,876	19,887	19,885	19,890	19,904	19,913	19,913	19,917	19,921	19,924	19,900
e0				1,790	1,785	1,784	1,783	1,787	1,790	1,790	1,789	1,788	1,789	1,789	1,788
Af				18,637	18,484	18,483	18,499	18,535	18,543	18,529	18,509	18,532	18,580	18,654	18,544
ef				1,676	1,673	1,671	1,670	1,673	1,673	1,671	1,670	1,672	1,673	1,672	1,672

Tabla C.5.-Medidas tomadas en probetas orientadas a 45°, tanto inicial como final.

R45G1	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,875			18,555	92,600	0,887	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,875			18,555	1,679	1,039	ESPESOR	MANUAL
e0	1,794						ESPESOR	
R45G2	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,933			18,591	92,310	0,948	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,933			18,591	1,682	1,037	ESPESOR	MANUAL
e0	1,799						ESPESOR	
R45G3	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,924			18,583	92,320	0,948	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,924			18,583	1,677	1,072	ESPESOR	MANUAL
e0	1,790						ESPESOR	
R45G4	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,906			18,565	92,330	0,947	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,906			18,565	1,687	1,078	ESPESOR	MANUAL
e0	1,800						ESPESOR	
R45G5	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,900			18,544	92,220	0,986	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,900			18,544	1,672	1,054	ESPESOR	MANUAL
e0	1,788						ESPESOR	

Tabla C.6-Tabla para cálculo de r manual, tanto de anchura como de espesor, para probetas orientadas a 45°.

C.1.4-Tabla resultados coeficiente r para Dp800.

	<i>R</i> <i>promedio</i> <i>Anchura</i>	<i>R</i> <i>promedio</i> <i>Espesor</i>	<i>R</i> <i>instantánea</i>	<i>def</i> <i>verdadera</i> <i>longitudinal</i>	<i>def</i> <i>verdadera</i> <i>transversal</i>
<i>probeta RL1</i>					
<i>probeta RL2</i>					
<i>probeta RL3</i>	0,75600	0,89200	0,80858	0,14279	0,06001
<i>probeta RL4</i>	0,76300	0,86300	0,82386	0,14293	0,06065
<i>probeta RL5</i>	0,76300	0,86700	0,81017	0,14295	0,06013
<i>Promedio</i>			0,81		
<i>Desviación</i>			0,01		
	<i>R</i> <i>promedio</i> <i>Anchura</i>	<i>R</i> <i>promedio</i> <i>espesor</i>	<i>R</i> <i>instantánea</i>	<i>def</i> <i>verdadera</i> <i>longitudinal</i>	<i>def</i> <i>verdadera</i> <i>transversal</i>
<i>probeta RT1</i>	0,80500	0,90500	0,91984	0,14282	0,06404
<i>probeta RT2</i>	0,79500	0,91300	0,83219	0,14280	0,06091
<i>probeta RT3</i>	0,81100	0,90400	0,91194	0,14273	0,06374
<i>probeta RT4</i>	0,81900	0,91800	0,89858	0,14310	0,06343
<i>probeta RT5</i>	0,82300	0,91300	0,83979	0,14299	0,06127
<i>Promedio</i>			0,91		
<i>Desviación</i>			0,01		
	<i>R</i> <i>promedio</i> <i>Anchura</i>	<i>R</i> <i>promedio</i> <i>espesor</i>	<i>R</i> <i>instantánea</i>	<i>def</i> <i>verdadera</i> <i>longitudinal</i>	<i>def</i> <i>verdadera</i> <i>transversal</i>
<i>probeta R45_1</i>	0,88700	1,03900	1,04129	0,14278	0,06789
<i>probeta R45_2</i>	0,94800	1,03700	0,94290	0,14296	0,06488
<i>probeta R45_3</i>	0,94800	1,07200	1,02264	0,14274	0,06731
<i>probeta R45_4</i>	0,94700	1,07800	0,99845	0,14290	0,06663
<i>probeta R45_5</i>	0,98600	1,05400	1,02058	0,14270	0,06723
<i>Promedio</i>			1,01		
<i>Desviación</i>			0,01		

Tabla C.7-Tabla resultados finales coeficiente anisotropía para las distintas orientaciones de DP800. Las columnas R promedio anchura y promedio espesor son las calculadas a partir de la probeta física, y pese a no tener tanta exactitud como los datos cogidos por el video extensómetro, sirven de comprobación para ver que los resultados obtenidos tienen sentido. Las probetas subrayadas en rojo son las que se han descartado para hacer los cálculos, puesto que de cinco iniciales solamente se han escogido 3 para cada orientación.

C.2- Cálculo del coeficiente de anisotropía r para TRIP800.

C.2.1- Probetas longitudinales. Trip800

1	ERRES LONGITUDINALES													Prom		
	L0	LF	A%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	
RLG1	80,00															
<i>A0</i>				19,931	19,948	19,958	19,948	19,946	19,933	19,907	19,907	19,885	19,885	19,879		19,921
<i>e0</i>				2,038	2,029	1,996	1,995	2,000	1,995	1,992	1,990	1,991	1,993	1,993		2,001
<i>Af</i>				18,317	18,225	18,182	18,137	18,130	18,133	18,158	18,180	18,180	18,210	18,299		18,196
<i>ef</i>				1,825	1,823	1,818	1,817	1,816	1,806	1,810	1,810	1,815	1,819	1,819		1,816
RLG2	80,00															
<i>A0</i>				19,912	19,915	19,914	19,924	19,914	19,921	19,933	19,936	19,928	19,959	19,938		19,927
<i>e0</i>				2,029	2,030	2,030	2,029	2,031	2,022	2,030	2,029	2,028	2,027	2,030		2,029
<i>Af</i>				18,322	18,240	18,213	18,191	18,179	18,193	18,217	18,247	18,277	18,315	18,440		18,258
<i>ef</i>				1,863	1,862	1,861	1,855	1,853	1,852	1,855	1,857	1,860	1,867	1,867		1,859
RLG3	80,00															
<i>A0</i>				19,928	19,926	19,926	19,919	19,915	19,908	19,898	19,900	19,886	19,918	19,886		19,910
<i>e0</i>				2,021	2,015	2,022	2,022	2,021	2,023	2,021	2,016	2,019	2,019	2,018		2,020
<i>Af</i>				18,451	18,342	18,296	18,262	18,229	18,206	18,195	18,206	18,220	18,255	18,360		18,275
<i>ef</i>				1,860	1,856	1,847	1,846	1,844	1,850	1,842	1,846	1,848	1,850	1,855		1,849
RLG4	80,00															
<i>A0</i>				19,899	19,909	19,907	19,917	19,916	19,922	19,931	19,930	19,936	19,937	19,944		19,923
<i>e0</i>				2,023	2,023	2,015	2,013	2,014	2,012	2,012	2,008	2,011	2,009	2,010		2,014
<i>Af</i>				18,305	18,249	18,225	18,216	18,201	18,207	18,226	18,251	18,278	18,313	18,459		18,266
<i>ef</i>				1,842	1,843	1,837	1,846	1,836	1,831	1,831	1,833	1,837	1,839	1,846		1,838

Tabla C.8-Medidas tomadas en probetas longitudinales Trip800, tanto iniciales como finales.

