

# UNA CARACTERIZACIÓN ELASTOPLÁSTICA DE MATERIALES POLIMÉRICOS INYECTADOS EN PROCESO INDUSTRIAL PARA SIMULACIÓN ESTÁTICA ESTRUCTURAL

Puigoriol Forcada, J. M.

Reyes Pozo, G.

*Universidad Ramón Llull (URL). IQS School of Engineering.*

*Vía Augusta 390, 08017, Barcelona, España*

## Abstract

The Finite Element Method (FEM) represents an essential tool for product design. Improvements in the characterization of materials result in an increased correlation to the simulation-test results, an important factor in improving the development process.

A new strategy to feed is proposed, in a simple and effective way, the elastoplastic constitutive model with Von Mises isotropic hardening for a better response in static computer simulation for products made of polymers.

An evaluation of the mechanical behavior of selected materials representative of families used in automotive interior systems using samples cut from actual parts has been carried out. In this way, the decline of mechanical properties in the usual injection manufacturing process can be checked. The new characterization strategy uses this information found in physical testing.

Finally, an exercise to validate the new characterization proposal on a real Door Panel Module assembly (experimental correlation) is realized.

**Keywords:** *material constitutive models, FEM, elastoplastic analysis, industrial feasibility*

## Resumen

El Método de los Elementos Finitos (MEF) resulta una herramienta imprescindible para el diseño de producto. Mejoras en la caracterización de los materiales implican mayor bondad en la correlación de resultados simulación-ensayo, factor importante para mejorar el proceso de desarrollo.

De entre los modelos constitutivos existentes en los softwares basados en el MEF, se selecciona el modelo constitutivo elastoplástico con endurecimiento isotrópico de Von Mises, por ser uno de los más usados en el ejercicio industrial diario. Se plantea una nueva estrategia para alimentar este modelo, de forma simple y suficientemente efectiva, con el fin de obtener una mejor respuesta en simulaciones computacionales estáticas de productos fabricados con polímeros.

Sobre materiales seleccionados representativos de familias utilizadas en sistemas de interior de automóviles se ha procedido a evaluar su comportamiento mecánico mediante muestras recortadas de pieza real. De esta forma, se comprueba el descenso de las propiedades mecánicas en un contexto de inyección usual en proceso industrial. La nueva estrategia de caracterización utiliza esta información hallada en test físico.

Finalmente se realiza un ejercicio de validación de la nueva propuesta de caracterización sobre un conjunto real Módulo Panel Puerta (correlación experimental).

**Palabras claves:** *modelos constitutivos de materiales, M.E.F., cálculo elastoplástico, viabilidad industrial*

## 1. Introducción

La simulación numérica (CAE) resulta fundamental para reducir significativamente el tiempo total de desarrollo de producto. De entre los modelos implementados en los programas comerciales, el Modelo Elastoplástico de Endurecimiento Isotrópico es el más usado en industria, utilizándose también para diseño de producto con materiales plásticos. Sin embargo, en este caso existe un error aceptado en la praxis industrial. Se propone una mejora de uso de dicho modelo constitutivo.

Toda simulación debería alimentarse con datos empíricos de materiales, extraídos de test físico. No obstante, los valores obtenidos mediante probetas inyectadas de material en granza (probetas ideales), si se dispone de ellos, no representan fidedignamente el material de la pieza fabricada, debido a los distintos parámetros que participan en el proceso de inyección en ambos casos. Una solución que se adopta en la industria, cuando es posible, es la obtención de datos a partir de probetas recortadas de pieza física. Sin embargo, no se dispone de piezas inyectadas hasta fases finales de desarrollo, mientras que las simulaciones empiezan ya en etapas iniciales. Una posible solución es la generalización de datos extraídos de otros proyectos (piezas existentes) para mismos materiales.

En este estudio se establece un valor genérico de escalado de las curvas elastoplásticas a temperatura ambiente para dos familias de materiales poliméricos, con el fin de aplicarse en fases iniciales de desarrollo sobre las curvas ideales, cuando no se dispone aún de pieza física. Este valor genérico de caída se usa también para la estrategia de la nueva propuesta de caracterización.

En industria es muy habitual utilizar materiales de matriz polimérica sin ningún tipo de refuerzo en forma de fibra (corta o larga) o nanocargas. El alcance del estudio da respuesta a la caracterización para esta familia de termoplásticos Isotrópicos.

### 1.1. Modelos constitutivos para materiales plásticos

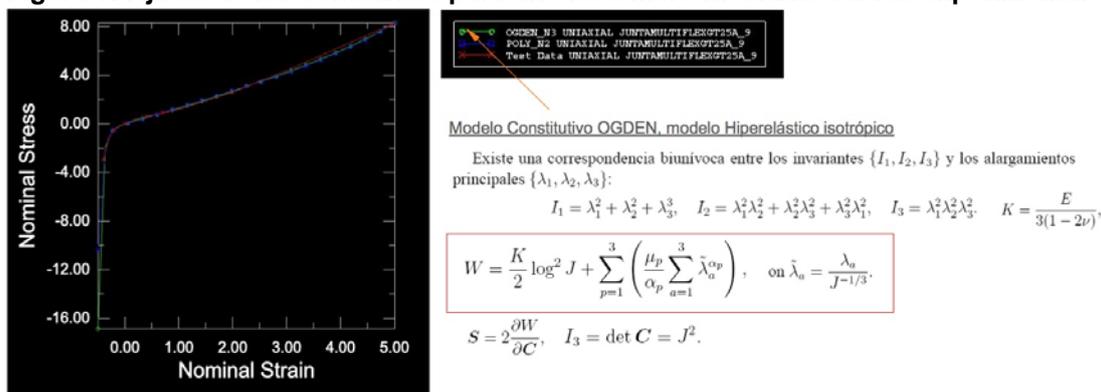
De entre todas las ecuaciones constitutivas disponibles en los códigos numéricos comerciales, los modelos lineales, los elastoplásticos, los hiperelásticos y los viscoelásticos son los más utilizados en el entorno industrial, para ingeniería de producto con polímeros.

El análisis lineal, basado en la ley constitutiva de Hooke (Hibbitt, Karlson, & Sorensen, 2010, 18.2.1, p.1-10), no puede dar respuesta de forma correcta para valores de tensión por encima del límite de fluencia. Esta característica delimita su uso a fases iniciales de diseño, para prever tendencias a escala global, o en todos aquellos casos donde el nivel de tensiones no supere el límite elástico.

Por lo que se refiere a los materiales con comportamiento viscoelástico, además de presentar una deformación elástica prácticamente instantánea, puede notarse un aumento sostenido de la deformación en el tiempo a tensión constante: *creep* o fluencia (Hibbitt, Karlson, & Sorensen, 2010, 18.7.1, p.1-8). Al desaparecer la tensión la parte elástica de la deformación se recupera, pero el material presenta una deformación remanente temporal. Si no hay recuperación total al cabo de un cierto tiempo se habla de comportamiento viscoelastoplástico (Beltran & Marcilla, 2003). Se clasifican entre lineales y no lineales. Estos modelos, aun pudiendo contemplar el carácter viscoso intrínseco de los polímeros, no suelen usarse por la complejidad que conlleva el cálculo de sus constantes en base a pruebas test, además del aumento considerable del tiempo computacional de cálculo asociado.

En los modelos hiperelásticos, la relación tensión-deformación no es lineal (Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, 2010, 18.5.1, p.1-25). Sus ecuaciones se trazan a partir del concepto energía de deformación (modelo Ogden, modelo polinomial, Blatz-Ko, etc.). Son modelos utilizados en el ámbito de grandes deformaciones, por lo que su uso no suele ser muy generalista.

**Figura 1: Ajuste de las constantes para un elastómero mediante curvas experimentales**



Nota: Coeficientes de Ogden omitidos debido a confidencialidad

Finalmente, para los materiales que presentan comportamiento elastoplástico (Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, 2010, 19.2.1, p.1-8), la deformación aumenta de forma relativamente rápida aun manteniendo la tensión constante, hasta alcanzar un valor de saturación. En este caso, al retirar la sollicitación se recupera la parte elástica de deformación, quedando una deformación remanente. Estos modelos suelen ser los más utilizados en el ejercicio industrial diario; permiten el análisis resistencial por encima del entorno elástico.

## 1.2. Modelo Elástoplástico de Endurecimiento Isotrópico. Praxis industrial

Este modelo incorpora la teoría de plasticidad mediante el uso de una superficie de fluencia de Von Mises con flujo plástico asociado de endurecimiento isotrópico (Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, 2010, 19.2.1, p.3).

Para un buen uso de este modelo es necesaria una buena definición del límite de fluencia y del módulo de Young (Vedia & Svoboda, 2002), así como de la curva elastoplástica en la zona por encima del límite de fluencia. Requiere también del coeficiente de Poisson.

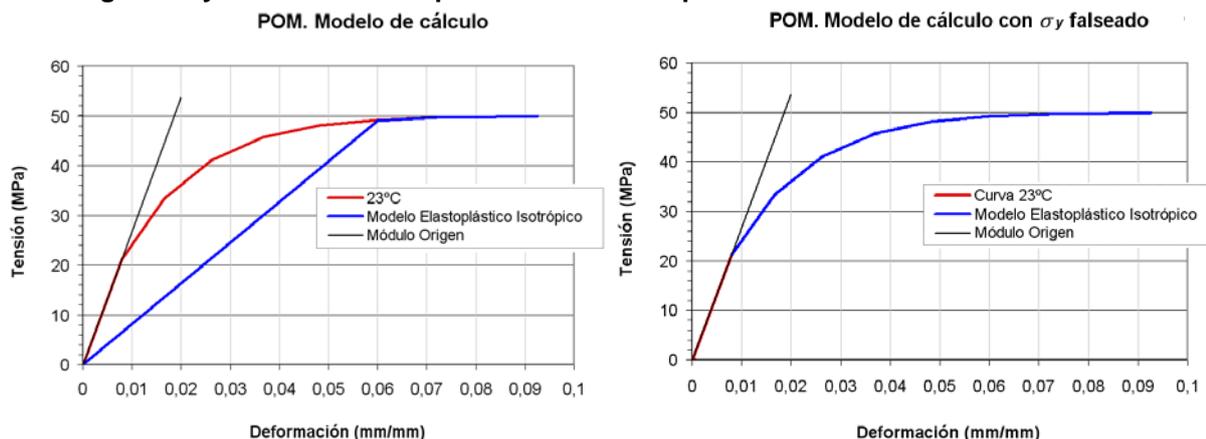
Este modelo solo puede combinarse, en la zona elástica, con el modelo elástico lineal. Se logra poder obtener las deformaciones remanentes una vez se realiza la descarga sobre la estructura calculada.

Como primera desventaja señalar la necesidad de resolución mediante métodos numéricos no lineales (NAFEMS, 1992), por lo que los tiempos computacionales aumentan significativamente. Sin embargo, la problemática más importante aparece cuando se usa para no metales. El modelo describe el comportamiento lineal a través de la curva trazada desde el origen hasta el límite de fluencia  $\sigma_y$ . Este módulo elástico puede llegar a ser muy distinto al calculado en el origen, para materiales plásticos. En el ejemplo (figura 2), el límite de fluencia real de 49 MPa es cercano al de rotura, por lo que el trazo lineal que caracteriza la zona elástica cae considerablemente (el valor baja de 2700 MPa hallado en el origen a un valor de 815 MPa calculado con el límite de fluencia). El modelo constitutivo elastoplástico de cálculo (curva azul) resulta muy pobre para este material en la zona elástica.

Para evitar la caída de pendiente se suele falsear el límite de fluencia hasta valores muy bajos, por lo que la definición del modelo resultante sigue en muy buena parte la curva del material (figura 3). Esta praxis está bastante extendida.