RLG5	80,00												
<i>A0</i>		19,891	19,911	19,909	19,928	19,923	19,931	19,934	19,940	19,922	19,931	19,928	19,923
<i>e0</i>		2,002	2,003	2,003	2,004	2,006	2,003	2,001	2,000	1,999	2,002	2,001	2,002
<i>Af</i>		18,319	18,230	18,212	18,186	18,170	18,166	18,175	18,190	18,225	18,247	18,296	18,220
<i>ef</i>		1,837	1,839	1,833	1,830	1,831	1,828	1,826	1,828	1,827	1,829	1,832	1,831

RLG1	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,921			18,196	96,480	0,936	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,921			18,196	1,816	0,934	ESPESOR	MANUAL
e0	2,001						ESPESOR	
RLG2	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,927			18,258	96,600	0,865	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,927			18,258	1,859	1,000	ESPESOR	MANUAL
e0	2,029						ESPESOR	
RLG3	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,910			18,275	96,280	0,861	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,910			18,275	1,849	0,969	ESPESOR	MANUAL
e0	2,020						ESPESOR	
RLG4	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,923			18,266	96,350	0,876	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,923			18,266	1,838	0,950	ESPESOR	MANUAL
e0	2,014						ESPESOR	
RLG5	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,923			18,220	96,420	0,918	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,923			18,220	1,831	1,001	ESPESOR	MANUAL
e0	2,002						ESPESOR	

Tabla C.9-Tabla para cálculo de r manual, tanto de anchura como de espesor, para probetas orientadas longitudinalmente.

C.2.2-Probetas transversales Trip800.

OT		ERRES TRANSVERSALES													
	L0	LF	A%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Prom
RTG1	80,00														
<i>A0</i>				19,871	19,917	19,882	19,888	19,896	19,900	19,900	19,917	19,912	19,922	19,931	19,903
<i>e0</i>				2,044	2,040	2,044	2,044	2,047	2,042	2,039	2,042	2,038	2,040	2,032	2,041
<i>Af</i>				18,153	18,029	17,964	17,987	17,954	18,032	18,024	17,955	18,020	18,094	18,212	18,039
<i>ef</i>				1,893	1,886	1,885	1,882	1,880	1,885	1,886	1,873	1,882	1,886	1,891	1,884
RTG2	80,00														
<i>A0</i>				19,893	19,897	19,905	19,904	19,928	19,935	19,946	19,942	19,944	19,949	19,955	19,927
<i>e0</i>				2,042	2,043	2,043	2,039	2,038	2,042	2,039	2,068	2,044	2,030	2,036	2,042
<i>Af</i>				18,257	18,050	17,937	17,896	17,967	18,017	18,003	18,023	18,102	18,107	18,193	18,050
<i>ef</i>				1,897	1,889	1,881	1,874	1,873	1,888	1,885	1,886	1,896	1,896	1,901	1,888
RTG3	80,00														
<i>A0</i>				19,873	19,879	19,896	19,886	19,903	19,970	19,905	19,908	19,922	19,930	19,930	19,909
<i>e0</i>				2,042	2,044	2,042	2,041	2,042	2,038	2,034	2,036	2,035	2,038	2,037	2,039
<i>Af</i>				18,134	17,977	17,982	17,980	17,956	18,014	18,021	17,991	18,051	18,101	18,182	18,035
<i>ef</i>				1,886	1,881	1,880	1,879	1,882	1,885	1,883	1,880	1,883	1,887	1,889	1,883
RTG4	80,00														
<i>A0</i>				19,967	19,962	19,954	19,957	19,946	19,950	19,938	19,929	19,934	19,922	19,906	19,942
<i>e0</i>				2,041	2,040	2,034	2,037	2,038	2,040	2,040	2,037	2,038	2,042	2,045	2,039
<i>Af</i>				18,270	18,089	18,089	18,045	17,996	18,049	17,985	17,953	18,014	18,044	18,137	18,061
<i>ef</i>				1,895	1,891	1,892	1,883	1,882	1,887	1,879	1,878	1,885	1,885	1,891	1,886
RTG5	80,00														
<i>A0</i>				19,958	19,955	19,958	19,954	19,950	19,945	19,959	19,941	19,939	19,976	19,909	19,949
<i>e0</i>				2,044	2,046	2,047	2,083	2,050	2,045	2,050	2,046	2,052	2,042	2,041	2,050
<i>Af</i>				18,238	18,103	18,097	18,085	17,994	18,043	18,024	18,041	18,069	18,108	18,173	18,089
<i>ef</i>				1,896	1,894	1,891	1,882	1,882	1,887	1,876	1,882	1,885	1,888	1,894	1,887

Tabla C.10- Medidas tomadas en probetas transversales Trip800, tanto iniciales como finales.

RTG1	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,903			18,039	96,390	1,117	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,903			18,039	1,884	1,229	ESPESOR	MANUAL
e0	2,041						ESPESOR	
RTG2	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,927			18,050	96,480	1,119	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,927			18,050	1,888	1,262	ESPESOR	MANUAL
e0	2,042						ESPESOR	
RTG3	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,909			18,035	96,660	1,095	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,909			18,035	1,883	1,242	ESPESOR	MANUAL
e0	2,039						ESPESOR	
RTG4	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,942			18,061	96,560	1,112	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,942			18,061	1,886	1,270	ESPESOR	MANUAL
e0	2,039						ESPESOR	
RTG5	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,949			18,089	96,790	1,056	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,949			18,089	1,887	1,181	ESPESOR	MANUAL
e0	2,050						ESPESOR	

Tabla C.11-Tabla para cálculo de r manual, tanto de anchura como de espesor, para probetas orientadas transversalmente.

C.2.3-Probetas a 45° Trip800.

<i>OT</i>		<i>ERRES a 45°</i>												
<i>L0</i>	<i>LF</i>	<i>A%</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>Prom</i>
R45G1	80,00													
<i>A0</i>			19,869	19,877	19,890	19,904	19,907	19,896	19,898	19,905	19,919	19,926	19,935	19,902
<i>e0</i>			2,060	2,061	2,061	2,060	2,064	2,062	2,062	2,062	2,068	2,059	2,065	2,062
<i>Af</i>			18,322	18,162	18,109	18,132	18,115	18,090	18,152	18,169	18,223	18,270	18,420	18,197
<i>ef</i>			1,884	1,881	1,874	1,879	1,874	1,870	1,873	1,877	1,879	1,884	1,890	1,879
R45G2	80,00													
<i>A0</i>			19,932	19,928	19,921	19,946	19,925	19,922	19,904	19,896	19,890	19,886	19,901	19,914
<i>e0</i>			2,053	2,060	2,057	2,058	2,061	2,056	2,060	2,057	2,056	2,064	2,060	2,058
<i>Af</i>			18,427	18,276	18,205	18,182	18,170	18,204	18,125	18,112	18,126	18,219	18,300	18,213
<i>ef</i>			1,889	1,885	1,879	1,879	1,873	1,870	1,874	1,868	1,875	1,884	1,889	1,879
R45G3	80,00													
<i>A0</i>			19,895	19,872	19,875	19,889	19,885	19,902	19,904	19,907	19,912	19,925	19,938	19,900
<i>e0</i>			2,059	2,060	2,063	2,056	2,053	2,058	2,059	2,058	2,050	2,052	2,052	2,056
<i>Af</i>			18,271	18,203	18,133	18,127	18,096	18,083	18,150	18,188	18,215	18,321	18,478	18,206
<i>ef</i>			1,884	1,880	1,875	1,876	1,872	1,871	1,869	1,877	1,878	1,882	1,891	1,878
R45G4	80,00													
<i>A0</i>			19,940	19,938	19,941	19,929	19,928	19,918	19,907	19,904	19,898	19,889	19,886	19,916
<i>e0</i>			2,064	2,066	2,071	2,063	2,065	2,068	2,065	2,068	2,066	2,063	2,062	2,066
<i>Af</i>			18,440	18,291	18,294	18,196	18,161	18,083	18,088	18,111	18,121	18,185	18,300	18,198
<i>ef</i>			1,893	1,881	1,886	1,879	1,887	1,869	1,870	1,872	1,877	1,882	1,886	1,880
R45G5	80,00													
<i>A0</i>			19,905	19,908	19,904	19,916	19,916	19,921	19,931	19,945	19,948	19,957	19,962	19,928
<i>e0</i>			2,063	2,071	2,066	2,061	2,064	2,063	2,063	2,061	2,067	2,061	2,059	2,064
<i>Af</i>			18,291	18,162	18,137	18,121	18,125	18,131	18,166	18,151	18,174	18,231	18,400	18,190
<i>ef</i>			1,884	1,877	1,877	1,875	1,873	1,876	1,874	1,874	1,873	1,883	1,887	1,878

Tabla C.12- Medidas tomadas en probetas orientadas a 45° de Trip800, tanto iniciales como finales.