Así, se establece que el comportamiento del material es elastoplástico desde valores de tensión muy bajos. En concreto, para el material POM de ejemplo, se ha manipulado la tensión de fluencia de 49 MPa a 21MPa. Esto significa que el material debe responder, en muy buena parte, a un comportamiento basado en leyes plásticas mientras que en realidad el material sigue un comportamiento elástico, no lineal pero elástico hasta aproximadamente los 49MPa. Estas dos teorías son muy distintas, por lo que se está introduciendo un error significativo. Por ejemplo, se está aceptando que en la fluencia el material no presenta cambio volumétrico en el tensor deformación.

**Figuras 2 y 3: Modelo elastoplástico de cálculo para un material POM. Praxis industrial**



## 2. Propuesta de una nueva caracterización elastoplástica para materiales poliméricos

Tal como se ha realizado a lo largo de los años en la praxis industrial, resulta efectivo abordar el comportamiento elastoplástico de un material a partir de la teoría clásica de Von Mises de endurecimiento. Este modelo es muy adecuado cuando el límite de fluencia se presenta a deformaciones bajas (no muy superior al 0,5%), como sucede con los metales. Sin embargo, usarlo sin ninguna modificación para otro tipo de material, como es el caso de los polímeros, con  $\varepsilon_y$  medianamente altas puede conllevar errores significativos.

La estrategia de falsear dicho límite para obtener una curva más ajustada debe hacerse con prudencia. Para esta nueva propuesta se realizará teniendo en cuenta la disminución de propiedades de la curva debido al proceso de inyección de pieza real. No obstante, la propuesta aborda la situación de no disponer de piezas inyectadas, por lo que se debe estimar una caída de propiedades debido a la inyección.

Los parámetros más importantes que influyen en las propiedades mecánicas de un material durante el proceso de inyección son la presión y la velocidad de enfriamiento (Gordillo, 2000). En una inyección de pieza real, estos parámetros estarán sujetos a espesores de pieza (diseño general de ésta), temperatura de inyección por áreas, sistema de refrigeración, disposición de boquillas de inyección (caída de presión y temperatura), secuencia de frentes de llenado (líneas de unión frías o calientes), tensiones residuales, orientación de las cargas minerales, tipología de apertura de boquillas (global o secuencial), primera presión (variación en el tiempo) y segunda etapa de presión (y su tiempo de aplicación), homogeneidad en la refrigeración y otros parámetros.

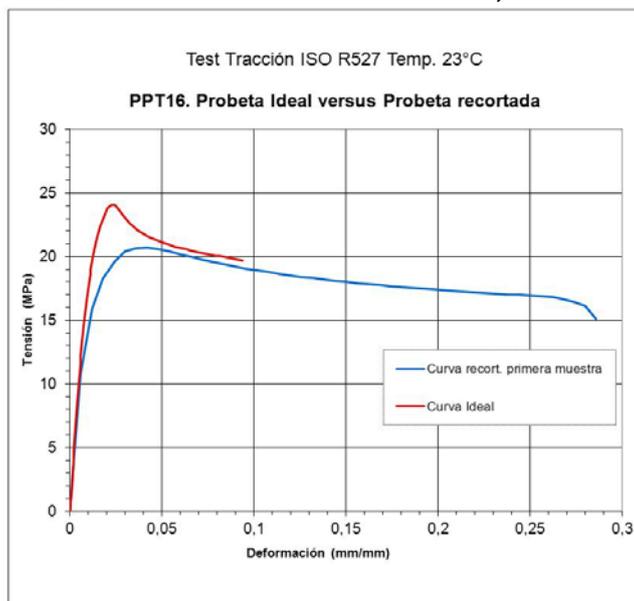
En cada pieza se equilibran estas variables y se diseña el molde. La combinatoria es muy alta. Evidentemente una investigación de estos parámetros, para estimar caída de propiedades, que no fuera simplificada resultaría altamente costosa. No obstante, si este ejercicio se realiza a pequeña escala, seleccionando 2 o 3 materiales, se cree que puede lograrse un primer valor orientativo. En principio, sin entrar en relaciones según variables y para una primera fase de estudio, se puede notar la disminución de propiedades de cada

material a partir de primeras piezas testeadas. Si además estos 2 o 3 materiales escogidos representan a las familias habitualmente usadas en un sector industrial (como puede ser el caso de sistemas de interior para automoción), esta estimación puede tener cierto carácter genérico para el citado sector.

Se muestra a continuación la propuesta de caracterización sobre un ejemplo de un material PPT16 (polipropileno con un 16% de talco). Para este material, la comparativa entre la curva ideal (extraída de probeta ideal) y la recortada (extraída de probeta de pieza, ésta no se dispondrá) presenta una disminución de 3,3 MPa de la tensión máxima (13% de disminución).

Para la caracterización se parte de la curva ideal (en rojo, figura 4). Esta curva se ha recibido del proveedor o se obtiene experimentalmente mediante probetas ideales (de proveedor o inyectando en molde a partir del material en granza). A partir de esta curva ideal debe obtenerse la curva estimada de cálculo, bajo la hipótesis que no se dispone de ningún dato de material recortado. El objetivo es lograr estimar la curva de cálculo lo más cercana a la curva azul trazada (curva solución correspondiente a probeta recortada de pieza, tensiones verdaderas).