R45G1	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,902			18,197	96,230	0,941	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,902			18,197	1,879	0,964	ESPESOR	MANUAL
e0	2,062						ESPESOR	
R45G2	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,914			18,213	95,910	0,970	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,914			18,213	1,879	0,981	ESPESOR	MANUAL
e0	2,058						ESPESOR	
R45G3	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,900			18,206	96,180	0,934	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,900			18,206	1,878	0,982	ESPESOR	MANUAL
e0	2,056						ESPESOR	
R45G4	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,916			18,198	96,100	0,968	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,916			18,198	1,880	0,956	ESPESOR	MANUAL
e0	2,066						ESPESOR	
R45G5	A0	Def1	Def2	Af	Lf	Coef. R		
A_MAN	19,928			18,190	96,570	0,941	ANCHURA	MANUAL
E_MAN	19,928			18,190	1,878	0,966	ESPESOR	MANUAL
e0	2,064						ESPESOR	

Tabla C.13-Tabla para cálculo de r manual, tanto de anchura como de espesor, para probetas orientadas a 45°.

C.14-Tabla resultados coeficiente r para Trip800.

	<i>R promig amplada</i>	<i>R promig espesor</i>	<i>R instantanea</i>	<i>def verdadera longitudinal</i>	<i>def verdadera transversal</i>
<i>probeta RLG1</i>	0,93628	0,93364	1,07556	0,19268	0,09077
<i>probeta RLG2</i>	0,86538	0,99963	0,94866	0,19258	0,08571
<i>probeta RLG3</i>	0,86079	0,96875	0,89646	0,19247	0,08339
<i>probeta RLG4</i>	0,87598	0,94957	0,94594	0,19238	0,08551
<i>probeta RLG5</i>	0,91804	1,00079	0,94122	0,19252	0,08537
<i>Promedio</i>			0,94527		
<i>Desviación</i>			0,06719		

	<i>R promig amplada</i>	<i>R promig espesor</i>	<i>R instantanea</i>	<i>def verdadera longitudinal</i>	<i>def verdadera transversal</i>
<i>probeta RTG1</i>	1,11691	1,22852	1,07620	0,19244	0,09070
<i>probeta RTG2</i>	1,11938	1,26167	1,05122	0,19250	0,08979
<i>probeta RTG3</i>	1,09458	1,24203	1,04996	0,19234	0,08967
<i>probeta RTG4</i>	1,11237	1,27015	1,04541	0,19259	0,08960
<i>probeta RTG5</i>	1,05649	1,18133	1,18790	0,19266	0,09469
<i>Promedio</i>			1,04886		
<i>Desviación</i>			0,06034		

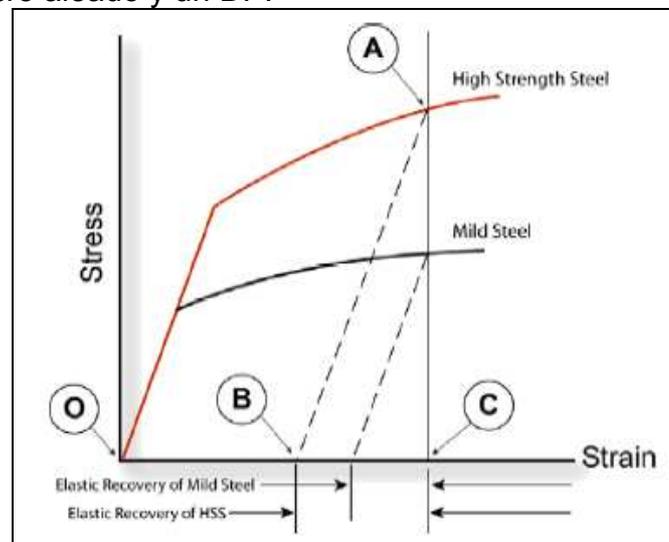
	<i>R promig amplada</i>	<i>R promig espesor</i>	<i>R instantanea</i>	<i>def verdadera longitudinal</i>	<i>def verdadera transversal</i>
<i>probeta R45G1</i>	0,941	0,96370	1,03445	0,19224	0,08904
<i>probeta R45G2</i>	0,96950	0,98123	0,97758	0,19252	0,08689
<i>probeta R45G3</i>	0,93429	0,98248	1,00293	0,19236	0,08785
<i>probeta R45G4</i>	0,96845	0,95621	0,99179	0,19251	0,08747
<i>probeta R45G5</i>	0,94088	0,96628	0,92010	0,19241	0,08441
<i>Promedio</i>			0,99077		
<i>Desviación</i>			0,04207		

Tabla C.14-Tabla resultados finales coeficiente anisotropía para las distintas orientaciones de Trip800. Las columnas R promedio anchura y R promedio espesor son las calculadas a partir de la probeta física, y pese a no tener tanta exactitud como los datos cogidos por el video extensómetro, sirven de comprobación para ver que los resultados obtenidos tienen sentido. Las probetas subrayadas en rojo son las que se han descartado para hacer los cálculos, puesto que de cinco iniciales solamente se han escogido 3 para cada orientación.

C-Anexo IV, fundamentos teóricos

C.1-Problemas en el conformado: “SPRING-BACK”[2.1]

La desviación dimensional originada por la recuperación de la deformación elástica asociada a una deformación plástica, fenómeno conocido como recuperación elástica o ‘spring-back’. Debido a las elevadas tensiones necesarias para deformar plásticamente aceros AHSS esta recuperación es mucho más acusada que en los aceros de alta resistencia convencionales (ver figura 1.1(a)). Más aún, esta deformación no es homogénea, lo que genera importantes e impredecibles deformaciones en la pieza conformada. En la figura 1.1(b) se muestra un ejemplo de este problema de recuperación elástica en un acero micro aleado y un DP.



(a)



(b)

Figura 1.1: (a) Descripción de la recuperación elástica y comparación entre un acero AHSS y un acero de chapa convencional. Para un mismo nivel de deformación plástica (puntos A y C) la deformación final en un acero AHSS (punto B) es mayor que un acero convencional. (b) Recuperación elástica en un acero DP y un acero micro aleado (HSLA)

Las soluciones actuales para reducir la recuperación elástica se basan en el empleo de radios de matriz pequeños, la disminución de juegos (incluso <0), 'coining'/'striking' radio (juego localmente <0), las altas fuerzas de pisado, el correcto diseño de frenos, el empleo de herramientas de calibración, las modificaciones en el diseño de las piezas (buñas, rigidizadores, etc.), la utilización de utillaje con ángulos compensados, 'over-bending', etc.

Además la utilización de software de simulación por elementos finitos es una herramienta más en el control de este fenómeno, aunque los resultados actuales no permiten diseñar el utillaje sólo mediante simulación, haciéndose inevitable la construcción de matrices de prueba. Sin duda, la generación de modelos fiables de predicción de recuperación elástica supondría una destacada novedad tecnológica y permitirían fabricar con menor coste y plazo de entrega piezas con geometrías complejas.

C.2-Conformado de chapa[A.4.1]

El conformado de chapa metálica es el proceso de convertir una chapa plana en una pieza con una forma deseada sin que ocurra rotura o adelgazamiento excesivo localizado. El conformado de chapa puede ser un proceso tan sencillo como doblar o puede llegar tener una serie de etapas complejas. Para conformar chapa es de práctica común, sujetar los bordes de la chapa mediante un aro pisador y luego se deforma mediante un punzón y una matriz. Si el aro pisador evita que la chapa fluya al interior de la matriz el conformado es por estirado ("stretch forming"), pero si en cambio la chapa puede deslizarse al interior el conformado es por embutición profunda ("deep-drawing").