**Figura 4: Curva ideal versus curva recortada, material PPT16**



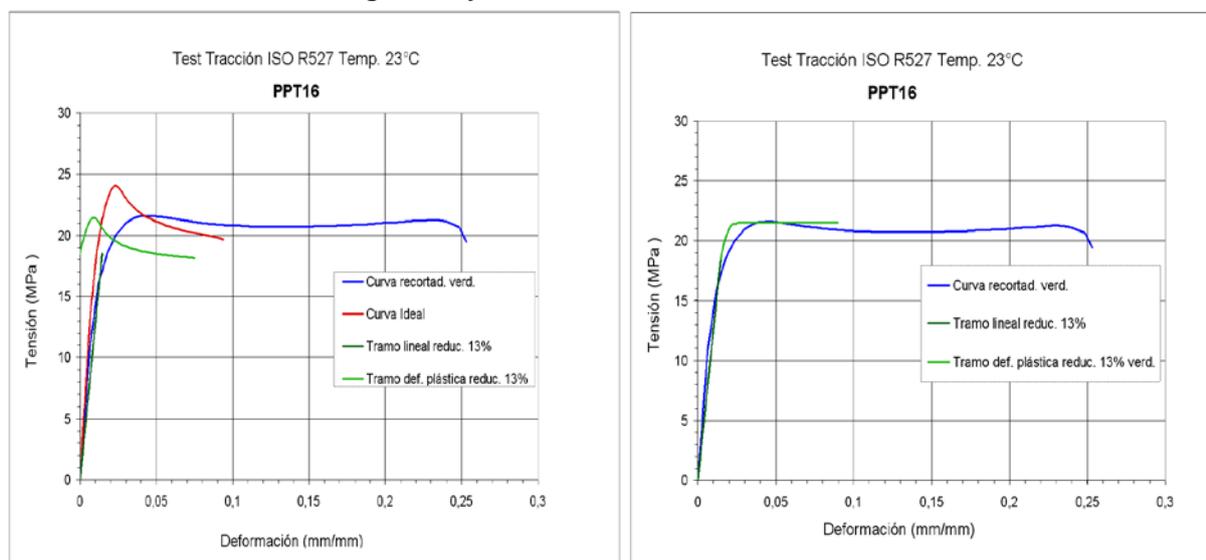
Los pasos son los siguientes:

1. Corrección de la curva ideal para obtener tensiones y deformaciones verdaderas (Rabanal, 2009).
2. Reducción de la tensión máxima. En este paso se contempla la caída de las propiedades debido al proceso de inyección de pieza real. Para este ejemplo se aplica el 13% de la caída de propiedades (de 24MPa a 20.93MPa), pero este dato será desconocido, por lo que deberá aplicarse la media definida al final de este estudio (tabla 5), como dato genérico de escalado.
3. Estimación del nuevo límite de fluencia falseado para la curva reducida verdadera: división de la curva verde en tramo lineal y tramo plástico (tal como se introduce en los códigos numéricos, figura 5). Se utiliza la reducción debido al proceso de inyección como valor para hallar este punto de fragmentación de la curva (límite de fluencia falseado). Para el ejemplo, la coordenada que representa una caída del 13% es de 18.3MPa. De

esta forma se tiene un límite de fluencia falseado de 18.3 MPa y un valor de tensión máxima de 20.9 MPa.

4. Corrección de la curva obtenida en aquellos puntos de pendiente negativa (si se presentan), a fin de evitar singularidades numéricas en el proceso de cálculo. Para ayudar a la comprensión, la figura 6 muestra la curva de cálculo verdadera corregida en pendiente en un solo tramo posicionada para comparativa versus la recortada verdadera (solución).
5. Por lo que se refiere al ajuste de la deformación longitudinal unitaria de rotura, la diferencia entre el valor de probeta ideal y de probeta recortada es muy significativa (figura 6), por lo que se decide, a falta de mayor información, mantener los datos de partida (probeta ideal).

**Figuras 5 y 6: Curvas material de estudio PPT16**



### 3. Obtención de datos experimentales

A continuación se presentan los materiales objeto de caracterización que serán utilizados para la fabricación de piezas del conjunto de validación Módulo de Puerta de un vehículo.

#### 3.1. Selección de los materiales de estudio

En concreto se selecciona:

1. Un polipropileno PP copolímero con carga un 16% de carga mineral de Talco (PPT16). Este tipo de material representa un polipropileno de capacidad mecánica baja, frecuentemente usado en muchas piezas de sistemas de interior, especialmente en aquellas que no se requiere un grado de funcionalidad elevado.
2. Un polipropileno PP copolímero con un 30% de carga mineral de Talco (PPT30). Material parecido al anterior pero con mejoras en el comportamiento frente a dinámica estructural. Se suele asignar a aquellas piezas susceptibles a impacto.
3. Un ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), copolímero con mayor respuesta mecánica que los polipropilenos. Suele usarse combinado con los dos anteriores en sistemas de interior de gama baja y media, mientras que para acabados de alta calidad se recurre principalmente a ABS combinados con ABS-PC (con Policarbonatos) y materiales *composites*.

### 3.2. Forma y dimensionado de las probetas

Se realiza el dimensionado de las muestras (probetas ideales y probetas recortadas) según normativa de referencia (UNE-EN ISO 527:1996). Tipologías usadas: 1A, 1B y 1BA.

### 3.3. Datos material ideal

Los resultados que se presentan para cada material son valores medios de una muestra estadística de probetas representativa.

**Tabla 1: Caracterización mecánica ideal del PPT16**

Material	Temp. (°C)	Dirección flujo	Velocidad (mm/sec)	Módulo $E$ (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Def. máxima (%)	Tensión ruptura (MPa)	Def. ruptura (%)
PPT16	23	Transv.	0.83	2500	24.1	2.3	19.8	9.0
		Longit.	-	-	-	-	-	-

**Tabla 2: Caracterización mecánica ideal del PPT30**

Material	Temp. (°C)	Dirección flujo	Velocidad (mm/sec)	Módulo $E$ (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Def. máxima (%)	Tensión ruptura (MPa)	Def. ruptura (%)
PPT30	23	Transv.	0.83	2800	24.1	21.2	17.4	11.0
		Longit.	-	-	-	-	-	-

**Tabla 3: Caracterización mecánica ideal del ABS**

Material	Temp. (°C)	Dirección flujo	Velocidad (mm/sec)	Módulo $E$ (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Def. máxima (%)	Tensión ruptura (MPa)	Def. ruptura (%)
ABS	23	Media	0.083	2400	45.7	3.0	36.3	3.9

La curva de uno de los materiales (ABS) puede verse en la figura 13.