Las operaciones de conformado de chapa pueden ser complejas pero pueden describirse como una combinación de operaciones básicas: el doblado, el estirado, el estirado mediante deformación plana, el acuñado y el embutido. Un ejemplo de doblado es el engatillado ("hemming") utilizado para unir dos chapas, una exterior y una interior, en donde el extremo que sobresale de la chapa exterior es doblado para sujetar ambas chapas mediante engatillado. El estirado se refiere un estado de tensiones biaxial en donde las fuerzas en ambos ejes (del plano de la chapa) son equivalentes. Con el estirado se logra

la mayor deformación de los tipos de operaciones de conformado. En cambio el estirado mediante deformación plana provoca una deformación en un solo eje y suele ocurrir durante la tracción de lados planos y largos. El embutido causa tracción en una dirección de la chapa y compresión en la dirección perpendicular. Un ejemplo es la embutición de copa utilizando un pisador, una matriz y un punzón. En el acuñado la chapa es adelgazada mediante la compresión entre dos matrices, como cuando se fabrican monedas.

Los problemas durante el conformado de chapa se pueden clasificar como: rotura, ondulaciones y arrugas, distorsión de forma (recuperación elástica), material no deformado y acabados superficiales no deseados.

C.2.1- Evaluación de conformabilidad en chapas planas

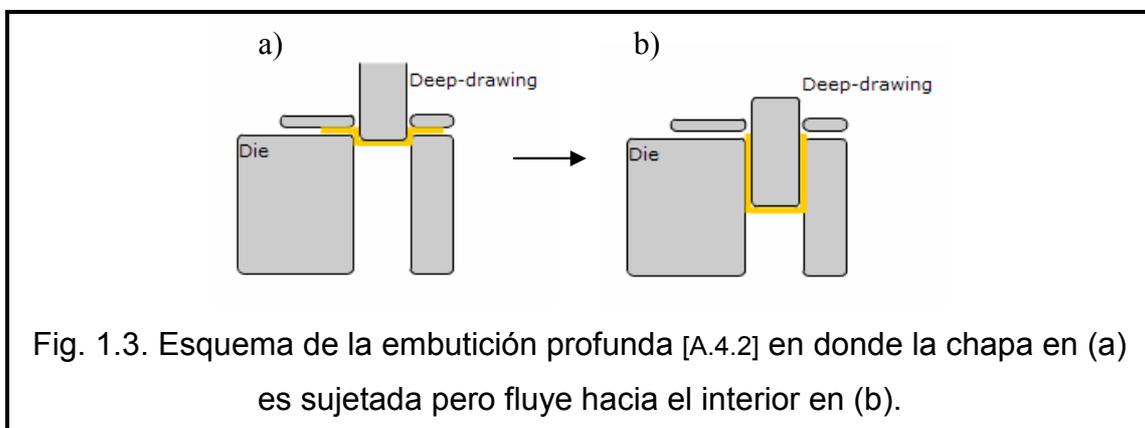
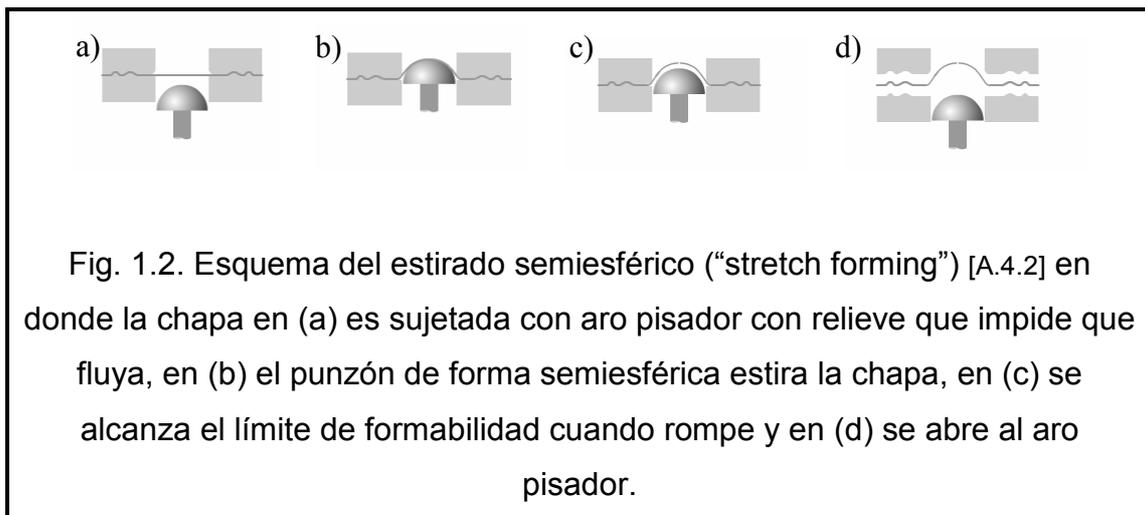
La conformabilidad generalmente se determina por medio de ensayos de tracción y de ensayos que simulan la conformación:

- Ensayo de tracción uní axial con probetas extraídas a 45°, longitudinales y transversales respecto el sentido de laminación.
- Ensayos que simulan el estiramiento sufrido por el material en los útiles (Fig. 1.2), tipo Erichssen, Nakazima , Bulge Test o LDH (Limiting Dome Height), consistentes en deformar la chapa mediante la acción de un punzón semiesférico,
- Ensayos que simulan los esfuerzos originados durante la embutición (Fig. 1.3), como el ensayo de embutición de la copa (Swift Cup Test), que simula los esfuerzos combinados de tracción radial y compresión tangencial a los que está sometido el material de las paredes de la copa cilíndrica resultante. Este ensayo permite obtener el Limiting Draw Ratio, LDR, el máximo porcentaje de reducción del material sin que éste se rompa, el

cual es el cociente entre el diámetro máximo que puede ser embutido exitosamente, D , con un punzón de diámetro d .

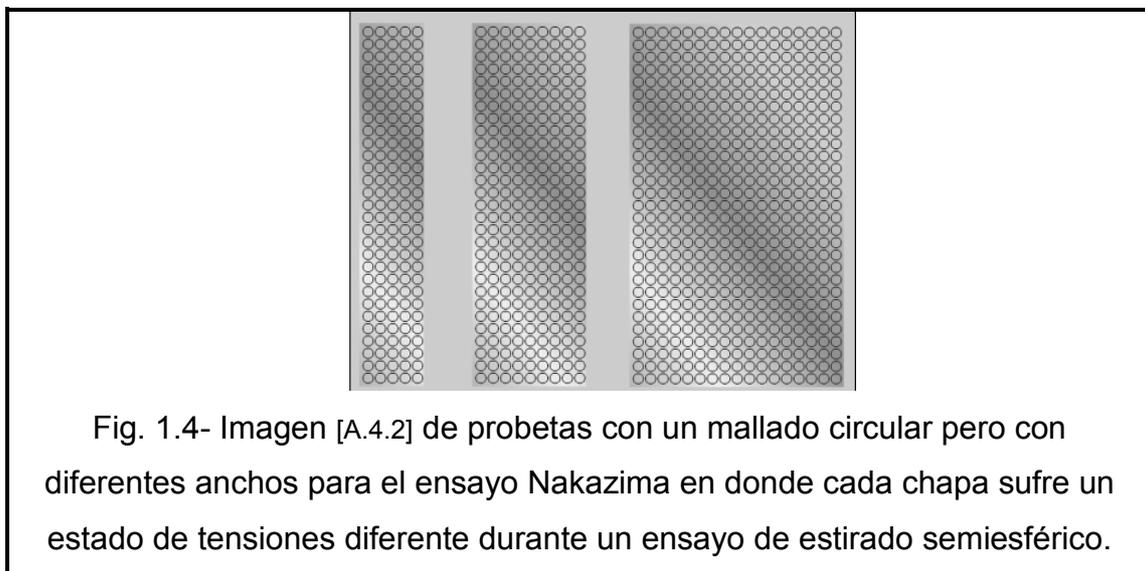
$$LDM = \frac{D}{d}$$

Existen otros ensayos para determinar distintas características del material como el Hole Expansion Test, etc. Ningún ensayo por si solo puede llegar a caracterizar por completo la conformabilidad de una chapa, por eso se suele utilizar una combinación de ensayos y formas de probeta. La conformabilidad un determinado material esta influenciado en gran medida por el proceso de conformado (como por ejemplo el estirado, la embutición profunda, etc.) y el espesor de la chapa [A.4.2].