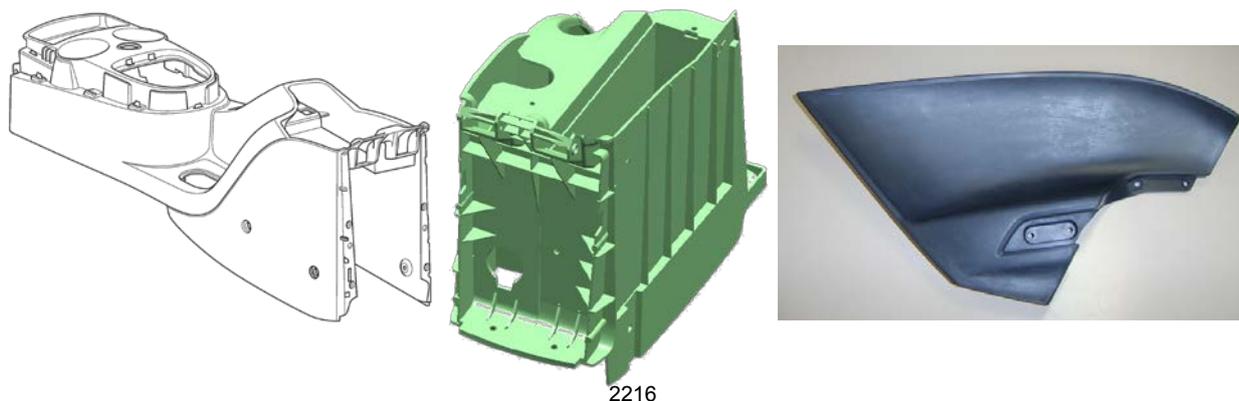
### 3.4. Datos probetas recortadas

A continuación se describen las piezas seleccionadas para la extracción de probetas. Estas 3 piezas responden a 3 niveles de complejidad de diseño.

#### 3.4.1. Piezas fuente para extracción de probetas recortadas

Pieza Cuerpo consola central para el material PPT16. Del mismo conjunto se ha utilizado la pieza Estructural interna, de PPT30, mientras que la pieza Inserto pertenece a un conjunto módulo panel puerta (ABS).

**Figuras 7, 8 y 9: Pieza Cuerpo consola central (3D CAD), pieza Estructural interna (3DCAD) y pieza Inserto (real)**

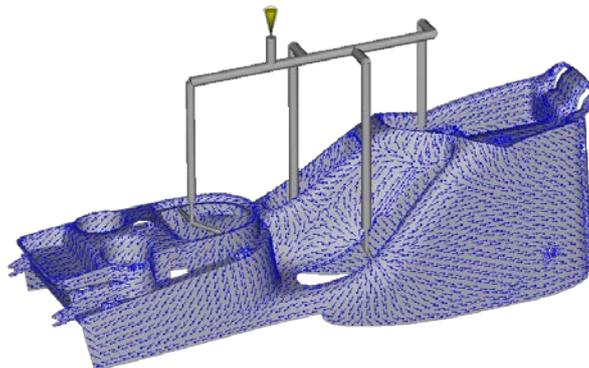


### 3.4.2. Identificación de las muestras de extracción. Trazabilidad

Se ha ubicado la posición de las muestras de extracción teniendo en cuenta la dirección del flujo del material, la disponibilidad de áreas de mayor planitud, la uniformidad del espesor y evitando marcas debidas a correderas o expulsores de molde.

Para el estudio de las direcciones de flujo se han obtenido mapas mediante simulación reológica a partir el código numérico comercial *Moldflow*, para cada pieza.

**Figura 10: Líneas de flujo, pieza Cuerpo consola central**



Se han registrado las condiciones de inyección de cada serie de piezas. Se dispone de los informes de ensayo de molde para una posible trazabilidad de la influencia de estos parámetros sobre los resultados en la caracterización.

Se ha diseñado un código de identificación para las probetas, garantizando su trazabilidad posicional sobre pieza. Un ejemplo de codificación es el siguiente:

01/ B ---T23V1e3A.CC

que corresponde a una muestra obtenida de una pieza Consola Central (CC) de primera inyección (01), material --- de la firma Basell (B), para ensayo a tracción a 23°C (T23), con una velocidad entre 1 y 5 mm/min (V1), de espesor 3 mm (e3) y extraída en zona A.

El número total de probetas para la caracterización de cada material ha sido de 2 muestras por área (mediante dos piezas) para cada material, por lo que en cada zona se realiza la media de las dos curvas obtenidas. Un total de 10 probetas caracteriza cada material.

### 3.4.3. Obtención de las probetas recortadas

Las dimensiones de las probetas vienen condicionadas por el tamaño de la pieza de la que son extraídas (1B para PPT16 y ABS, 1BA para PPT30). Mediante métodos clásicos de corte se han obtenido las muestras (planchas rectangulares) y su conformación final. Se ha procedido a la señalización mediante marcas de la longitud de referencia  $l_0$  necesarias para el extensómetro en el ensayo. Antes de proceder a la realización de los ensayos se ha garantizado el acondicionamiento según norma de referencia (UNE-EN ISO 291: 1998).

Se han realizado mapas de ubicación de las muestras extraídas para cada pieza (ejemplo para la pieza Inserto, figura 11).