C.2.2-Diagramas límite de formabilidad (FLD) [A.4.1]

Los diagramas límite de formabilidad (“Forming Limit Diagrams o FLD”) indican la cantidad de deformación que una chapa puede soportar en las dos direcciones del plano, representada por una deformación mayor (también llamada “major strain”) en el eje de las ordenadas y una deformación menor (también llamada “minor strain”) en eje de las abscisas. La deformación mayor e_1 es siempre de signo positivo y debe ser mayor que la deformación menor e_2 . La deformación mayor, en un ensayo de tracción, coincide con la dirección de alargamiento. La deformación menor, e_2 , puede adoptar valores positivos o negativos dependiendo del régimen de tensiones. Un método para determinar e_1 y e_2 es mediante un análisis de un mallado circular grabado electrolíticamente en la chapa metálica antes del ensayo (de tracción, Ericksen, Nakazima, Bulge Test o LDH, u otros). La Fig. 1.4 muestra diferentes anchos de probetas malladas del ensayo Nakazima para simular diferentes estados tensionales. A medida que el ensayo avanza se puede ir siguiendo el cambio de dimensiones en los diámetros de los ejes e_1 y e_2 .



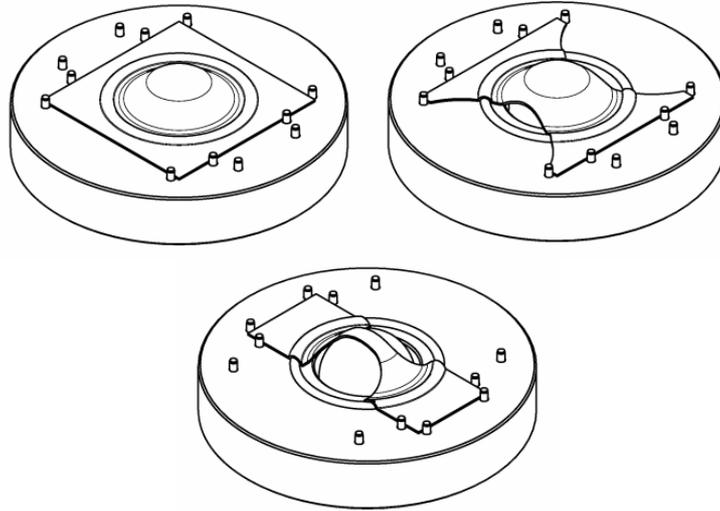


Fig. 1.5. Ensayo Nakazima en donde cada chapa sufre un estado de tensiones diferente durante un ensayo de estirado semiesférico.

En el ensayo Nakazima, probetas de diferentes anchos son ensayadas por estirado con un punzón semiesférico, lo cual produce diferentes estados tensionales en cada probeta (Fig. 1.5) y consecuentemente el diámetro en el eje e_1 siempre aumenta mientras el diámetro en el eje e_2 puede aumentar o disminuir. El ensayo de estirado debe acabar cuando la chapa rompa en la punta del punzón (Fig. 1.6), si la chapa se sujetó correctamente. Se debe medir las dimensiones finales de los círculos más próximos a la zona de rotura, sus dimensiones en e_1 y e_2 se grafican para formar un diagrama limite de formabilidad FLD, como muestra la Fig. 1.7. La curva continua en la Fig. 1.7 marca la curva límite de formabilidad (FLC) y la curva discontinua a 10% menos delimita la zona que se debe evitar durante los procesos de conformado. Las chapas, con el mismo espesor que el correspondiente FLD, se podrán conformar por estirado de manera segura si no superan la curva del 10% de la FLC.

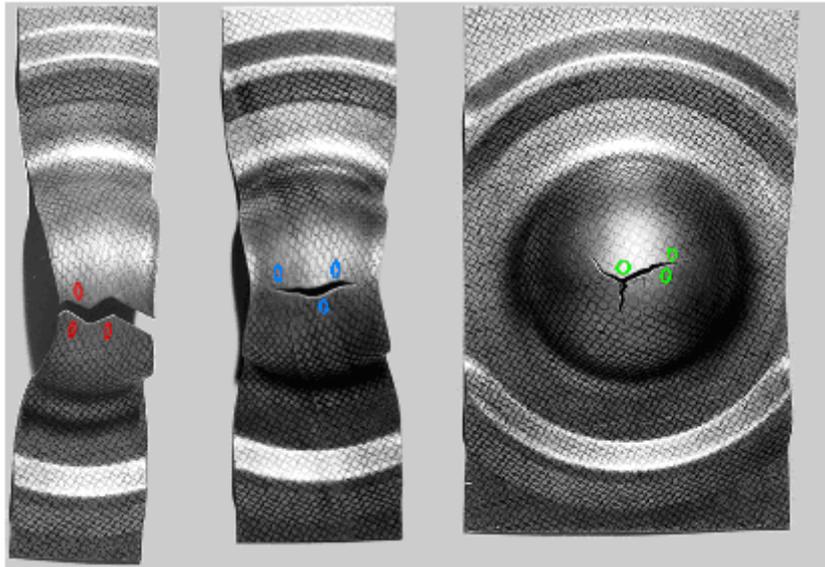


Fig. 1.6. Imagen [A.4.2] de diferentes probetas ya rotas del ensayo Nakazima en donde cada chapa ha sufrido un estado de tensiones diferente durante un ensayo de estirado semiesférico. Se debe medir los diámetros de los círculos próximos a la rotura.

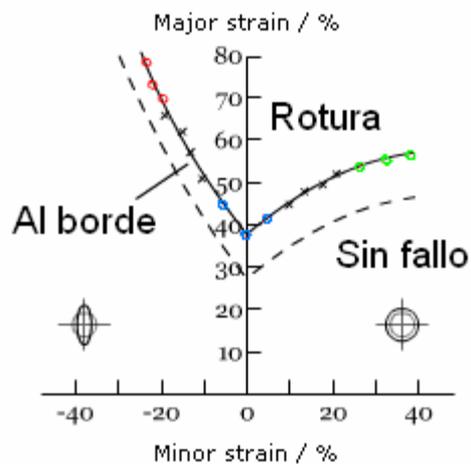


Fig. 1.7-. Ejemplo de un diagrama [A.4.2] límite de formabilidad FLD. Los círculos en color corresponden a las medidas de las deformaciones mayores

e_1 y deformaciones menores e_2 extraídas en el borde de la rotura de las probetas mostradas en la Fig. 1.5.

Actualmente existen diversos sistemas informáticos que permiten una mayor fiabilidad y precisión en el registro de las deformaciones e_1 y e_2 . Mediante cámaras que registran la deformación superficial de puntos de pintura atomizada (en vez de círculos grabados electrolíticamente) se puede seguir el progreso durante un ensayo de estirado semiesférico. De esta manera se ha llegado a saber que el camino desde el punto (0,0) hasta un punto en la FLC no necesariamente es un camino recto.

Existen un parámetro del material de los estudiados que se ha podido relacionar con la FLC: el exponente de endurecimiento por deformación n .

En cambio, el coeficiente de anisotropía r ("anisotropy factor") esta mejor relacionado con la embutición profunda ("deep-drawing").

C.2.3- Exponente de endurecimiento por deformación

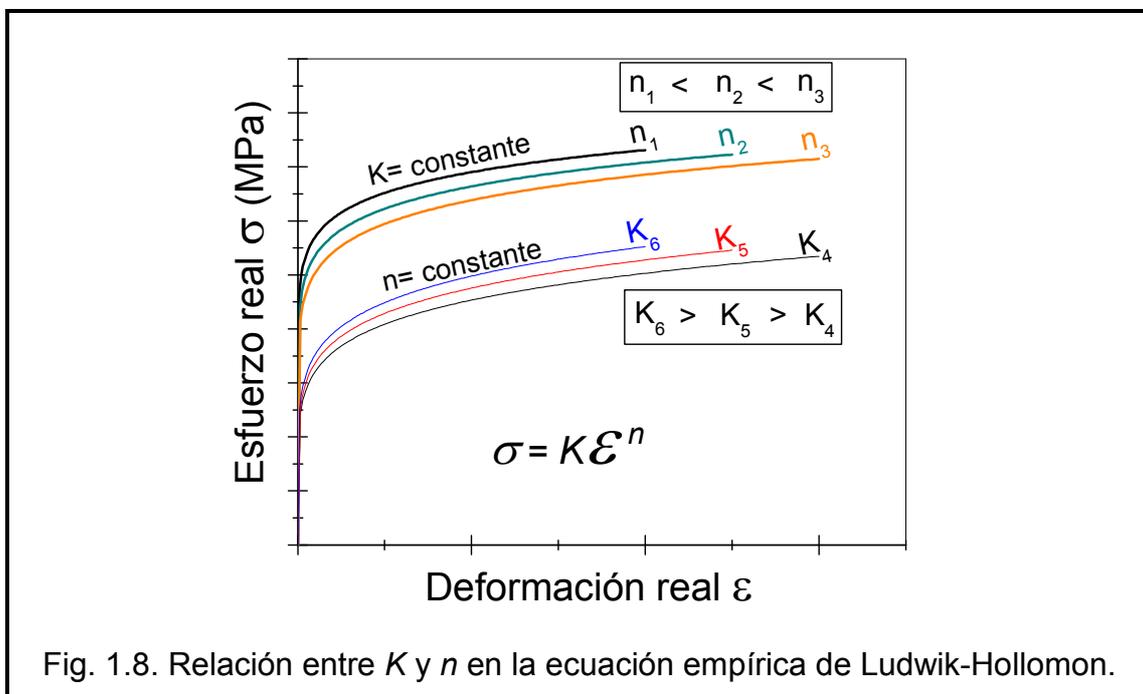
La ecuación empírica de Ludwik-Hollomon [A.4.3, A.4.4] permite describir el comportamiento esfuerzo real-deformación real de algunos materiales durante un ensayo de tracción.

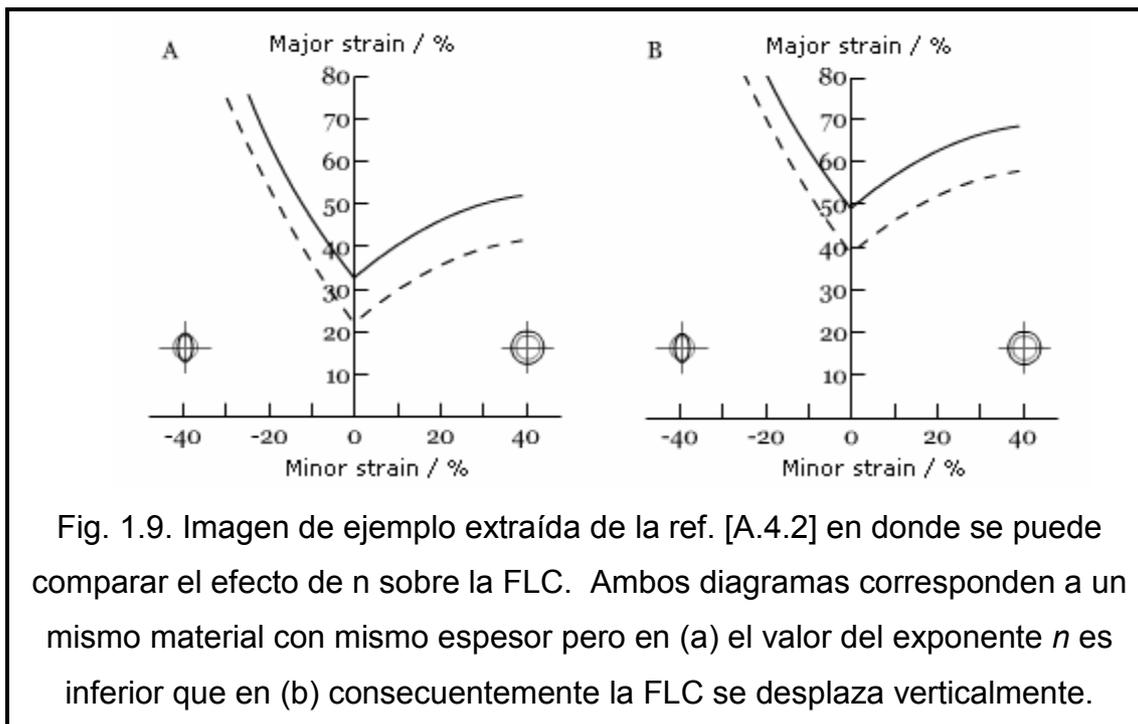
En la ecuación de Ludwik-Hollomon el esfuerzo real σ se describe en términos de la deformación real ε de manera que

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1.1)$$

Donde K es el coeficiente de endurecimiento y n es el exponente de endurecimiento por deformación. La Fig. 1.8 muestra como varía la forma de la curva a medida que el valor del exponente n cambia, para un valor constante

de K . Cuanto mayor es n menor capacidad de endurecimiento por deformación ($\sigma_{\max} - \sigma_y$) tiene el material. El valor de n es el menor valor teórico que puede adoptar la FLC en su intercepto con el eje de las ordenadas ($e_2 = 0$), en el caso de una chapa de espesor cercano a cero. Cuanto mayor es el valor de n para un espesor dado de chapa, más incrementa verticalmente la FLC (ver la Fig. 1.9). De igual manera, para un valor constante de n , cuanto mayor es el espesor de la chapa más incrementa verticalmente la FLC. Sin embargo la forma de la FLC se mantiene similar.





En los aceros de bajo carbono [A.4.5], el incremento de la FLC, a medida que aumenta el valor de n , se detiene o satura cuando el valor de n es de 0,2. Así mismo, el incremento de la FLC, a medida que aumenta el espesor de la chapa se detiene cuando la chapa tiene aproximadamente 3mm en los aceros de bajo carbono.

Como el exponente de endurecimiento n y el coeficiente K forman parte de la misma ecuación, se puede observar que un aumento de la resistencia máxima del material, es decir un mayor valor de K para una n constante (Fig. 1.8), tiene el efecto de desplazar verticalmente hacia abajo la FLC.

C.2.4-Coeficiente de Anisotropía del material

El coeficiente de anisotropía r esta más relacionado con la embutición profunda, es decir cuando se permite que la chapa se deslice entre el pisador y la matriz y se introduce mediante la acción del punzón. El coeficiente de anisotropía r es una medida de la resistencia de una chapa a adelgazarse. En

una probeta plana (Fig. 1.10), el coeficiente de anisotropía r es la relación entre la deformación real en el ancho ε_W sobre la deformación real en el espesor ε_t de manera que

$$r = \frac{\varepsilon_W}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{W}{W_0}\right)}{\ln\left(\frac{L_0 W_0}{L W}\right)}. \quad (1.2)$$

Donde W y L son el ancho y longitud calibrada durante el ensayo de tracción hasta la resistencia máxima. Como indica la Fig. 1.10, W_0 y L_0 son el ancho y longitud iniciales. La anterior ecuación permite observar la variación del valor de r durante la deformación hasta antes de la estricción. Durante la embutición profunda conviene que el valor r sea alto. Sin embargo el valor de r varía dependiendo del ángulo respecto a la dirección de laminación de la chapa (Fig. 1.11), entonces para tomar en cuenta esta variación se debe determinar la anisotropía normal, \bar{r} , y la anisotropía plana, Δr . Es necesario extraer probetas a 0° , 45° y 90° con respecto a la dirección de laminación (Fig. 1.11) para calcular el valor de r en estos ángulos, es decir, r_0 , r_{45} y r_{90} respectivamente. La anisotropía normal se define como

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}. \quad (1.3)$$

Y la anisotropía plana se define como

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2}. \quad (1.4)$$

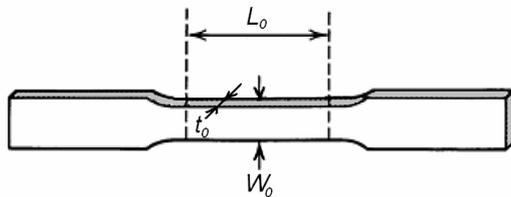


Fig. 1.10. Dimensiones en una probeta plana para ensayo de tracción.