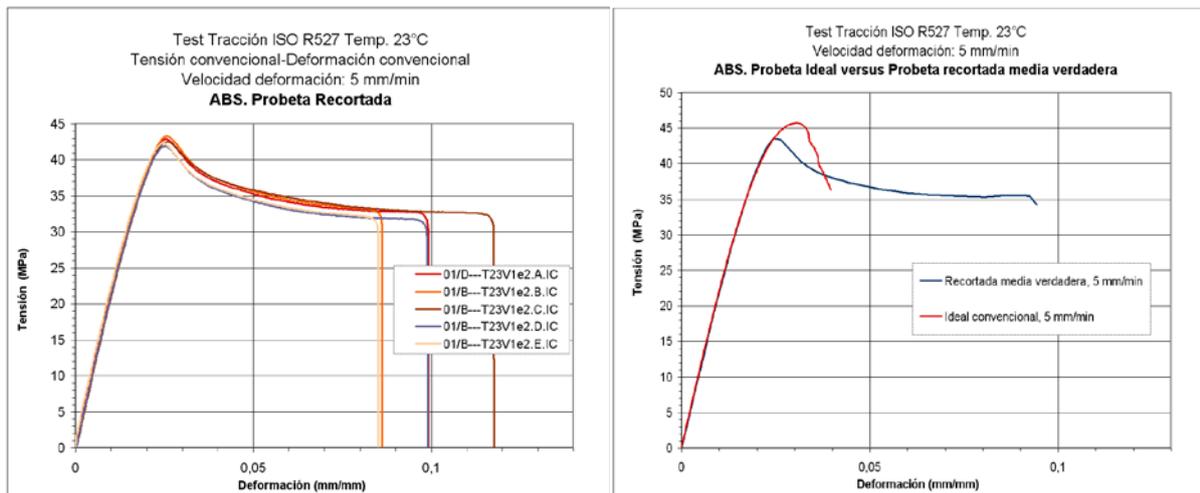
**Figura 11: Áreas de extracción de planchas para ensayo, pieza Inserto**



### 3.4.4. Curvas probeta recortada de los materiales de estudio

Para cada componente se ha tratado, por zonas, las curvas obtenidas mediante máquina universal MTS Alliance RF100 (Shah,1983). Se grafica una curva media por área: 5 curvas medias por material (figura 12, material ABS). La figura 13 muestra la curva media obtenida para este mismo material (curva azul).

**Figuras 12 y 13: Curvas material recortado ABS (5 zonas). Curva recortada media verdadera versus ideal**



### 3.5. Definición de la estimación de parámetros de corrección en base a los materiales de estudio

Mediante comparativa curva ideal versus curva recortada se establece la caída de tensiones máxima (factor de escalado), para cada material, como:

**Tabla 4: Valores de caída de la tensión máxima**

Material	Temp. (°C)	$\sigma_{Max}$ Ideal (MPa)	$\sigma_{Max}$ Recort. Media Verdad. (MPa)	$\Delta\sigma_{Max}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{Max}$ (%)	$\Delta\sigma_{Max}$ Media (%)
PPT16	23	24.0	20.7	-3.4	-13.9	
PPT30	23	21.2	20.1	-1.1	-5.2	-8.6
ABS	23	45.7	42.7	-3.0	-6.6	

Por familias, se definen los valores genéricos de escalado siguientes:

**Tabla 5: Valores genéricos, familia PP y ABS**

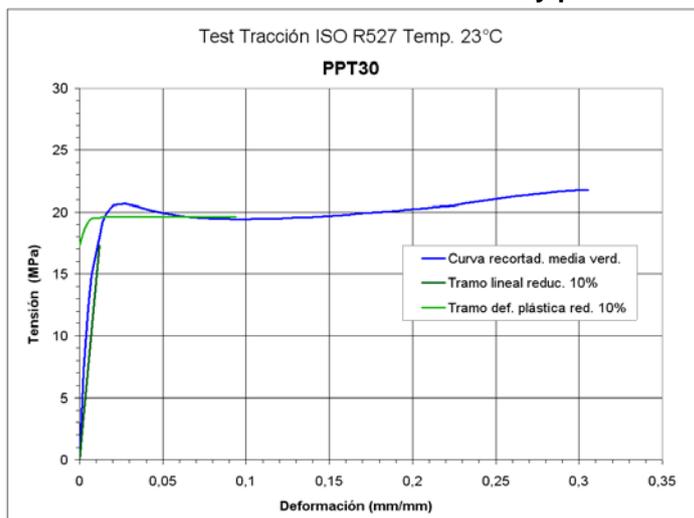
Material	Temp. (°C)	$\Delta\sigma_{Max}$ Media (%)
PPT16	23	10
ABS	23	7

Para la deformación longitudinal unitaria máxima no es posible establecer un valor de estimación. Se conserva el valor original de la curva ideal.

### 3.6. Curvas estimadas de cálculo para los 3 materiales

En la figura 14 se muestra la curva de cálculo obtenida para uno de los tres materiales (dos tramos en verde), según nueva propuesta de caracterización, utilizando el escalado presentado (tabla 5, 10% para este material PPT30).

Figura 14: Curva material PPT30. Tramo lineal y plástico de cálculo

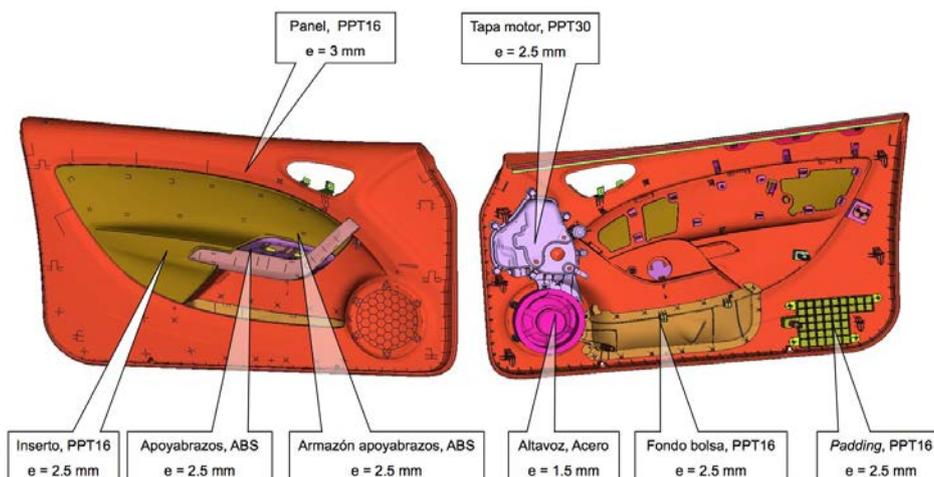


## 4. Validación de la Metodología Curva Estimada de Caracterización

### 4.1. Módulo Panel Puerta. Materiales, espesores y condiciones enlace

El conjunto utilizado para la validación corresponde a un Módulo Panel Puerta (MPP) de un automóvil, ubicado en la posición delantera de un vehículo de 3 puertas, en lado conductor. Las figuras 15 y 16 muestran las distintas piezas del conjunto.