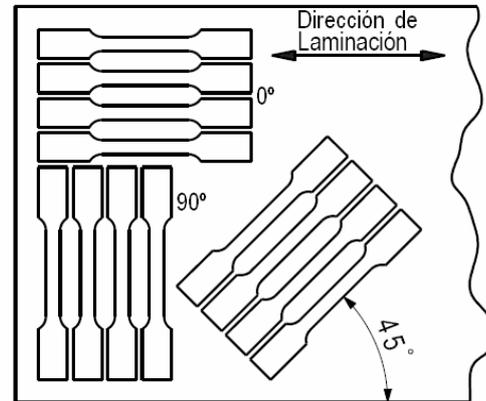
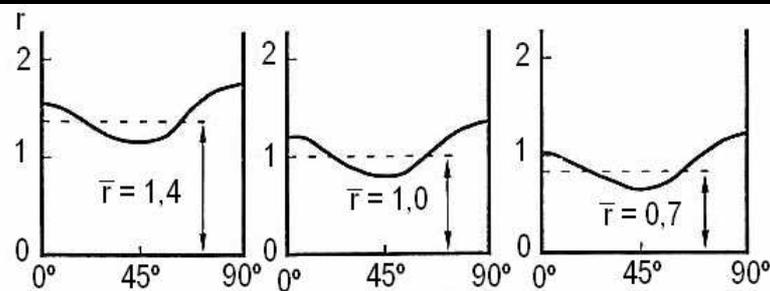
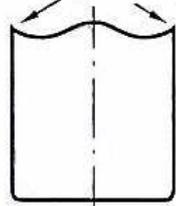


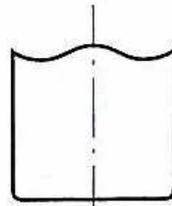
Fig. 1.11. Disposición de probetas respecto a la dirección de laminación.



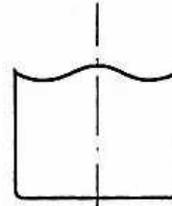
Formación de Orejas



Muy buena conformabilidad



Buena conformabilidad



Poca conformabilidad

Fig. 1.12. Efecto de la anisotropía normal \bar{r} en la conformabilidad para un valor positivo de anisotropía plana Δr [A.4.6].

La anisotropía normal \bar{r} está relacionada con la profundidad de embutido que se puede alcanzar satisfactoriamente, en cambio la anisotropía plana Δr está relacionada con la formación de orejas. La Fig. 1.12 muestra la embutición profunda de tres copas a partir de tres chapas cuya anisotropía normal \bar{r} es diferente pero cuya anisotropía plana es positiva. Cuanto mayor es \bar{r} mayor es la profundidad de la copa. Las orejas son irregularidades en la altura de las copas y el sitio de su aparición depende del valor positivo o negativo de la anisotropía plana Δr . En el primero de los casos ($\Delta r > 0$) aparecerán orejas a 0° y a 90° con respecto a la dirección de laminación (ver ángulos en chapa de Fig. 1.11). En el segundo caso ($\Delta r < 0$) aparecerán orejas a 45° con respecto a la dirección de laminación. Una combinación de altos valores de anisotropía normal \bar{r} y valores cercanos a cero de anisotropía plana Δr ofrecen un embutido óptimo con profundidades mayores y menos formación de orejas

A nivel de orientación cristalina de los granos, tanto para estructuras cristalinas fcc como bcc, los valores más altos de anisotropía r se obtienen cuando la textura cristalina es tal que los planos $\{111\}$ están orientados en la dirección de laminación.

C.3.- Fundamentos teóricos de las propiedades mecánicas de los materiales

C.3.1-conceptos de tensión y deformación[A.4.7]

Tensión. Consideremos una varilla cilíndrica de longitud l_0 y una sección transversal de área A_0 sometida a una fuerza de tensión uní axial F , como se muestra en la figura 3.1.

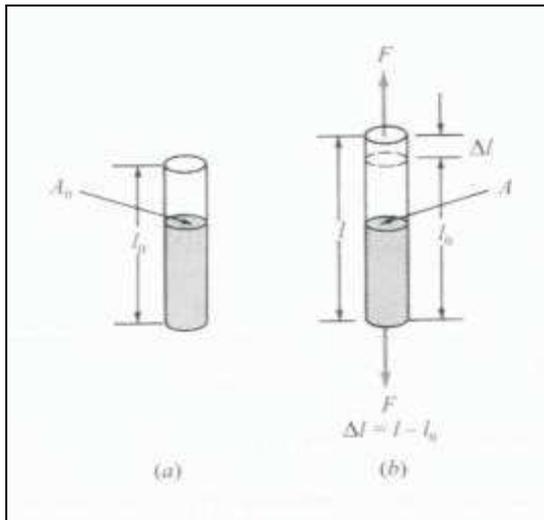


Fig. 3.1- a) Barra antes de aplicarle la fuerza b) Barra sometida a una fuerza de tensión uní axial F que alarga la barra de longitud (l_0) a (l).

Por definición, la tensión s en la barra es igual al cociente entre la fuerza de tensión uní axial media F y la sección transversal original A_0 de la barra.

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (3.1)$$

Deformación o alargamiento: Cuando se aplica a una barra una fuerza de tensión uní axial, tal como se muestra en la figura 2, se produce una elongación de la varilla en la dirección de la fuerza. Tal desplazamiento se llama **deformación**. Por definición, la deformación originada por la acción de una fuerza de tensión uní axial sobre una muestra metálica, es el cociente entre el cambio de longitud de la muestra en la dirección de la fuerza y la longitud original.

$$\Delta l = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (3.2)$$

donde: l_f es la longitud después de la acción de la fuerza
 l_0 es la longitud inicial de la pieza

Como puede deducirse de la fórmula, la deformación es una magnitud adimensional. En la práctica, es común convertir la deformación en un porcentaje de deformación o porcentaje de elongación

$$\% \text{ deformación} = \text{deformación} \cdot 100\% = \% \text{ elongación}$$

C.3.2-Deformación elástica y plástica

Cuando una pieza se somete a una fuerza de tensión uniaxial, se produce una deformación del material. Si el material vuelve a sus dimensiones originales cuando la fuerza cesa se dice que el material ha sufrido una DEFORMACIÓN ELÁSTICA.

El número de deformaciones elásticas en un material es limitado ya que aquí los átomos del material son desplazados de su posición original, pero no hasta el extremo de que tomen nuevas posiciones fijas. Así cuando la fuerza cesa, los átomos vuelven a sus posiciones originales y el material adquiere su forma original.

Si el material es deformado hasta el punto que los átomos no pueden recuperar sus posiciones originales, se dice que ha experimentado una DEFORMACIÓN PLÁSTICA.

C.3.3-Ensayo de tensión y diagrama de tensión deformación

El ensayo de tensión se utiliza para evaluar varias propiedades mecánicas de los Materiales que son importantes en el diseño, dentro de las cuales se destaca la resistencia, en particular, de metales y aleaciones.

En este ensayo la muestra se deforma usualmente hasta la fractura incrementando gradualmente una tensión que se aplica uniaxialmente a lo largo del eje longitudinal de la muestra. Las muestras normalmente tienen sección transversal circular, aunque también se usan especímenes rectangulares.

Durante la tensión, la deformación se concentra en la región central más estrecha, la cual tiene una sección transversal uniforme a lo largo de su longitud. La muestra se sostiene por sus extremos en la máquina por medio de soportes o mordazas que a su vez someten la muestra a tensión a una velocidad constante. La máquina al mismo tiempo mide la carga aplicada instantáneamente y la elongación resultante (usando un extensómetro).

Un ensayo de tensión normalmente dura pocos minutos y es un ensayo destructivo, ya que la muestra es deformada permanentemente y usualmente fracturada.

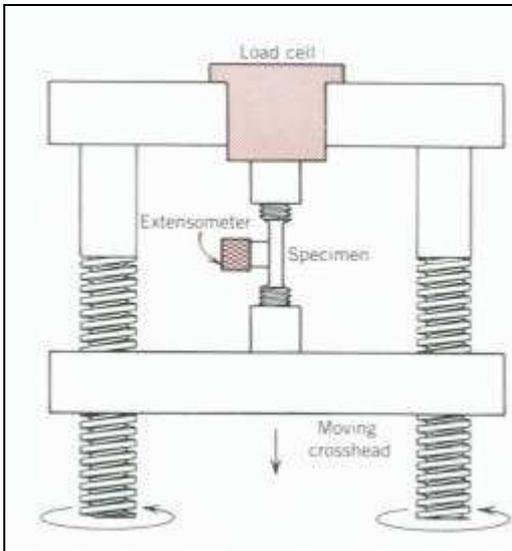


Figura 3.2- Ensayo tensión – deformación

Sobre un papel de registro, se consignan los datos de la fuerza (carga) aplicada a la muestra que está siendo ensayada así como la deformación que se puede obtener a partir de la señal de un extensómetro.

Los datos de la fuerza pueden convertirse en datos de tensión y así construirse una gráfica tensión – deformación, como la que se observa en la fig. 3.3.

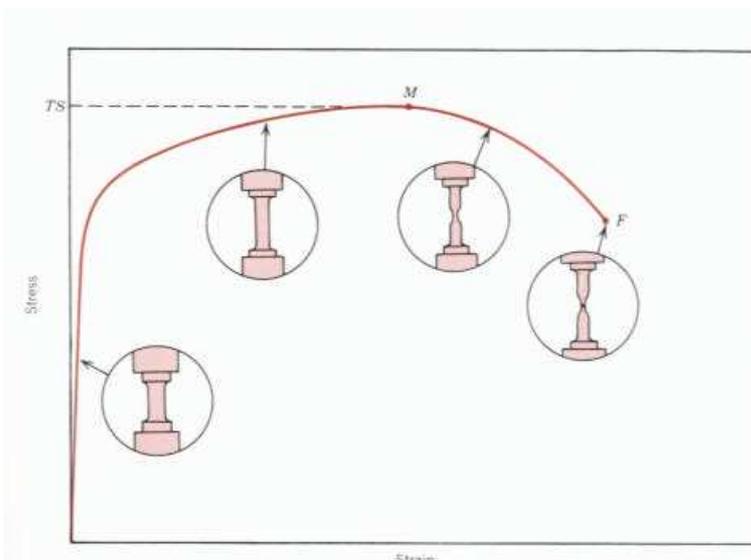


Fig.3.3-Gráfica típica tensión vs deformación

Las propiedades mecánicas que son de importancia en ingeniería y que pueden deducirse del ensayo tensión – deformación son las siguientes:

1. Módulo de elasticidad
2. Límite elástico a 0.2%
3. Resistencia máxima a la tensión
4. Porcentaje de elongación a la fractura
5. Porcentaje de reducción en el área de fractura

1. Módulo de elasticidad

En la primera parte del ensayo de tensión, el material se deforma **elásticamente**, o sea que si se elimina la carga sobre la muestra, volverá a su longitud inicial.

Para metales, la máxima deformación elástica es usualmente menor a un 0.5%. En general, los metales y aleaciones muestran una relación lineal entre la tensión y la deformación en la región elástica en un diagrama tensión – deformación que se describe mediante la ley de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

donde,

E es el módulo de elasticidad o módulo de Young

σ es el esfuerzo o tensión

ε es la deformación

El módulo de Young tiene una íntima relación con la fuerza de enlace entre los átomos en un material. Los materiales con un módulo elástico alto son relativamente rígidos y no se deforman fácilmente.

2. Límite elástico

Es la tensión a la cual un material muestra deformación plástica significativa. Debido a que no hay un punto definido en la curva de tensión – deformación donde acabe la deformación elástica y se presente la deformación plástica se elige el límite elástico cuando tiene lugar un 0.2% de deformación plástica.

El límite elástico al 0.2% también se denomina esfuerzo de fluencia convencional a 0.2%.

3. Resistencia máxima a la tensión

La resistencia máxima a la tensión es la tensión máxima alcanzada en la curva de tensión – deformación. Si la muestra desarrolla un decrecimiento localizado en su sección (un estrangulamiento de su sección antes de la rotura), la tensión decrecerá al aumentar la deformación hasta que ocurra la fractura puesto que la tensión se determina usando la sección inicial de la muestra. Mientras más dúctil sea el metal, mayor será el decrecimiento en la tensión en la curva tensión-deformación después de la tensión máxima.

La resistencia máxima a la tensión de un material se determina dibujando una línea horizontal desde el punto máximo de la curva tensión – deformación hasta el eje de las tensiones (punto TS en la fig.4.3). La tensión a la que la línea intercepta al eje de tensión se denomina *resistencia máxima a la tensión*, o a veces simplemente resistencia a la tensión o tensión de fractura.

4. Porcentaje de elongación (estiramiento)

La cantidad de elongación que presenta una muestra bajo tensión durante un ensayo proporciona un valor de la ductilidad de un material.

La ductilidad de los materiales comúnmente se expresa como porcentaje de la elongación, comenzando con una longitud de calibración usualmente de 50 mm. En general, a mayor ductilidad (más deformable es el metal), mayor será el porcentaje de la elongación.

El porcentaje de elongación de una muestra después de la fractura puede medirse juntando la muestra fracturada y midiendo longitud final con un calibrador. El porcentaje de elongación puede calcularse mediante la ecuación

$$\% \text{ elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (3.4)$$

Este valor es importante en ingeniería no solo porque es una medida de la ductilidad del material, sino también porque da una idea acerca de la calidad del mismo. En caso de que haya porosidad o inclusiones en el material o si ha ocurrido algún daño por un sobrecalentamiento del mismo, el porcentaje de elongación de la muestra puede decrecer por debajo de lo normal.

C.3.4-Tensión real – deformación real

La tensión se calcula dividiendo la fuerza aplicada F sobre una muestra a la que se aplica un ensayo de tensión por el área inicial A₀. Puesto que el área de la sección de la muestra bajo el ensayo cambia continuamente durante el ensayo de tensión, el cálculo de esta no es preciso. Durante el ensayo de tensión, después de que ocurra el estrangulamiento de la muestra, la tensión decrece al aumentar la deformación, llegando a una tensión máxima en la curva de tensión – deformación. Por ello, una vez que comienza el

estrangulamiento durante el ensayo de tensión, la tensión real es mayor que tensión en ingeniería.

Es posible definir la tensión real y la deformación real como:

$$\text{Tensión real } \frac{F}{A_i} \quad (3.5)$$

Donde F es la fuerza uní axial media sobre la muestra de ensayo
Ai es el área de muestra de sección mínima en un instante

La deformación real se define como:

$$\varepsilon_{real} = \ln \frac{l_i}{l_o} \quad (3.6)$$

Si no ocurre cambio de volumen durante la deformación, o sea, si

$$A_i * l_i = A_o * l_o$$

Las tensiones y deformaciones reales están relacionadas con las nominales mediante:

$$\sigma_{real} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.8)$$