Figuras 15 y 16: Vista anterior y posterior ensamblaje MPP. Espesores y materiales



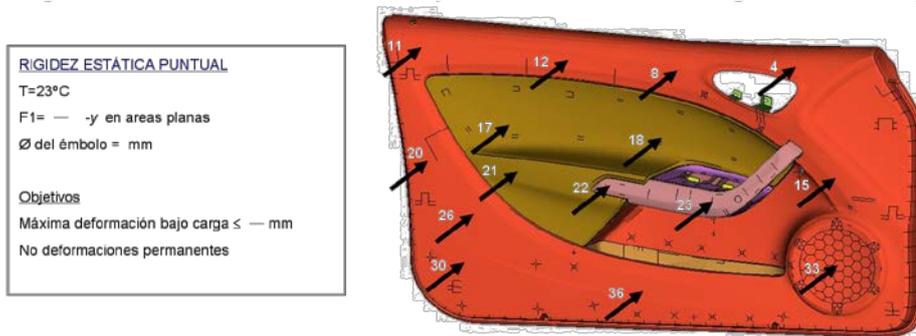
Se han usado los 3 materiales de estudio para su fabricación: PPT16, PPT30 y ABS. La estructura metálica del soporte es de acero. Se han implementado las condiciones de enlace que representan el panel montado en vehículo.

### 4.2. Cuaderno de cargas

Se describe, a nivel gráfico, las exigencias de esta experimentación, extraídas de un

cuaderno de cargas. Se omiten los valores requeridos por motivos de confidencialidad.

**Figura 17: Definición de los ensayos de validación de Rigidez estática puntual**

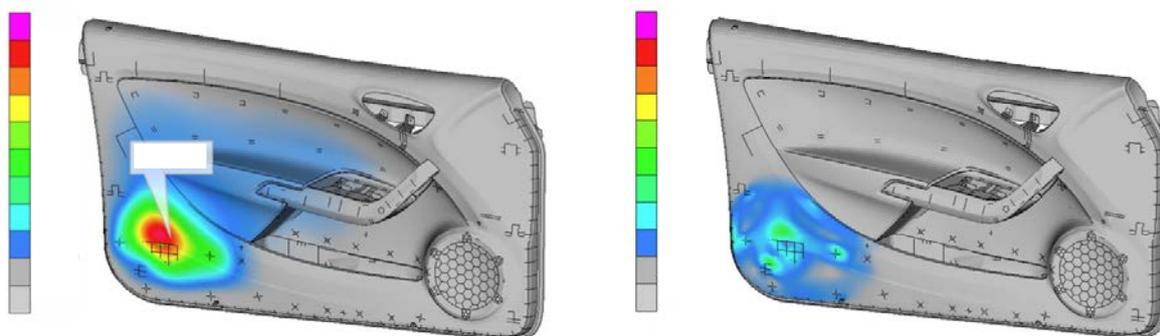


### 4.3. Resultados de las simulaciones

Se han realizado análisis utilizando el modelo constitutivo elastoplástico isotrópico con curvas ideales, y cálculos utilizando la nueva propuesta de caracterización, para los 3 materiales. Se han efectuado los análisis con el software Abaqus/Implicit v6.8.

Todos los puntos presentan un valor de deformación inferior al especificado en el cuaderno de cargas, en ambos conjuntos de análisis. Ningún punto llega a superar el límite de fluencia, por lo que no existen deformaciones remanentes. Los resultados se recogen en la tabla 6 de correlación. Por motivos de confidencialidad solo se muestran los resultados a nivel comparativo (% de desviación respecto al valor real).

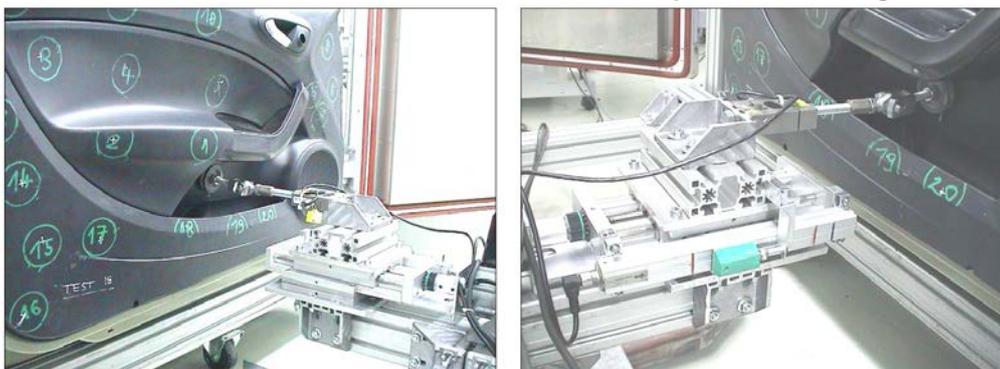
**Figuras 18 y 19: Diagrama de deformaciones (izquierda) y de tensiones equivalente de Von Mises (derecha). Punto 16 de ensayo**



### 4.4. Resultados test experimental

Los ensayos se han llevado a cabo mediante un equipamiento S21014-20, con célula de carga HBM S9 de 2 KN (tabla 6). Por motivos de confidencialidad solo se muestran los resultados a nivel comparativo (en este caso como referencia).

**Figura 20 y 21: Aplicación de la fuerza mediante célula de carga, ensayo rigidez estática puntual. Lectura de la deformación en la dirección de aplicación de cargas. Punto 21**



#### 4.5. Correlación Laboratorio Virtual versus Laboratorio Físico

**Tabla 6: Resultados test experimental y simulación. Rigidez estática puntual sobre MPP**

Punto	Deformación Test real(mm)	Desviación deformación simulación Nueva propuesta (%)	Desviación deformación simulación Ideal (%)	Max $\sigma_{Von Mises}$ simulación Nueva propuesta (MPa)	Max $\sigma_{Von Mises}$ simulación Ideal (MPa)
1	Ref.	5	-8	<21	<24
2	Ref.	16	-12	<21	<24
3	Ref.	0	-15	<21	<24
5	Ref.	9	-11	<21	<24
6	Ref.	22	0	<21	<24
10	Ref.	9	-9	<21	<24
11	Ref.	10	-10	<21	<24
12	Ref.	-3	-9	<21	<24
13	Ref.	8	-8	<21	<24
16	Ref.	5	-14	<21	<24
19	Ref.	6	-15	<21	<24
21	Ref.	7	-13	<21	<24

Los valores de la simulación con la nueva propuesta de caracterización (Nueva propuesta) presentan mayor deformación que los obtenidos en los ensayos reales (Test). Esto es debido principalmente a que la pendiente de la curva en el tramo lineal (módulo de Young estimado) es más baja que la de la curva real del material. Consecuentemente, mediante la nueva propuesta de caracterización se tenderá a presentar valores de corrimientos ligeramente mayores que los reales, especialmente para pequeñas deformaciones.

Por otro lado, la simulación con curva ideal con límite de fluencia falseado a valores muy bajos (Simulación Ideal, praxis actual industrial) muestra un comportamiento más rígido que el real de la estructura. Esta caracterización habitual presenta una desviación respecto a las deformaciones reales mayor que la obtenida con la nueva propuesta. Añadir además, que en situaciones donde sea necesaria la descarga para capturar deformaciones residuales, presentará error (deformaciones remanentes casi nulas) mientras que con la nueva propuesta los valores obtenidos serán próximos a los reales.

#### 5. Conclusiones

Para la nueva propuesta de caracterización se selecciona, como base, el modelo elastoplástico con endurecimiento Isotrópico de Von Mises.

Como fruto de la investigación se ha determinado la disminución de las propiedades de 2 polipropilenos (con distinta carga mineral) y un ABS. Se deduce que la caída del 10% como media para los PP y el 7% para el ABS pueden usarse como primer valor genérico para el escalado de la curva elastoplástica, para estas familias.

La estimación de la nueva curva elastoplástica tiene en cuenta la corrección a valores

verdaderos, la disminución de la curva relacionado con el proceso de inyección (mediante el uso del valor obtenido: 10% o 7%) y una disminución del límite de fluencia (falseado) en relación a estos valores de caída estimados: caída prudente.

La correlación realizada sobre un conjunto Módulo Panel Puerta mediante experimentación física y simulación, muestra que esta nueva estrategia de caracterización logra resultados cercanos a los reales, con tendencia a presentar menor rigidez que la real. Para su uso en simulaciones de desarrollo de producto, situarse en el lado desfavorable (en cuanto a rigidez) puede ser incluso beneficioso para lograr diseños con buen comportamiento estructural. Finalmente destacar que la desviación en deformaciones es mejor que la obtenida mediante praxis habitual (modelo curva ideal con límite de fluencia falseado).

## 6. Bibliografía

- Ayneto, X. (1999, July). A Systematic Approach to Integrating Numerical Simulation and Testing Activities. *European Automotive Engineers Cooperation Congress*. Barcelona.
- Beltran, M., & Marcilla, A. (2003). *Propiedades mecánicas de los plásticos*. Obtenido el Marzo 17, 2011, de Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química: <http://iq.ua.es/TPO/Tema1.pdf>
- Bokulich, F. F. (2001). Simulation: Redefining the Development Process. *Automotive Engineering International*.
- Gordillo Aubert, A. (2000). *Influencia de la inyección sobre el comportamiento mecánico de los componentes de polipropileno*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya UPC, Barcelona.
- Hibbit, Karlson, & Sorensen, Inc. (2010). *User's Manual Version 6.8 Abaqus/Standard*.
- NAFEMS (1992). *Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. Glasgow: E. Hinton.
- Shah, V. (1983). *Handbook of Plastics Testing Technology*. New York: John Wiley&Sons.
- Rabanal, M.E. (2009). *Ensayos mecánicos. Tema 7*. Obtenido el Marzo 20, 2011, de Universidad Carlos III de Madrid. Ciencia e Ingeniería de Materiales: [http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-materiales-industriales/bloque-iii/Tema-7-Ensayos\\_mecanicos.pdf/view](http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-materiales-industriales/bloque-iii/Tema-7-Ensayos_mecanicos.pdf/view)
- UNE-EN ISO 527:1996. Materiales plásticos. Determinación de las propiedades en tracción.
- UNE-EN ISO 291: 1998. Atmosferas normalizadas para acondicionamiento y ensayos.
- Vedia, L.A., Svoboda, H. (2002). *Tracción, Compresión. Ensayos Industriales*. Obtenido el Mayo 15, 2011, de Universidad de Buenos Aires. Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval. Facultad de Ingeniería: [http://materias.fi.uba.ar/6716/Traccion%20compresion\\_1\\_EI.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6716/Traccion%20compresion_1_EI.pdf).
- White, R. E. (1985). *An introduction to finite element method with applications to nonlinear problems*. New York: Wiley.
- Zienkiewicz, O. C. (1994). *El método de los elementos finitos* (4ª ed). Madrid: McGraw-Hill.

## Correspondencia (Para más información contacte con):

Josep Maria Puigoriol Forcada. Universidad Ramón Llull. IQS School of Engineering.  
Departamento de Ingeniería Industrial. Vía Augusta 390, 08017, Barcelona, Spain.  
Phone: + 34 93 267 20 00 / Fax: + 34 93 205 62 65 / E-mail: [josep.puigoriol@iqs.url.edu](mailto:josep.puigoriol@iqs.url.edu)  
URL: <http://www.iqs.edu/>